

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GABRYEL ALMEIDA DOS SANTOS VENZEL**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL APLICADA À MELHORIA AERODINÂMICA DE UM  
PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**LONDRINA**

**2022**

**GABRYEL ALMEIDA DOS SANTOS VENZEL**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL APLICADA À MELHORIA AERODINÂMICA DE UM  
PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**COMPUTATIONAL ANALYSIS APPLIED TO THE AERODYNAMICS  
IMPROVEMENT OF AN ENERGY EFFICIENCY PROTOTYPE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Curso da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Ricardo de Vasconcelos Salvo.

**LONDRINA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GABRYEL ALMEIDA DOS SANTOS VENZEL**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL APLICADA À MELHORIA AERODINÂMICA DE UM  
PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica do Curso da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 20 de abril de 2022

---

Ricardo de Vasconcelos Salvo  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rafael Sene de Lima  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Ismael de Marchi Neto  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**LONDRINA**

**2022**

Dedico este trabalho à minha mãe, por todo o apoio  
prestado durante a minha formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais por todos os ensinamentos proporcionados até o presente momento. Em especial agradeço a minha mãe por todo o amor, esforço incentivo prestados durante este período que estive longe de casa.

Agradeço a minha irmã Quezia e a minha avó Maria por todo o apoio e compreensão durante os momentos de ausência e dificuldades.

Um agradecimento especial aos meus queridos amigos Glauco, Renan e Guilherme por contribuírem em muito para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Vocês são como irmãos para mim, obrigado por todo o apoio até aqui.

Gostaria de agradecer a todos os professores, em particular ao meu orientador por todos o conhecimento concedido durante a graduação.

E por fim, um agradecimento a todos que me acolheram e me ajudaram durante a minha formação.

## RESUMO

Os estudos relacionados a eficiência energética estão ganhando cada vez mais importância dentro das indústrias automotivas, visando a diminuição de impactos ambientais ocasionados principalmente pela poluição gerada pelos veículos. Devido ao fato de o arrasto estar intimamente relacionado a aerodinâmica dos automóveis, a área de pesquisas relacionadas a melhorias aerodinâmicas vem ganhando cada vez mais relevância. O presente trabalho buscou estudar o comportamento aerodinâmico de um protótipo de eficiência energética da equipe Tuba Turbo através de simulações de fluidodinâmica computacional tridimensional, utilizando técnica de blocagem manual para a construção das malhas do domínio computacional, buscando obter uma nova proposta de geometria com menor coeficiente de arrasto. A validação computacional se deu a partir da efetuação de simulações de três malhas com quantidade de elementos distintas utilizando a geometria do Corpo de Ahmed e comparando os resultados obtidos com os de outros trabalhos. Após a definição da malha a ser utilizada e validação do solver e modelo de turbulência, foi possível efetuar a simulação do protótipo atual da equipe, visando identificar possíveis pontos de melhoria do coeficiente de arrasto da geometria. Com a análise do protótipo atual da equipe efetuada, foi possível propor um novo perfil de carenagem visando minimizar os problemas identificados. Por fim a nova geometria proposta foi simulada e os resultados obtidos confirmaram uma diminuição de aproximadamente 50% no coeficiente de arrasto em comparação com o protótipo atual.

**Palavras-chave:** Aerodinâmica. Fluidodinâmica Computacional. Eficiência Energética. Corpo de Ahmed. Arrasto.

## ABSTRACT

Studies related to energy efficiency are gaining more and more importance within the automotive industries, aiming to reduce environmental impacts caused mainly by pollution generated by vehicles. Because drag is closely related to automobile aerodynamics, the area of research related to aerodynamic improvements is gaining more and more relevance. The present work sought to study the aerodynamic behavior of an energy efficiency prototype of the Tuba Turbo team through three-dimensional computational fluid dynamics simulations, using manual blocking technique for mesh construction of meshes in the computational domain, seeking to obtain a new geometry proposal with a lower drag coefficient. The computational validation was based on simulations of three meshes with different amounts of elements using the geometry of the Ahmed Body and comparing the results obtained with those of other works. After defining the mesh to be used and validating the solver and turbulence model, it was possible to simulate the team's current prototype, to identify possible points for improvement in the drag coefficient of the geometry. With the analysis of the current prototype of the team carried out, it was possible to propose a new fairing profile to minimize the problems identified. Finally, the proposed new geometry was simulated and the results obtained confirmed a decrease of approximately 50% in the drag coefficient compared to the current prototype.

**Keywords:** Aerodynamics. Computational Fluid Dynamics. Energy Efficiency. Ahmed Body. Drag.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Túnel de vento utilizado para testes aerodinâmicos em carros de fórmula 1. ....	14
Figura 2 – Possível classificação da mecânica dos fluidos de meios contínuos. ....	17
Figura 3 - Domínio discretizado em pequenos volumes de controle. ....	24
Figura 4 - Camada limite de um escoamento externo sobre uma placa plana. .	28
Figura 5 - Definição de forças e momentos sobre um corpo imerso em um escoamento uniforme. ....	29
Figura 6 - As forças de pressão e forças viscosas agindo em um corpo bidimensional e as forças resultantes de sustentação e arrasto. ....	30
Figura 7 - Representação esquemática das tendências históricas de coeficiente de arrasto dos veículos de passeio. ....	33
Figura 8 - Comportamento dos coeficientes de arrasto, sustentação e arfagem devido a variação da altura do veículo em relação ao solo. ....	34
Figura 9 - Distribuição de pressão bidimensional ao longo do perfil de um automóvel. ....	36
Figura 10 - Detalhamento da geometria utilizada no estudo de Ahmed. ....	37
Figura 11 - Protótipos de eficiência energética com elevado desempenho aerodinâmico. ....	39
Figura 12 – Dimensões do corpo de Ahmed com ângulo de saída de 25°. ....	40
Figura 13 - Modelo do corpo de Ahmed construído no SolidWorks. ....	41
Figura 14 - Esboço do volume de controle construído para validação computacional. ....	42
Figura 15 - Faces do domínio computacional de validação efetuado no ICFM CFD. ....	42
Figura 16 - Blocação manual efetuada para geração de malha do Corpo de Ahmed. ....	43
Figura 17 - Elementos na superfície do Corpo de Ahmed da malha de dois milhões de elementos. ....	44
Figura 18 – Linhas de corrente de velocidade em x com foco na recirculação traseira formada no corpo de Ahmed da simulação com dois milhões de elementos do presente trabalho. ....	47
Figura 19 - Linhas de corrente com foco na recirculação traseira do corpo de Ahmed a partir da simulação efetuada por Tonet via ANSYS Fluent. ....	47
Figura 20 - Esboço das linhas de corrente com foco na recirculação efetuadas por Lienhart et al. ....	48
Figura 21 - Vórtice formado na saída traseira do corpo de Ahmed da simulação de dois milhões de elementos do presente trabalho. ....	49
Figura 22 - Esboço do vórtice e recirculações apresentados por Ahmed et al. em seu artigo. ....	50
Figura 23 - Foto lateral do protótipo atual da Equipe Tuba Turbo. ....	51
Figura 24 - Foto em perspectiva do protótipo atual da Equipe Tuba Turbo. ....	51
Figura 25 - Dimensões da carenagem do protótipo atual. ....	52
Figura 26 - Modelo tridimensional simplificado do protótipo atual. ....	53
Figura 27 - Esboço do volume de controle construído para simulação do protótipo atual. ....	54



Figura 28 - Faces do domínio computacional do protótipo atual efetuado no ICEM CFD.....	55
Figura 29 - Blocação manual efetuada para geração de malha do protótipo atual.....	56
Figura 30 - Elementos de malha na superfície do protótipo atual.. ..	57
Figura 31 - Contorno de velocidade na região do plano de simetria com destaque em pontos importantes do protótipo atual.....	58
Figura 32 - Linhas de corrente de velocidade obtidas a partir da simulação do protótipo atual da equipe.....	59
Figura 33 - Contorno de velocidade em planos frontais do protótipo atual. ....	60
Figura 34 - Contorno de coeficiente de pressão na região do plano de simetria com destaque nas regiões de maior e menor coeficiente do protótipo atual....	61
Figura 35 – Contorno do coeficiente de pressão ao redor do protótipo atual. ...	62
Figura 36 – Esboço lateral da modificação da distância entre eixos. ....	63
Figura 37 – Esboço lateral da modificação do comprimento da carenagem. ....	64
Figura 38 – Esboço lateral da adição de um ângulo de saída traseiro.....	64
Figura 39 – Esboço lateral da adição de uma curvatura frontal.....	65
Figura 40 – Esboço lateral da adição de um ângulo de entrada inferior. ....	66
Figura 41 – Esboço lateral da mudança da distância do veículo em relação ao solo.....	66
Figura 42 - Esboço superior da nova proposta. ....	67
Figura 43 - Modelo tridimensional modificado. ....	67
Figura 44 - Geometria da nova carenagem com a adição dos raios em alguns vértices.....	68
Figura 45 - Dimensões da nova proposta de carenagem. ....	68
Figura 46 - Modelo tridimensional simétrico da nova proposta de carenagem.	69
Figura 47 – Nova proposta de carenagem com diferentes ângulos de saída lateral.....	70
Figura 48 - Esboço do volume de controle construído para simulação da nova proposta.....	71
Figura 49 - Blocação manual efetuada para geração de malha da nova proposta de carenagem. ....	72
Figura 50 - Elementos de malha na superfície da nova proposta de carenagem. ....	72
Figura 51 – Região frontal da blocação da nova proposta com foco nos elementos de malha com baixo ângulo.....	73
Figura 52 - Contorno de velocidade na região do plano de simetria com destaque em pontos importantes da nova proposta de carenagem. ....	75
Figura 53 - Linhas de corrente no plano de simetria da nova proposta de carenagem. ....	75
Figura 54 - Contorno de coeficiente de pressão na região do plano de simetria da nova proposta de carenagem. ....	76
Figura 55 - Contorno de coeficiente de pressão ao redor da nova proposta de carenagem. ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados referente as malhas de validação computacional.....	44
Tabela 2 – Coeficientes de arrasto e sustentação referentes as simulações de validação.....	45
Tabela 3 - Dados referente a malha construída para simulação do protótipo atual.....	56
Tabela 4 - Coeficientes de arrasto e sustentação referentes as simulações do protótipo atual. ....	58
Tabela 5 - Informações referente as malhas construídas para as simulações da nova proposta.....	73
Tabela 6 - Resultado das simulações referentes a nova proposta de carenagem. ....	74
Tabela 7 - Comparação dos resultados obtidos.....	77

## LISTA DE ACRÔNIMOS

DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
ESSS	Engineering Simulation And Scientific Software
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
SST	Shear Stress Transport
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WSL	Windows subsystem for Linux

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A$  - Área ( $m^2$ )  
 $A_p$  - Área projetada ( $m^2$ )  
 $a$  - Altura (m)  
 $C_d$  - Coeficiente de arrasto  
 $C_l$  - Coeficiente de sustentação  
 $\varepsilon$  - Taxa de dissipação de energia cinética ( $m^2/s^3$ )  
 $F_1$  - Função de mistura  
 $F_d$  - Força de arrasto (N)  
 $F_l$  - Força de sustentação (N)  
 $g$  - Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )  
 $k$  - Energia cinética turbulenta (J/kg)  
 $L$  - Comprimento (m)  
 $\mu$  - Viscosidade dinâmica (ou molecular) ( $Kg/m*s$ )  
 $\mu_t$  - Viscosidade turbulenta ( $Kg/m*s$ )  
 $P$  - Pressão absoluta (Pa)  
 $P_k$  - Produção de energia cinética turbulenta ( $m^2/s^3$ )  
 $\rho$  - Densidade ( $kg/m^3$ )  
 $Re$  - Número de Reynolds  
 $\tau$  - Tensão cisalhante (Pa)  
 $V$  - Velocidade (m/s)  
 $u$  - Componente de velocidade na direção x (m/s)  
 $v$  - Componente de velocidade na direção y (m/s)  
 $w$  - Componente de velocidade na direção z (m/s)  
 $\omega$  - Taxa de dissipação específica de energia cinética (1/s)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>14</b>
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Mecânica dos fluidos de meios contínuo</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Tipos de escoamento</b> .....	<b>18</b>
2.2.1	Viscosos e não viscosos .....	18
2.2.2	Compressível e incompressível.....	18
2.2.3	Laminar e turbulento.....	18
2.2.4	Interno e externo .....	19
<b>2.3</b>	<b>Equação da continuidade</b> .....	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Equações de navier-stokes</b> .....	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Discretização</b> .....	<b>22</b>
3.1.1	Método das diferenças finitas .....	22
3.1.2	Método dos elementos finitos .....	23
3.1.3	Método dos volumes finitos .....	23
<b>3.2</b>	<b>Modelos de turbulência</b> .....	<b>25</b>
3.2.2	Modelos – $\kappa - \epsilon$ .....	25
3.2.3	Modelos – $\kappa - \omega$ .....	25
3.2.4	Modelos – $\kappa - \omega$ SST.....	26
<b>4</b>	<b>CONCEITOS DA AERODINÂMICA</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>Princípio de bernoulli</b> .....	<b>27</b>
<b>4.2</b>	<b>Camada limite</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3</b>	<b>Arrasto e sustentação</b> .....	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>AERODINÂMICA VEICULAR</b> .....	<b>33</b>
<b>5.1</b>	<b>O efeito solo</b> .....	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Pontos de pressão</b> .....	<b>35</b>
<b>5.3</b>	<b>O Corpo de Ahmed</b> .....	<b>37</b>
<b>5.4</b>	<b>Protótipos para competições de eficiência energética</b> .....	<b>37</b>

<b>6</b>	<b>VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>40</b>
<b>6.1</b>	<b>Simulação computacional do corpo de ahmed .....</b>	<b>40</b>
<b>6.2</b>	<b>Comparação dos resultados com outros trabalhos .....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>PROTÓTIPO ATUAL DA EQUIPE TUBA TURBO .....</b>	<b>51</b>
<b>7.1</b>	<b>Simulação da carenagem do protótipo atual .....</b>	<b>52</b>
<b>7.2</b>	<b>Resultados referentes a simulação do protótipo atual .....</b>	<b>58</b>
<b>8</b>	<b>NOVA PROPOSTA DE CARENAGEM.....</b>	<b>63</b>
<b>8.1</b>	<b>Melhorias empregadas no perfil da carenagem.....</b>	<b>63</b>
<b>8.2</b>	<b>Simulações da nova proposta de carenagem.....</b>	<b>69</b>
<b>8.3</b>	<b>Resultados referentes a nova proposta de carenagem .....</b>	<b>74</b>
<b>8.4</b>	<b>Comparação dos resultados .....</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>78</b>
<b>9.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de automóveis para a locomoção humana é cada dia mais essencial para a sociedade, o que faz com que haja um aumento acelerado no número de veículos em trânsito, tornando os problemas como a escassez dos recursos naturais para a fabricação combustíveis e a poluição ambiental cada vez mais relevantes. Com isso, estudos relacionados a área de eficiência energética vem se tornando mais essenciais para as indústrias do ramo, a fim de minimizar os impactos ambientais atrelados a locomoção urbana.

A aerodinâmica é um fator que está relacionado ao desempenho dos veículos, influenciando diretamente no consumo de combustível, estabilidade e velocidade dos mesmos. Santos (2014), comenta que estudos aerodinâmicos relacionados ao setor automobilístico em túneis de vento começaram a ser efetuados após a segunda guerra mundial, onde os engenheiros ligados a essas competições estavam em busca de vantagens de desempenho em relação aos concorrentes.

Porém, túneis de vento de grande porte como o apresentado na Figura 1, que são instalações utilizadas para o estudo do escoamento de ar ao redor de corpos imersos, necessitam de uma estrutura com elevado custo de construção e utilização.

Com o surgimento da Dinâmica dos Fluidos Computacional ou DFC, foi possível se ter um meio de efetuar simulações deste tipo diminuindo a necessidade de experimentação prática, e que vem se tornando cada vez mais acessível, rápida e segura com a constante evolução tecnológica.

Visando efetuar estudos na área de eficiência, que se tornou uma grande demanda do setor automotivo, foi criada em 2018 a equipe de eficiência energética da UTFPR Londrina, Tuba Turbo, que possibilitou com que os alunos desenvolvessem e aplicassem conhecimentos teóricos e práticos fora de sala de aula.

Partindo da necessidade de construção de um novo protótipo, a equipe decidiu efetuar o estudo aerodinâmico da carroceria do protótipo atual, que considerando a metodologia de construção do protótipo utilizada atualmente pela equipe, é a área com maior possibilidade de melhoria, sem ter grande influência no custo final de construção do protótipo.

Figura 1 - Túnel de vento utilizado para testes aerodinâmicos em carros de fórmula 1.



Fonte: site autoracing<sup>1</sup>.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor um novo perfil aerodinâmico com menor coeficiente de arrasto para o próximo protótipo a ser construído pela equipe de eficiência energética Tuba Turbo. Para tal, será necessário em primeiro momento efetuar uma análise qualitativa da aerodinâmica de um protótipo de eficiência energética já existente através de simulação fluidodinâmica computacional tridimensional.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desenvolvidos durante a realização deste trabalho visando atingir o objetivo geral, podem ser descritos como:

---

<sup>1</sup> FONTE: <https://www.autoracing.com.br/f1-propoe-ideia-radical-para-o-tunel-de-vento/> (acesso: 24/10/2021 – 16h00)



- Efetuar modelagem 3D das geometrias a serem simuladas;
- Estudar e aplicar os parâmetros corretos em relação a construção da malha e efetuação da simulação computacional;
- Efetuar um estudo de validação de malha;
- Efetuar simulações computacionais do corpo de Ahmed, do protótipo atual e da nova geometria a ser proposta;
- Aplicar conceitos de melhoria à carenagem atual, buscando diminuição do coeficiente de arrasto;
- Propor a nova geometria a partir das melhorias aplicadas;
- Desenvolver um roteiro de futuros estudos aerodinâmicos para a equipe Tuba Turbo;

## 1.2 Justificativa

A demanda por estudos de eficiência energética está se tornando cada vez mais essencial para as indústrias de automóveis, criando a necessidade de que cada área relacionada ao consumo de combustível seja estudada a fundo.

A partir da compreensão de que a aerodinâmica é uma área de pesquisa essencial para o aumento da eficiência dos veículos, torna-se relevante efetuar pesquisas relacionadas a este ramo da dinâmica veicular. Hucho (1998) cita que com uma variação de arrasto de 40% pode-se conseguir uma redução no consumo de aproximadamente 40% para um veículo com massa de 1000 Kg.

Entendendo o alto nível em que as competições de eficiência energética se encontram atualmente, torna-se necessário estudos mais elaborados nas mais diversas áreas do conhecimento que são necessárias para a confecção de um veículo de alto desempenho energético.

Tendo como base de comparação equipes com maior tempo de experiência como a Pato a Jato (UTFPR, Pato Branco) e a Eficem (UFSC, Florianópolis), fica evidente a necessidade de estudos aerodinâmico nos protótipos, como os efetuados por Bosch (2016), Tonet (2019) e Such (2018), que buscaram em seus trabalhos efetuar melhorias na carroceria dos respectivos protótipos a fim de manterem os veículos competitivos.

Desta maneira, tornasse importante propor um novo perfil aerodinâmico para o próximo protótipo da equipe Tuba Turbo com base em análises de maior qualidade, possibilitando que o próximo veículo da equipe possa apresentar melhores resultados, e também criando um modelo de análises para ser seguido posteriormente.

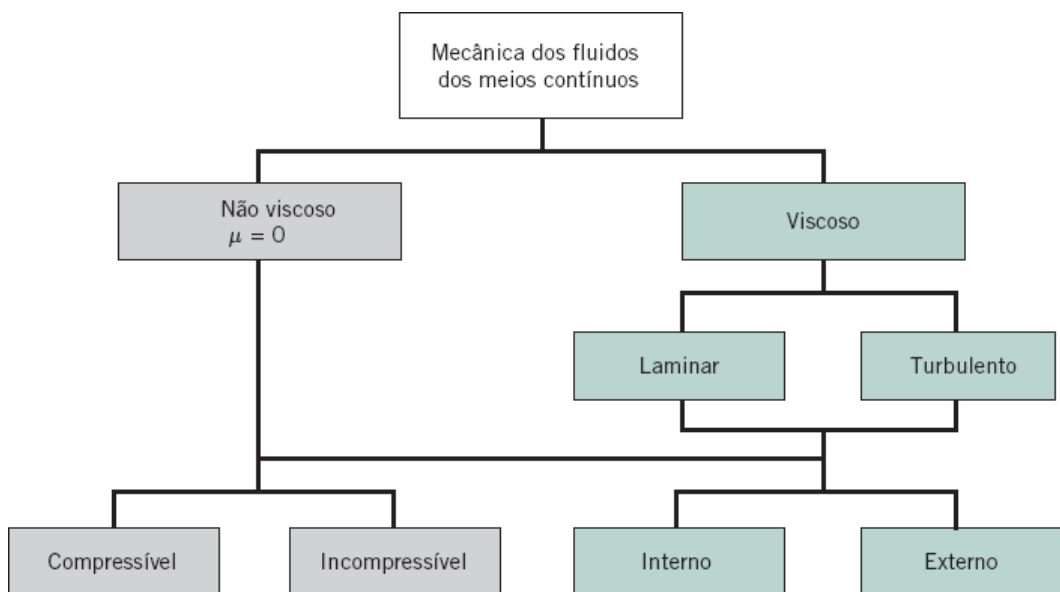
## 2 FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS

A mecânica dos fluidos é o estudo dos fluidos em movimento (dinâmica dos fluidos) ou em repouso (estática dos fluidos). Tanto os gases quanto os líquidos são classificados como fluidos, tendo um enorme número de aplicações na engenharia, tais como, bombas, ventiladores, turbinas, aviões, navios, rios, moinhos de vento, tubos, mísseis, motores, filtros, jatos e aspersores. Quando se pensa neste assunto, vemos que quase tudo no planeta ou é um fluido ou se move em um fluido ou próximo dele (WHITE, 2018, p.3).

### 2.1 Mecânica dos fluidos de meios contínuo

O fluido como meio contínuo, pode ser compreendido como aquele que apresenta pequenas variações em suas propriedades. E essa hipótese possui grande validade no estudo dos fluidos sobre condições normais de comportamento. A partir desse conceito, Fox (2018, p. 36) apresenta uma possível classificação para mecânica dos fluidos de meios contínuos como mostrado na Figura 2.

**Figura 2 – Possível classificação da mecânica dos fluidos de meios contínuos.**



Fonte: Fox (2018, p. 36)

## 2.2 Tipos de escoamento

Baseando-se na Figura 2, serão abordados a seguir de forma simplificada os tipos de escoamentos que tornam possível essa classificação da mecânica dos fluidos dos meios contínuos.

### 2.2.1 Viscosos e não viscosos

Todo fluido possui viscosidade não nula, e ela pode ser compreendida como sendo a capacidade que o mesmo possui de escoar sobre uma superfície, ou como Yunus A. Çengel (2012, p.9) diz em seu livro, a viscosidade pode ser entendida como uma medida de aderência interna que um fluido possui. Também segundo o autor, para diversos problemas práticos, existem regiões onde as forças viscosas possuem valores desprezíveis em relação a outros fatores como a pressão por exemplo, e nesses casos é possível utilizar a hipótese de escoamento não viscoso sem que haja uma perda significativa na precisão da análise.

### 2.2.2 Compressível e incompressível

Escoamentos onde as variações na massa específica são desprezíveis denominam-se incompressíveis; quando as variações de massa específica não são desprezíveis, o escoamento é denominado compressível. O exemplo mais comum de escoamento compressível é o escoamento de gases, enquanto o escoamento de líquidos pode, geralmente, ser tratado como incompressível (FOX, 2018, p. 40).

### 2.2.3 Laminar e turbulento

O escoamento em regime laminar é o tipo de escoamento onde o fluido se movimenta de maneira suave e de forma bem organizada. Já o escoamento turbulento possui como uma de suas características o movimento caótico. Um bom exemplo para compreendermos a diferença desses dois tipos de escoamento é dado por Fox (2018, p. 40), onde o autor diz que se você abrir uma torneira simples com uma vazão muito pequena, a água escoará de forma suave, quase vitrificada (laminar), e se aumentarmos a vazão, notaremos a água saindo de maneira bem agitada (turbulento).

O número de Reynolds apresentado na Eq. (1), é o parâmetro utilizado para caracterizar se um escoamento está em regime laminar ou turbulento. Osborn Reynolds, por volta dos anos de 1880, efetuou experimentos que resultaram na criação do número de Reynolds ( $Re$ ), que na época era aplicado unicamente para caracterizar o regime em escoamentos internos. Já em 1914, Ludwig Prandtl acabou descobrindo a camada limite, e assim, também conseguiu obter uma relação de número de Reynolds com o regime de escoamento para fluxos externos<sup>2</sup>.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (1)$$

Onde:

$\rho$  → Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  → Velocidade do escoamento ( $\text{m/s}$ )

$L$  → Comprimento de referência ( $\text{m}$ )

$\mu$  → Viscosidade ( $\text{Kg/m}^*\text{s}$ )

#### 2.2.4 Interno e externo

Pode-se dizer que um escoamento interno é aquele no qual o fluido está totalmente envolto por superfícies sólidas que o forcem a escoar em um caminho pré-determinado. Este tipo de escoamento tem por característica o efeito de forças viscosas em todo o domínio do fluido. Em contra partida, o escoamento externo não possui superfícies sólidas restringindo a movimentação do fluido em direções determinadas, fazendo com que as forças viscosas só tenham grande influência próximo a camadas-limites das superfícies expostas ao escoamento.

### 2.3 Equação da contiuidade

Segundo Frank White (2018, p.223), a equação diferencial parcial da conservação de massa, apresentada a Eq. (2), também é comumente conhecida

---

<sup>2</sup> FONTE: <https://www.guiadaengenharia.com/numero-reynolds-entenda/> (acesso: 09/10/2021 – 18h20)

como equação da continuidade, pois, ela não necessita de nenhuma hipótese além da que a massa específica e a velocidade sejam funções contínuas.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2)$$

Onde:

$u \rightarrow$  Componente x de velocidade (m/s)

$v \rightarrow$  Componente y de velocidade (m/s)

$w \rightarrow$  Componente z de velocidade (m/s)

## 2.4 Equações de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes, são um conjunto de três equações diferenciais parciais não-lineares que possibilitam relacionar as propriedades de transporte referente ao movimento de um fluido, sendo essas propriedades, as velocidades nas três direções cartesianas juntamente com a pressão. As Equações em questão estão descritas em (3), (4) e (5).

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

Onde:

$g \rightarrow$  Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

As equações acima possuem quatro incógnitas e três equações. Elas deverão ser combinadas com a relação de continuidade incompressível para formar quatro

equações com essas quatro incógnitas (WHITE, 2018, p.233). Entretanto, um fato interessante é que as equações de Navier-Stokes possuem papel claro na determinação de suas respectivas componentes de velocidade, deixando a equação da continuidade para determinação da pressão.

Em escoamentos compressíveis utiliza-se uma relação de estado ligando a massa específica e a pressão. Em escoamentos incompressíveis esse problema normalmente é sanado com a aplicação do divergente à equação de quantidade de movimento e utilização da equação da continuidade para simplificação da equação resultante, obtendo assim uma equação de Poisson para a pressão (FERZIGER e PERIC, 2002, p.167).

Tanto Fox (2018, p. 183) quanto White (2011, p.233), comentam que o campo da DFC está evoluindo com grande rapidez, tendo cada vez mais ferramentas e softwares a disposição para auxiliar na análise das equações de Navier-Stokes evoluindo problemas mais realistas.

### 3 MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A Fluidodinâmica Computacional é um ramo de estudos cujo o objetivo é o de efetuar análises de escoamento de fluidos e os fenômenos relacionados aos mesmos por meio de simulações numéricas, aplicando assim os conceitos relacionados ao Cálculo Numérico na resolução das equações que regem a Mecânica dos Fluidos (ESSS<sup>3</sup>, 2016).

Para Korkischko (2006), as indústrias cada vez mais se valem dos métodos computacionais com o objetivo de diminuir a necessidade de experimentos, por ser uma opção que apresenta menores custos e tempo de experimentações. Esse fator faz com que as empresas priorizem investimentos em soluções computacionais, e se utilizem de experimentos em tuneis de vento somente em decisões finais de projeto ou para validações de modelos numéricos.

#### 3.1 Discretização

A discretização consiste na divisão de um domínio em partes com menor complexibilidade, tornando mais fáceis as metodologias de cálculos aplicadas sobre a região de interesse. Essa técnica permite que por exemplo a equação de Navier-Stokes, que não possui solução analítica para a maioria dos problemas reais, possa ser reescrita em forma algébrica e resolvida por meio de maneira numérica para cada uma das divisões do domínio (ESSS, 2016). E dentre todas as técnicas de discretização existentes, as mais difundidas são a de diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos.

##### 3.1.1 Método das diferenças finitas

Burden (2008) apresenta o método das diferenças finitas (MDF) como sendo uma técnica de resolução de equações diferenciais que se baseia na aproximação de derivadas por diferenças finitas. Ainda segundo o autor a fórmula de aproximação é originada a partir da série de Taylor da função derivada.

---

<sup>3</sup> FONTE: <https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/> (acesso: 10/10/2021 – 16h48)



Para Shaw (1992), o método das diferenças finitas pode ser empregado dentro da mecânica dos fluidos, porém, possui limitações com relação a geometrias complexas, e por possuir termos de não-linearidade por utilizar as equações de Navier-Stokes.

### 3.1.2 Método dos elementos finitos

Moaveni (1999, p.5) comenta que diferentemente do método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos (MEF) utiliza da formulação integral, onde as integrais são aproximadas por sistemas de equações algébricas. O autor ainda explica que o MEF é construído a partir da aproximação de uma função continua que é utilizada para representar a solução particular de cada nó que conecta os elementos, e a partir do acoplamento dessas soluções particulares se tem a solução do domínio estudado como um todo.

Este método é mais empregado na resolução de problemas relacionados a área estrutural, por ser bem adequado para tratar problemas com geometrias e carregamentos complexos (ESSS<sup>4</sup>, 2017). A estratégia empregada de dividir as zonas e efetuar cálculos em cada um dos nós também torna esse método mais efetivo para estudo de sólidos, remetendo a área de mecânica estrutural.

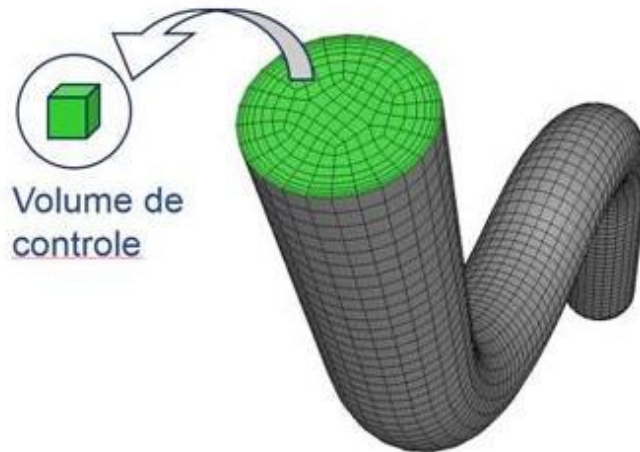
### 3.1.3 Método dos volumes finitos

Atualmente é o método mais difundido nas aplicações numéricas relacionadas a área de mecânica dos fluidos. Segundo Ferziger (2002, p. 71), MVF consiste na discretização do domínio de interesse em pequenos volumes de controle contínuos como apresentado na Figura 3.

---

<sup>4</sup> FONTE: <https://www.esss.co/blog/metodos-numericos-para-simulacao-na-engenharia/> (Acesso: 12/10/2021 – 19h30)

**Figura 3 - Domínio discretizado em pequenos volumes de controle.**



**Fonte: ESSS (2016)**

Para cada um dos volumes de controle discretizados, há um sistema de equações algébricas que necessita ser resolvido numericamente (ESSS, 2016). E assim como no MEF a solução do problema é obtida a partir do acoplamento de cada uma das soluções particulares aproximadas de cada volume de controle.

De maneira geral o método dos volumes finitos apresenta os seguintes passos para ser executado:

- Discretizar o domínio em pequenos volumes de controle;
- Efetuar as formulações integrais para cada um desses volumes;
- Aproximar de maneira numérica as integrais obtidas;
- Obter uma aproximação para os valores das variáveis nas faces e das derivadas nodais;
- Construir o sistema algébrico relativo;
- Calcular a solução desses sistemas.

Segundo a ESSS (2017), é importante observar que todas as soluções obtidas são aproximações do comportamento do sistema, e que há muitas técnicas sendo desenvolvidas constantemente para melhorar a eficiência computacional relacionada a velocidade de cálculos e precisão dos resultados.

### 3.2 Modelos de turbulência

Em análises relacionadas a mecânica dos fluidos, o comportamento irregular dos escoamentos turbulentos torna os estudos e representações físicas limitados, mesmo com todo o recurso computacional existente atualmente. Os diversos estudos relacionados aos escoamentos turbulentos ainda não foram o suficiente para que se formulasse uma teoria definitiva relacionada ao comportamento deste tipo de fenômeno, o que torna o desenvolvimento de modelos e técnicas de estudos para escoamentos turbulentos de suma importância para a dinâmica dos fluidos.

#### 3.2.2 Modelos – $\kappa$ – $\varepsilon$

O modelo  $\kappa$  –  $\varepsilon$  é baseado em equações de transporte para a energia cinética de turbulência  $\kappa$  e sua taxa de dissipação  $\varepsilon$ , e foi formulado por Launder e Sharma (1974). Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), este modelo é focado nos mecanismos que afetam a energia cinética turbulenta. Consistindo assim em duas equações de transporte que são utilizadas para efetuar a representação das propriedades do escoamento turbulento. As duas equações do modelo  $\kappa$  –  $\varepsilon$  estão descritas nas Eq. (6) e (7).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho k u) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho k \varepsilon) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} P_k - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

Onde:

$P_k \rightarrow$  Produção de energia cinética turbulenta ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )

$\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{\varepsilon 1}$  e  $C_{\varepsilon 2}$  são constantes empíricas.

#### 3.2.3 Modelos – $\kappa$ – $\omega$

O modelo  $\kappa$  –  $\omega$  foi desenvolvido por Wilcox (1993) e também é constituído por duas equações de transporte, onde uma delas é dada em função da energia cinética turbulenta  $k$ , e a outra é em função da taxa de dissipação específica dada pelo

termo  $\omega$ . As Eq. (8) e Eq. (9) apresentam a modelagem matemática que rege o modelo em questão.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \frac{\omega}{k} \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (9)$$

Onde:

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta^*$ ,  $\sigma$  e  $\sigma^*$  são constantes empíricas.

### 3.2.4 Modelos $\kappa - \omega$ SST

O modelo  $\kappa - \omega$  SST ou  $\kappa - \omega$  *Shear Stress Transport*, foi publicado por Menter (1994), com a ideia inicial de ser aplicado em simulações de escoamentos aeronáuticos com grandes gradientes adversos de pressão e descolamento de camada limite, unindo os pontos fortes dos modelos  $\kappa - \omega$  e  $\kappa - \epsilon$ . Segundo Rezende e Araújo (2012), o modelo em questão combina a formulação robusta e precisa do  $\kappa - \omega$  junto as paredes com a independência da corrente livre do modelo  $\kappa - \epsilon$  fora da camada limite, o que proporciona resultados com maior grau de precisão. As equações que regem o modelo estão descritas nas Eqs. (10) e (11).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = P_\kappa + \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (11)$$

Onde:

$F_1 \rightarrow$  Função de mistura

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta^*$ ,  $\sigma_\kappa$  e  $\sigma_{\omega 2}$  são constantes empíricas

## 4 CONCEITOS DA AERODINÂMICA

A aerodinâmica é de forma simplificada, o estudo de escoamentos externos de ar, ao redor de corpos sólidos, e essa área de estudos é embasada principalmente pelo princípio de Bernoulli. A todo momento tem-se as forças aerodinâmicas agindo sobre todos os corpos em movimento, como por exemplo automóveis e aeronaves, e os mesmos se aproveitam desses conceitos de maneira diferente, afim de obter os resultados desejados.

### 4.1 Princípio de Bernoulli

O princípio de Bernoulli apresenta uma relação entre a velocidade do fluxo de ar e a pressão correspondente a esse fluxo por meio do princípio da conservação de energia dos fluidos ideais, que seriam fluidos teóricos com viscosidade e atrito nulos. A equação referente a esta relação descrita na Eq. (12), denominada equação de Bernoulli, foi apresentada pela primeira vez no livro *Hydrodynamica* (1738), escrito pelo matemático suíço Daniel Bernoulli, obra que apresenta o primeiro estudo teórico sobre a dinâmica dos fluidos<sup>5</sup>.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + ga = \text{constantes} \quad (12)$$

Onde:

$P$  → Pressão absoluta (Pa)

$V$  → Velocidade do escoamento (m/s)

$a$  → Altura (m)

---

<sup>5</sup> Fonte: <http://biografias.netsaber.com.br/biografia-1840/biografia-de-daniel-bernoulli> (acesso: 25/092021 – 19h33)

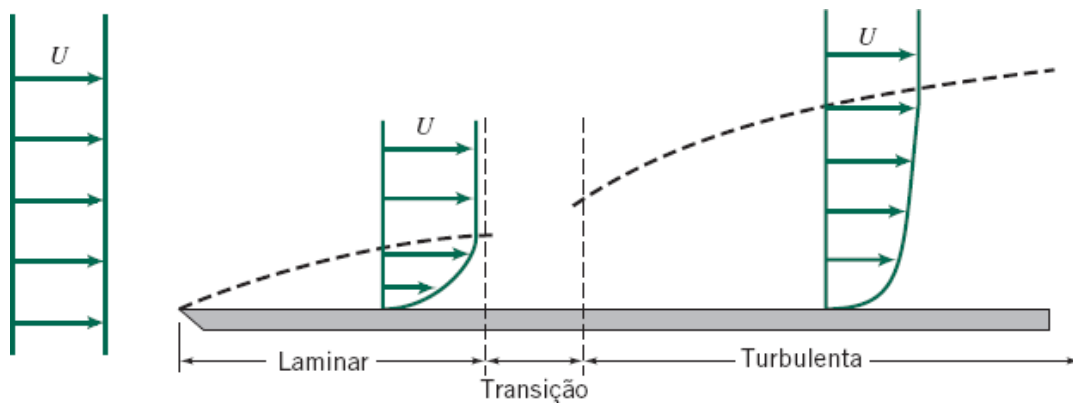
## 4.2 Camada limite

Uma das principais ferramentas para o estudo de escoamentos externos atualmente é a teoria da camada-limite, que foi formulada por Ludwig Prandtl em 1904 (WHITE, 2018, p.455). Fox (2018, p. 183) comenta que o conceito de camada-limite forneceu o elo que faltava entre a teoria e a prática o que permitiu a solução de problemas relacionados a escoamentos viscosos.

Os estudos de Prandtl permitiram compreender que muitos escoamentos viscosos podem ser analisados em duas regiões, uma próxima a superfície delimitadora ou camada limite, onde os efeitos viscosos são de suma importância e a outra que seria a região de corrente livre onde para a maior parte dos problemas os fluidos podem ser tratados como não viscoso (FOX, 2018, p.375).

A camada limite é caracterizada pela região de fluido nas imediações de uma superfície delimitadora, onde os efeitos de difusividade e dissipação de energia mecânica apresentam influência significativa na dinâmica do escoamento (NASA<sup>6</sup>). Essa camada pode ser categorizada em dois principais tipos de escoamentos: Laminar e turbulento, como pode ser visto na Figura 4.

**Figura 4 - Camada limite de um escoamento externo sobre uma placa plana.**



Fonte: Fox (2018, p. 375)

Segundo Fox (2018, p.376), a espessura da camada limite pode ser definida como a distância da superfície na qual a velocidade do escoamento passa a ter magnitude inferior a 99% da velocidade da corrente livre.

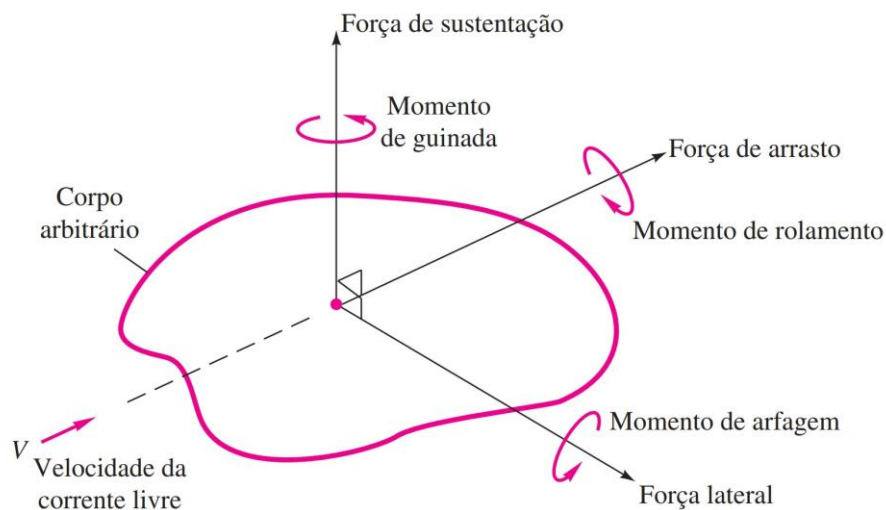
<sup>6</sup> Fonte: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/boundlay.html> (acesso: 11/02/2022 – 13h12)

É de grande importância o controle do comportamento da camada limite para projetos de grande desempenho, pois, a camada limite está diretamente relacionada a espessura efetiva do corpo que por sua vez apresenta influência direta no arrasto do veículo e as forças de cisalhamento geradas na superfície também geram arrasto superficial no corpo.

### 4.3 Arrasto e sustentação

White (2018, p.472) comenta que qualquer corpo, independente do formato, quando imerso em uma corrente de fluido, experimentará forças e momentos oriundos do escoamento. Um corpo de forma e orientações arbitrárias, fará com que o escoamento exerça forças e momentos em relação a todos os três eixos de coordenadas, como mostrado na Figura 5.

**Figura 5 - Definição de forças e momentos sobre um corpo imerso em um escoamento uniforme.**



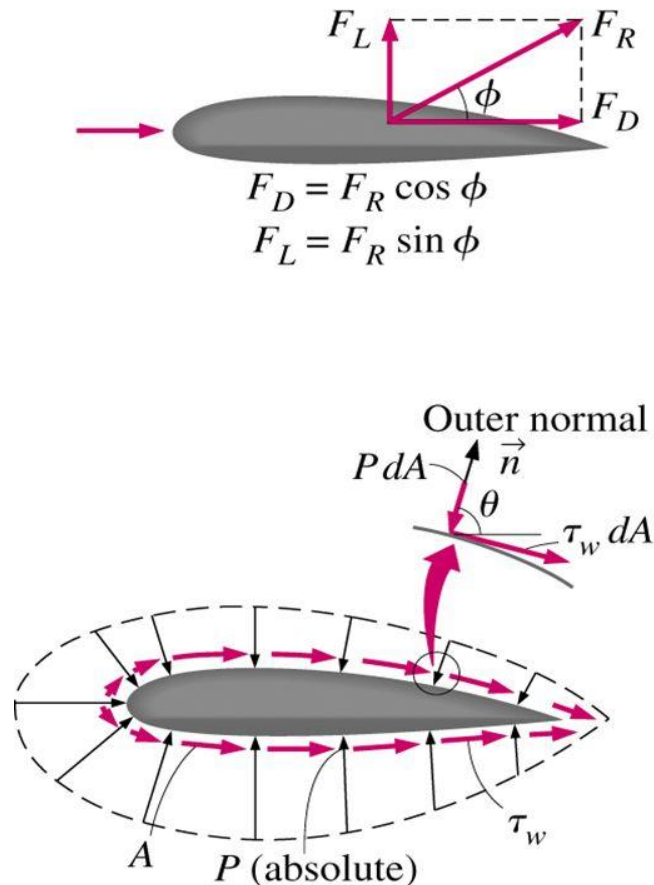
**Fonte: White (2018, p.473)**

Ainda segundo White (2018, p.473), para problemas onde o corpo de estudo possui simetria em relação ao plano de forças de arrasto e sustentação, como ocorre em todos os meios de transporte que conhecemos, o problema se reduz a um caso bidimensional, contendo somente as forças de arrasto e sustentação e o momento que é o de arfagem.

Um fluido em movimento exerce sobre um corpo forças normais a superfície do corpo referentes a pressão e tangenciais a mesma superfície referentes ao cisalhamento. Assim Çengel (2012, p.493) descreve que ao decompor as forças referentes a pressão e cisalhamento em questão, tem-se que na direção normal ao escoamento a força resultante é denominada arrasto e perpendicularmente ao escoamento, a força resultante atuante é conhecida como força de sustentação.

As direções das forças comentadas anteriormente, podem ser visualizadas mais facilmente a partir de uma imagem apresentada por Çengel (2012, p.493), mostrada na Figura 6.

**Figura 6 - As forças de pressão e forças viscosas agindo em um corpo bidimensional e as forças resultantes de sustentação e arrasto.**



Fonte: Çengel (2012, p.493)

A partir deste exemplo de perfil de asa, fica mais clara a visualização das forças de pressão e cisalhamento, assim como fica fácil compreender a direção das forças de arrasto e de sustentação.



As forças de arrasto e sustentação em questão, podem ser obtidas a partir das Eq. (13) e (14).

$$F_d = \int_A dF_d = \int_A (-P \cos \theta + \tau_w \sin \theta) dA \quad (13)$$

$$F_l = \int_A dF_L = - \int_A (P \sin \theta + \tau_w \cos \theta) dA \quad (14)$$

Onde:

$F_d \rightarrow$  Força de arrasto (N)

$F_l \rightarrow$  Força de sustentação (N)

$P \rightarrow$  Pressão absoluta (Pa)

$\tau_w \rightarrow$  Tensão de cisalhamento (Pa)

$A \rightarrow$  Área (m<sup>2</sup>)

Entretanto, há um grau de dificuldade alto nos cálculos das integrais em questão, devido a geometrias e comportamentos tridimensionais complexos, com isso foram formuladas maneiras de obter as forças de arrasto e sustentação a partir da relação com coeficientes adimensionais. As relações obtidas para o cálculo das forças estão descritas pelas Eq. (15) e (16).

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (15)$$

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (16)$$

Onde:

$C_d \rightarrow$  Coeficiente de arrasto

$C_l \rightarrow$  Coeficiente de sustentação

$V \rightarrow$  Velocidade característica do escoamento (m/s)

$A \rightarrow$  Área (m<sup>2</sup>)

Onde a área A utilizada para o cálculo pode ser de três tipos diferentes, sendo esses tipos, a área frontal representada pela vista do corpo a partir da corrente,

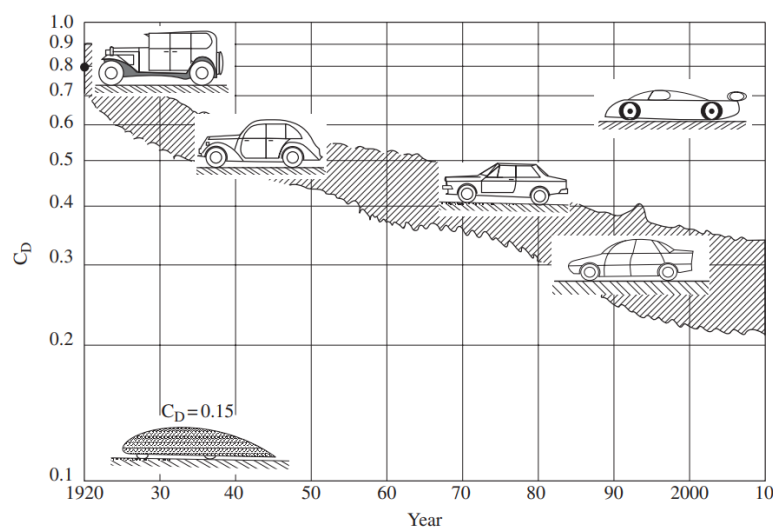
indicada para corpos espessos e robustos. A área planificada, ou seja, a área vista de cima, adequada para corpos largos e achatados. Ou a área molhada, caracterizada pela área onde o fluido escoar, comumente utilizada para veículos aquáticos (WHITE, 2018, p.474).

## 5 AERODINÂMICA VEICULAR

O setor automobilístico sempre fomentou as pesquisas científicas atreladas ao desenvolvimento de novas tecnologias, visando manter seus veículos de competição no topo, seja, em melhorias relacionadas ao desempenho dos motores, ou melhorias nos materiais a fim de diminuir peso, otimização em perfis aerodinâmicos, e vários outros pontos. E devido a preocupações relacionadas com fatores ambientais, a indústria automotiva de veículos urbanos tem se preocupado cada vez mais com a eficiência dos veículos, com a intenção de minimizar a poluição gerada pelos mesmos. Hucho (1987, p.295) comenta que o aumento da eficiência aerodinâmica é um ótimo ponto de estudos e está se tornando cada vez mais necessária, destacando os veículos interurbanos de alta velocidade como vans e ônibus, afim diminuir o consumo de combustível dos mesmos.

Katz (2016, p.8) comenta que desde a década de 1920 os engenheiros já tinham conhecimento de formas aerodinâmicas com baixo coeficiente de arrasto, porém, os projetos de carrocerias automotivas da época possuíam grande influência artística em seu desenvolvimento, limitando a otimização da aerodinâmica veicular. A representação esquemática da Figura 7 demonstra de maneira simples a evolução da aerodinâmica com o passar do tempo.

**Figura 7 - Representação esquemática das tendências históricas de coeficiente de arrasto dos veículos de passeio.**



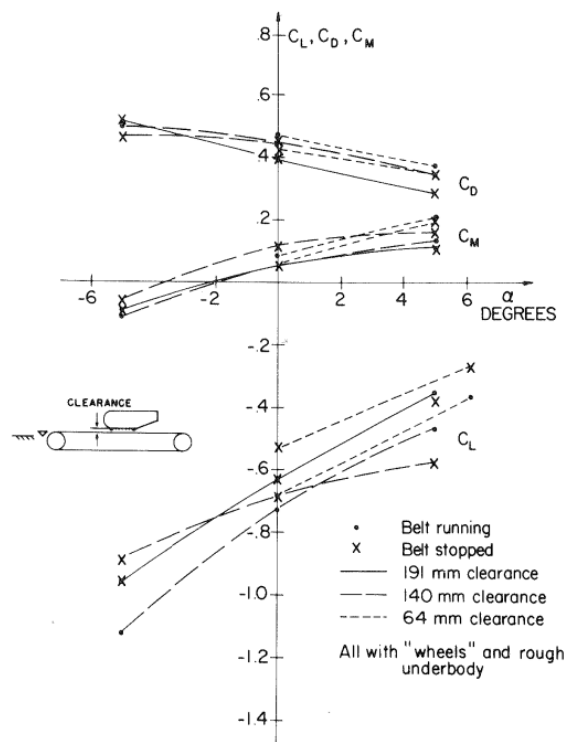
Fonte: Katz (2016, p.7).

O autor também faz uma observação muito importante do veículo esportivo posicionado no canto superior direito da Figura 7. O veículo em questão possui um coeficiente de arrasto próximo ao da maioria dos carros de corrida modernos, o que aparentemente é contraditório comparado aos carros de passeio, porém, essa forma de arrasto maior se deve ao fato de a engenharia automobilística buscar uma ótima combinação entre o baixo arrasto e o *downforce*.

### 5.1 O efeito solo

Talvez o mais elaborado estudo do efeito solo em automóveis tenha sido efetuado por Albert George no ano de 1981, onde o autor efetuou análises do comportamento dos coeficientes de arrasto, sustentação e o momento de arfagem com a variação da altura do veículo em relação ao solo. Os resultados desses testes são apresentados na Figura 8.

**Figura 8 - Comportamento dos coeficientes de arrasto, sustentação e arfagem devido a variação da altura do veículo em relação ao solo.**



Fonte: Adaptado de George (1981).

Nesse experimento, Albert George utilizou um corpo com saída inferior de  $20^\circ$ , e foi variando tanto a altura do corpo, quanto o ângulo de inclinação ( $\alpha$ ) do mesmo em relação ao solo, registrando assim a variação dos coeficientes a cada um dos testes. Além disso, foram executados testes com a esteira parada e em movimento, tornando o estudo mais completo. E a partir dos experimentos, George chegou à conclusão de que diminuir a altura dos automóveis proporciona um aumento no arrasto e sustentação do veículo.

Segundo Katz (2016, p.264) o efeito solo foi observado no início do século XX durante a decolagem e pouso, quando os aviões voando perto do solo experimentaram um aumento de sustentação. O autor também comenta que fluxo sobre um corpo mudará quando ele estiver próximo a uma superfície limitante, e no caso dos veículos terrestres torna-se inevitável que os mesmos se mantenham bem próximos ao solo.

## 5.2 Pontos de pressão

No tópico sobre arrasto e sustentação, foi comentado que parte da força de arrasto e sustentação, se deve ao fato da força de pressão ser imposta ao corpo em deslocamento. Essa força de pressão atua perpendicularmente à superfície e influencia de maneira negativa a eficiência aerodinâmica do veículo com relação ao arrasto.

White (2018, p.474), comenta que a contribuição de arrasto de atrito e de pressão dependem da forma do corpo, principalmente da espessura do mesmo. O arrasto de pressão tem grande influência principalmente em regiões do corpo, perpendiculares ao escoamento.

Partindo da equação e Bernoulli, é possível obter um parâmetro adimensional para medir a influência da pressão, denominado coeficiente de pressão, e diferente dos outros coeficientes relacionados ao estudo da aerodinâmica, o coeficiente de pressão independe da velocidade do escoamento, levando em consideração apenas a velocidade de referência. Esse coeficiente é apresentado por White (2018, p.474), e está descrito pela Equação (17).

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (17)$$

Onde:

$C_p$  → Coeficiente de pressão

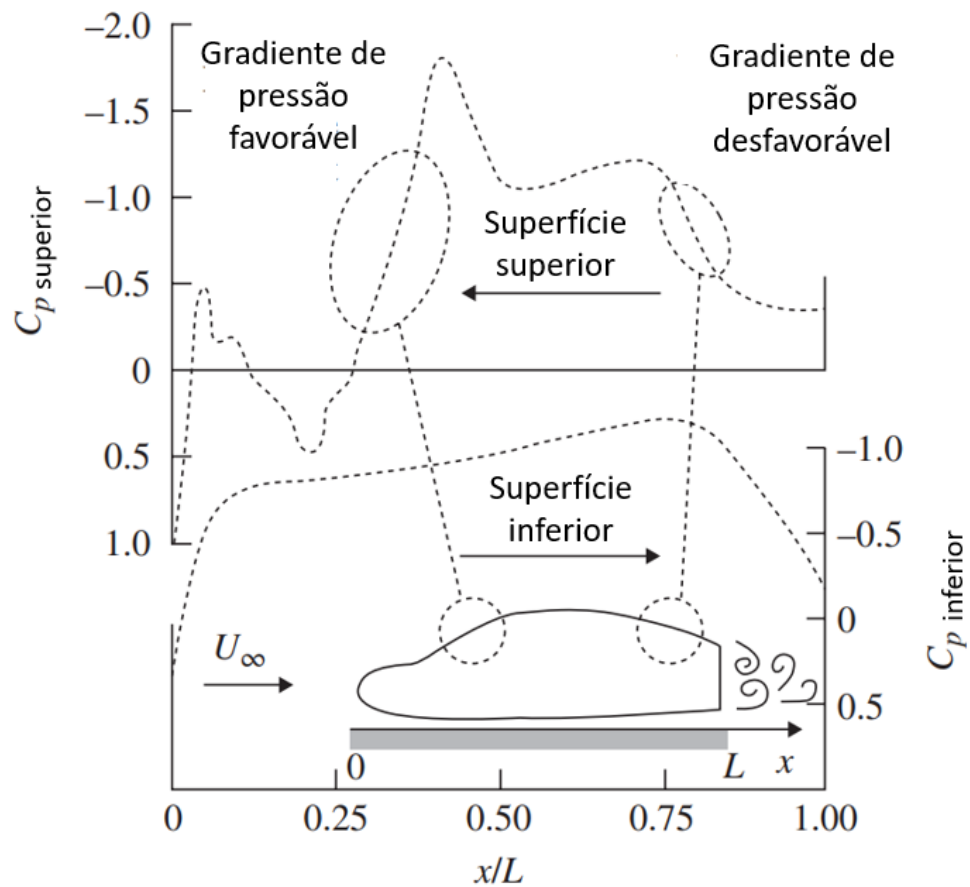
$P$  → Pressão absoluta (kPa)

$P_\infty$  → Pressão ambiente (kPa)

$V$  → Velocidade de referência (m/s)

Segundo Katz (2016, p.211), superfícies côncavas promovem uma diminuição no coeficiente de pressão, e superfícies convexas apresentam um coeficiente de pressão mais elevado. Isso fica evidente no gráfico da Figura 9, demonstrando a distribuição de pressão ao longo da carenagem simplificada de um automóvel.

Figura 9 - Distribuição de pressão bidimensional ao longo do perfil de um automóvel.

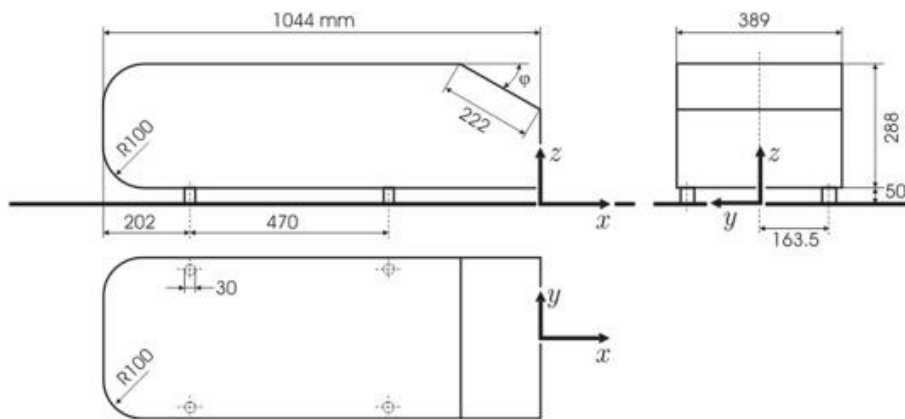


Fonte: Katz (2016, p.211).

### 5.3 O Corpo de Ahmed

Com o crescimento da necessidade por estudos aerodinâmicos tanto para veículos de corrida, quanto para veículos urbanos, em 1984 Ahmed, Ramm e Faltin propõem em seu trabalho *Some Salient Features of The Time – Averaged Ground Vehicle Wake* o estudo da característica do escoamento e do coeficiente de arrasto, ao variar o ângulo de saída de um determinado corpo veicular. A geometria do corpo utilizado para o estudo é apresentada na Figura 10.

**Figura 10 - Detalhamento da geometria utilizada no estudo de Ahmed.**



**Fonte: Ahmed (1984).**

A geometria, hoje conhecida como Corpo de Ahmed, apresenta características básicas que determinam a forma, comprimento e posição da zona de separação do escoamento.

O corpo de Ahmed tem grande valor científico para a indústria automotiva, pois, é utilizado como validação para projetos conceituais, verificação de modelos de turbulência e até mesmo para calibração de túneis de vento. A importância que a geometria possui, é em grande parte, devido ao fato de muitos estudos posteriores relacionados a esse corpo terem sido feitos, o que proporcionou um alto nível de confiabilidade e variedade de resultados atrelados ao mesmo.

### 5.4 Protótipos para competições de eficiência energética

A aerodinâmica para os protótipos de eficiência energética segue os mesmos princípios que os empregados em veículo de passeio, porém, tendo os efeitos

reduzidos levando em consideração as baixas velocidades empregadas pelos protótipos em questão. Porém, uma menor influência dos esforços sobre essa categoria de veículos não torna irrelevante os estudos de aerodinâmica aplicados, pois, para este tipo de competição cada pequena melhoria empregada gera ganhos significativos.

O fator de maior importância relacionado a aerodinâmica desses veículos é o coeficiente de arrasto, uma vez que, a diminuição do arrasto está diretamente ligada com a economia de combustível desejada. Já o efeito da sustentação não é relevante segundo Hucho (1987, p.3), para um veículo com velocidade inferior a 100 quilômetros por hora, a sustentação apresenta pouca influência sobre o mesmo, mesmo em situações de contravento. O autor também comenta que o arrasto é pouco afetado por esses fatores a baixas velocidades.

Outro ponto importante para o projeto da carroceria desses veículos é relacionado aos meios de fabricação mecânica empregados pelos integrantes das equipes, o perfil definido para a construção deve levar em conta o chassi que a equipe tem possibilidade de construir, a posição do motor e a direção utilizada.

Afim de se ter uma noção do coeficiente de arrasto dos protótipos de eficiência energética de alto desempenho, Sush (2018) apresenta em seu trabalho de conclusão de curso alguns modelos juntamente com os respectivos coeficientes de arrasto, que estão contidos na Figura 11.



Figura 11 - Protótipos de eficiência energética com elevado desempenho aerodinâmico.



Protótipo estadunidense - BYU Supermileage |  $C_d = 0,107$



Protótipo polonês – EcoArrow II |  $C_d = 0,096$



Protótipo alemão – PAC-CAR II |  $C_d = 0,075$

Fonte: Adaptado de Such (2018, p.22).

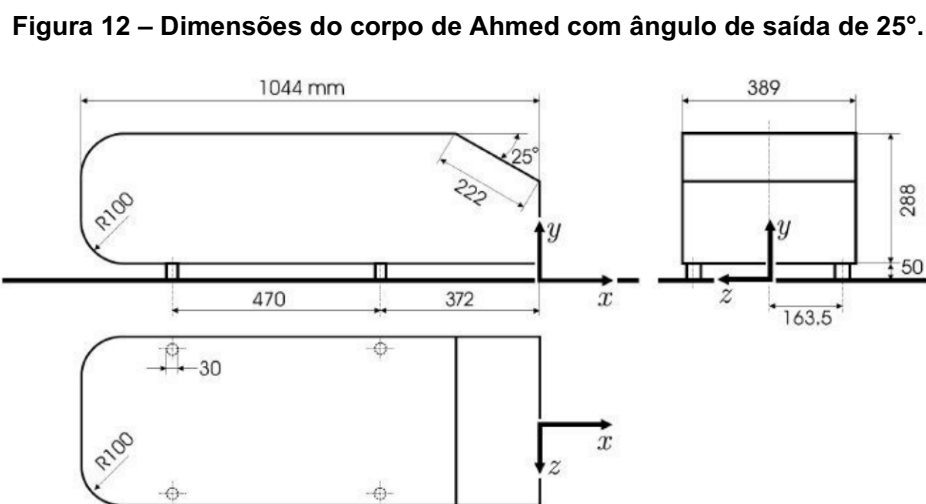
## 6 VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL

Em primeiro momento foi necessário efetuar a validação computacional da malha e do modelo de turbulência, para que fosse possível garantir a qualidade e veracidade dos resultados das simulações do protótipo atual da equipe Tuba Turbo e também da simulação relativa a nova proposta de perfil aerodinâmico. Foi definido a utilização de um plano central de simetria no domínio computacional para que as simulações apresentassem um menor custo computacional.

A técnica de validação escolhida foi a de simulação computacional do corpo de Ahmed, e comparação dos resultados obtidos com o de outros trabalhos existentes, estratégia semelhante à utilizada por Tonet (2019) e Ferrari (2019) em seus trabalhos de conclusão de curso.

### 6.1 Simulação computacional do corpo de ahmed

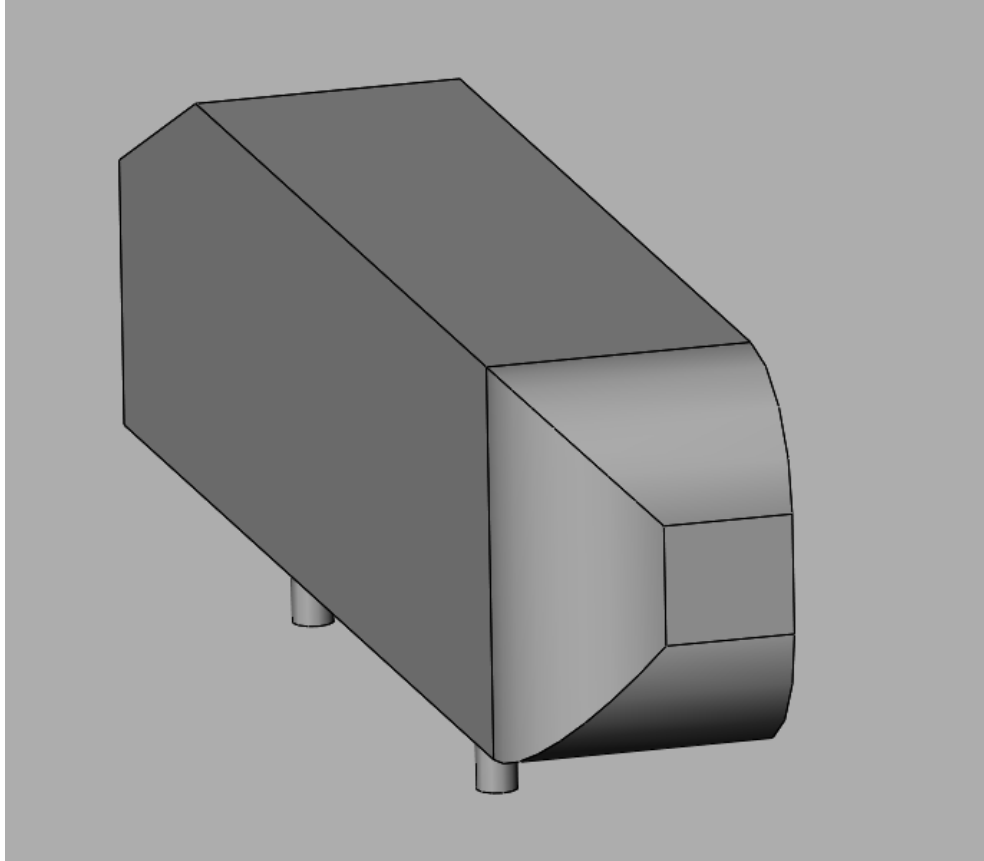
A primeira etapa necessária para a validação foi a de modelagem tridimensional do corpo de Ahmed via SolidWorks. As dimensões da geometria selecionada estão contidas na Figura 12.



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

Com a utilização de simetria para o domínio computacional, foi necessário a construir somente metade da geometria do corpo de Ahmed. A modelagem efetuada está apresentada na Figura 13.

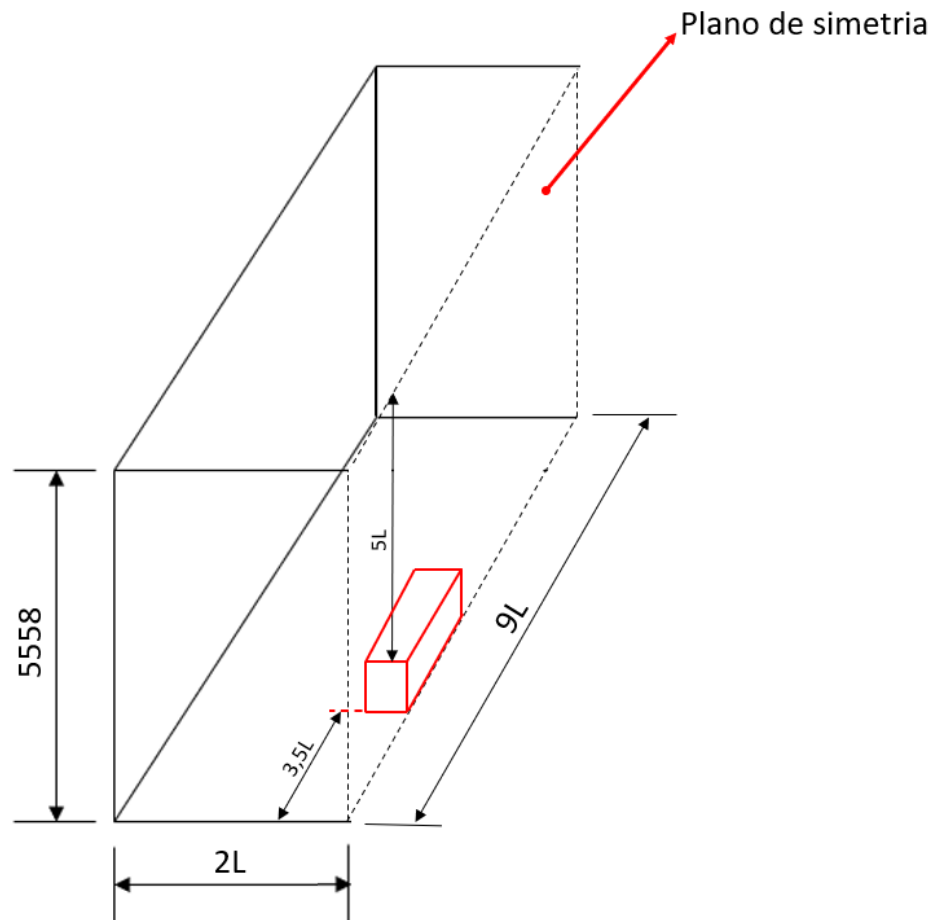
**Figura 13 - Modelo do corpo de Ahmed construído no SolidWorks.**



**Fonte: Autoria própria.**

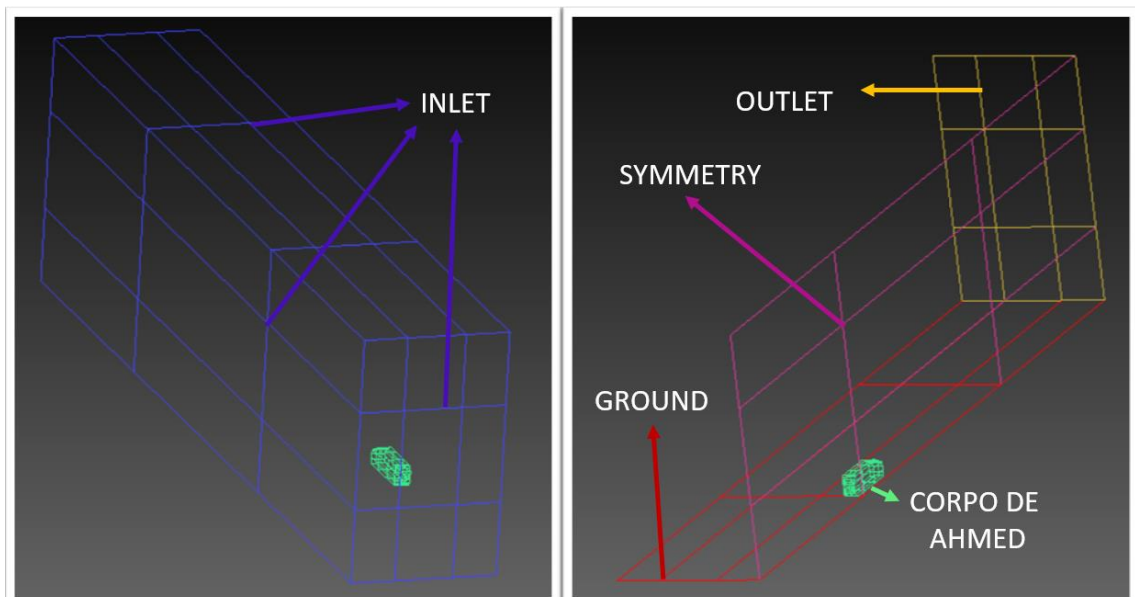
Após a modelagem da geometria apresentada anteriormente, foi possível dar início à construção do domínio computacional. As dimensões do domínio computacional utilizado neste trabalho são similares as utilizadas por Korkischko (2006) e Ferrari (2019). As Figuras 14 e 15 apresentam respectivamente um esboço do domínio utilizado para a simulação de validação e uma imagem retirada do ICFM CFD demonstrando as faces do domínio computacional.

Figura 14 - Esboço do volume de controle construído para validação computacional.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Faces do domínio computacional de validação efetuado no ICFM CFD.

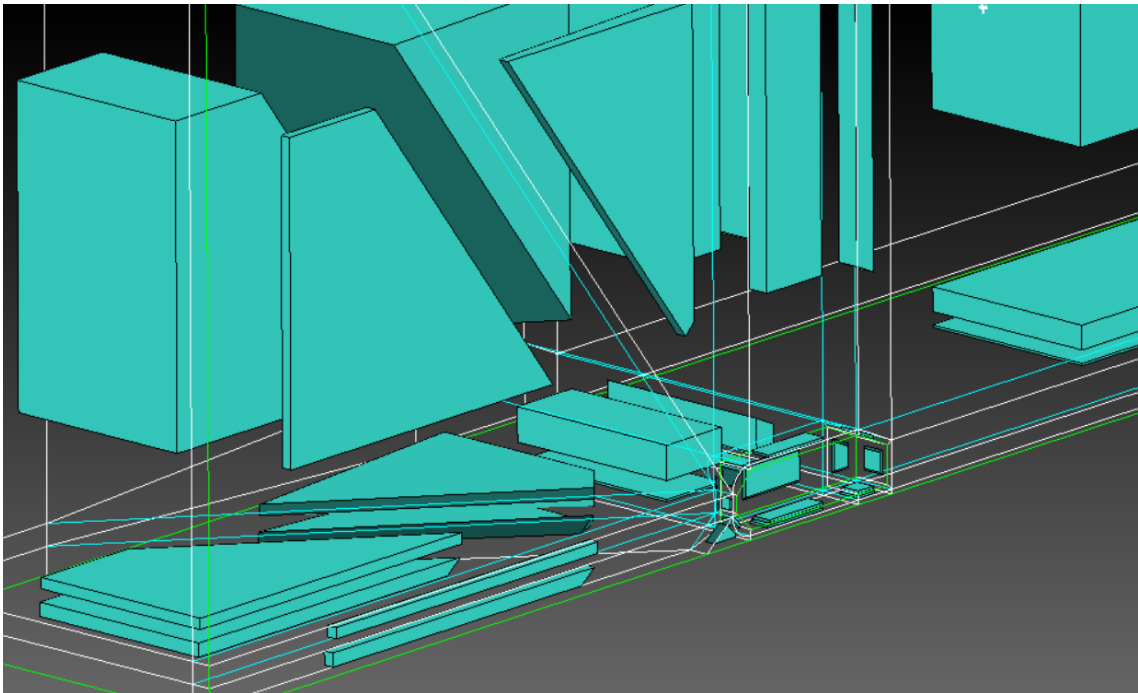


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 15 são apresentadas as seis faces que compõem o volume de controle, sendo elas, as faces azuis que representam as entradas do escoamento de ar para o interior do volume de controle, nomeadas neste trabalho como INLET. A face em rosa definida como o plano de simetria do domínio computacional e nomeada como SYMMETRY. Já o solo foi representado pela face vermelha e foi nomeada como GROUND. E por fim, a saída do volume de controle representada pela face amarela e dado o nome de OUTLET.

Para a geração de malha, foi utilizada a técnica de blocagem manual, o que possibilitou ter melhor controle dos parâmetros relativos à qualidade da malha construída, como por exemplo o ângulo mínimo dos elementos de malha, razão de aspecto, o determinante  $3 \times 3 \times 3$ . Além disto, também foi possível definir os locais de interesse e a dimensão dos elementos nestas regiões com maior precisão. A blocagem manual pode ser visualizada a partir da Figura 16.

**Figura 16 - Blocagem manual efetuada para geração de malha do Corpo de Ahmed.**



**Fonte: Autoria própria.**

Foram construídas três malhas com quantidade de elementos distintas, para que fosse possível comparar os resultados das mesmas com a de outros trabalhos e selecionar a malha com o melhor custo/benefício considerando os resultados obtidos e o custo computacional necessário para a simulação. Os principais parâmetros das malhas mencionadas estão descritos na Tabela 1.

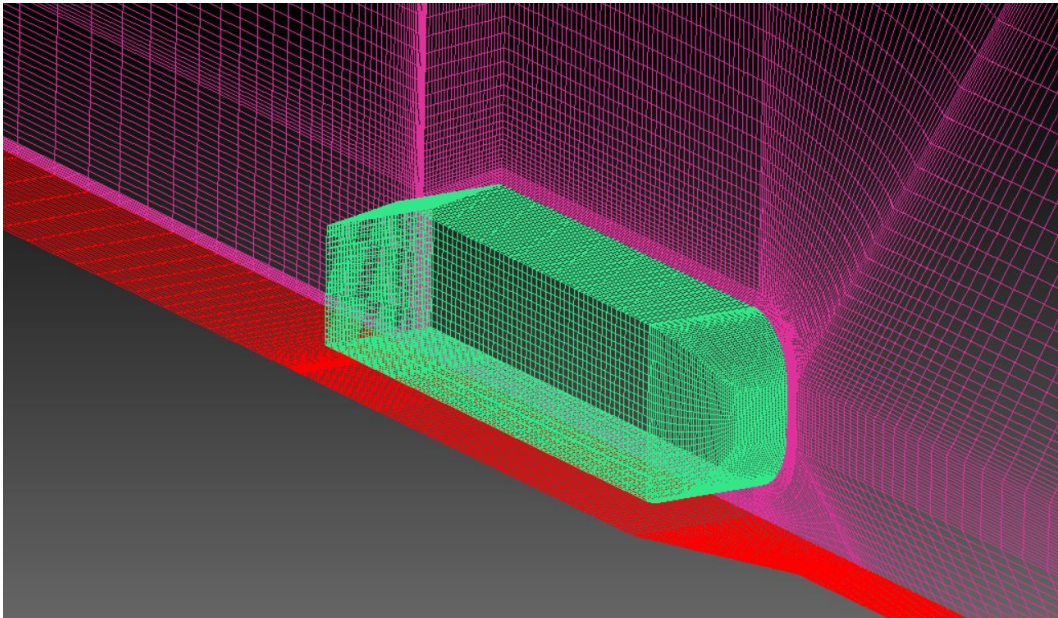
**Tabela 1 - Dados referente as malhas de validação computacional.**

Malha	Quantidade de elementos	Determinante 3x3x3 mínimo	Ângulo mínimo	Razão de aspecto máxima
1	500094	0,673	37,5°	241
2	1016865	0,715	37,5°	300
3	2020413	0,819	37,5°	82,9

**Fonte: Autoria própria.**

Alguns elementos de malha próximo ao Corpo de Ahmed da malha de dois milhões de elementos podem ser visualizados na Figura 17.

**Figura 17 - Elementos na superfície do Corpo de Ahmed da malha de dois milhões de elementos.**



**Fonte: Autoria própria.**

Após construção das malhas, foi possível efetuar a configuração dos parâmetros das simulações a partir do *software* OpenFOAM via WSL (*Windows subsystem for Linux*, um emulador do sistema operacional Ubuntu a partir do Windows). O *solver* utilizado foi o GAMG com tolerância de  $10^{-8}$ . O modelo de turbulência escolhido foi o  $\kappa - \omega$  SST por ser capaz de capturar zonas de recirculação com precisão. O fluido utilizado foi o ar na temperatura de 20°C à 1 atm. A velocidade do escoamento de ar nas entradas do domínio (INLET), foi definida como tendo direção normal a face de saída (OUTLET) e módulo igual a 40m/s. O parâmetro de controle na saída do domínio (OUTLET) foi o de gradiente de pressão nulo. E o solo (GROUND) foi configurado com condição de contorno de parede sem deslizamento.

O critério de convergência definido foi o de valores residuais menores que  $10^{-6}$  ou 2000 iterações. Em todas as simulações foi adotado o regime permanente por necessitar de um menor custo computacional. A rugosidade da geometria para todos os casos foi desconsiderada.

A partir das simulações foi possível obter os valores de coeficientes de arrasto e sustentação do corpo de Ahmed como apresentado na Tabela 2. O tempo de execução necessário em cada uma das simulações também apresentado para possibilitar uma análise de custo/benefício do refino da malha.

**Tabela 2 – Coeficientes de arrasto e sustentação referentes as simulações de validação.**

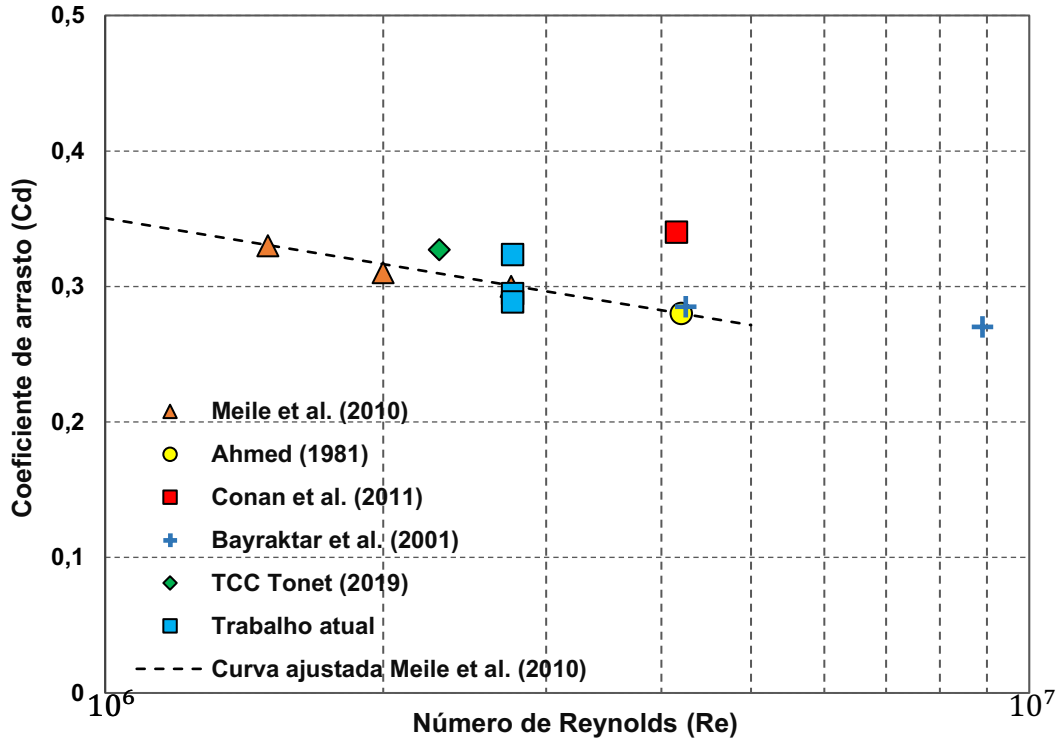
Malha	Quantidade de elementos	Coeficiente de arrasto	Coeficiente de sustentação	Tempo de execução (seg.)	Número de Reynolds
1	500094	0,3236	0,3330	6664,67	2,76E+06
2	1016865	0,2948	0,2792	14911,30	
3	2020413	0,2885	0,3362	21713,05	

**Fonte: Autoria própria.**

## **6.2 Comparação dos resultados com outros trabalhos**

Foi possível construir um gráfico comparativo entre os resultados das simulações efetuadas no trabalho atual com a de outros trabalhos e artigos, afim de verificar a qualidade dos resultados obtidos.

Gráfico 1 - Comparação entre os coeficientes de arrasto teórico de diversos trabalhos.



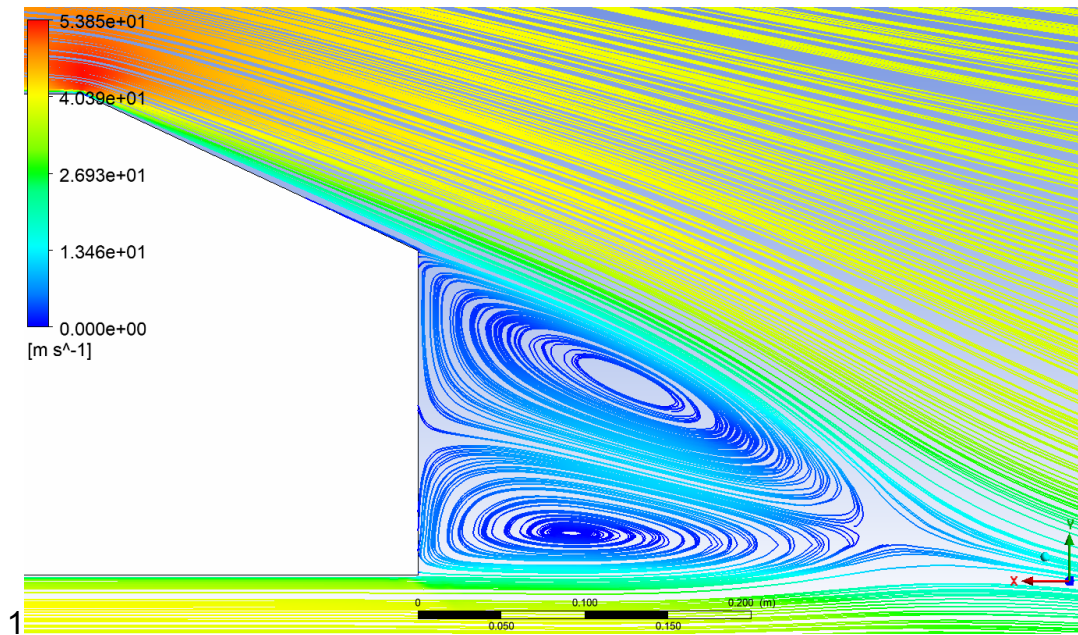
Fonte: Adaptado de R. Zamolo, E. Nobile (2017).

Analisando o Gráfico 1, foi possível afirmar que os valores de coeficiente de arrasto obtidos pelas simulações da malha com um milhão de elementos e dois milhões de elementos estão próximos aos de uma curva ajustada com os resultados obtidos por Meile et al. (2010), curva que também contempla o resultado obtido por Ahmed (1984). A partir destas comparações foi possível definir a malha de dois milhões de elementos como padrão para a efetuação das simulações posteriores por apresentar um ótimo resultado e um tempo de execução bom em comparação com a malha de um milhão de elementos.

Como forma de afirmar a qualidade dos resultados obtidos, foi possível efetuar uma comparação qualitativa entre as linhas de correntes de outros trabalhos com as obtidas no trabalho atual para a malha definida como padrão.

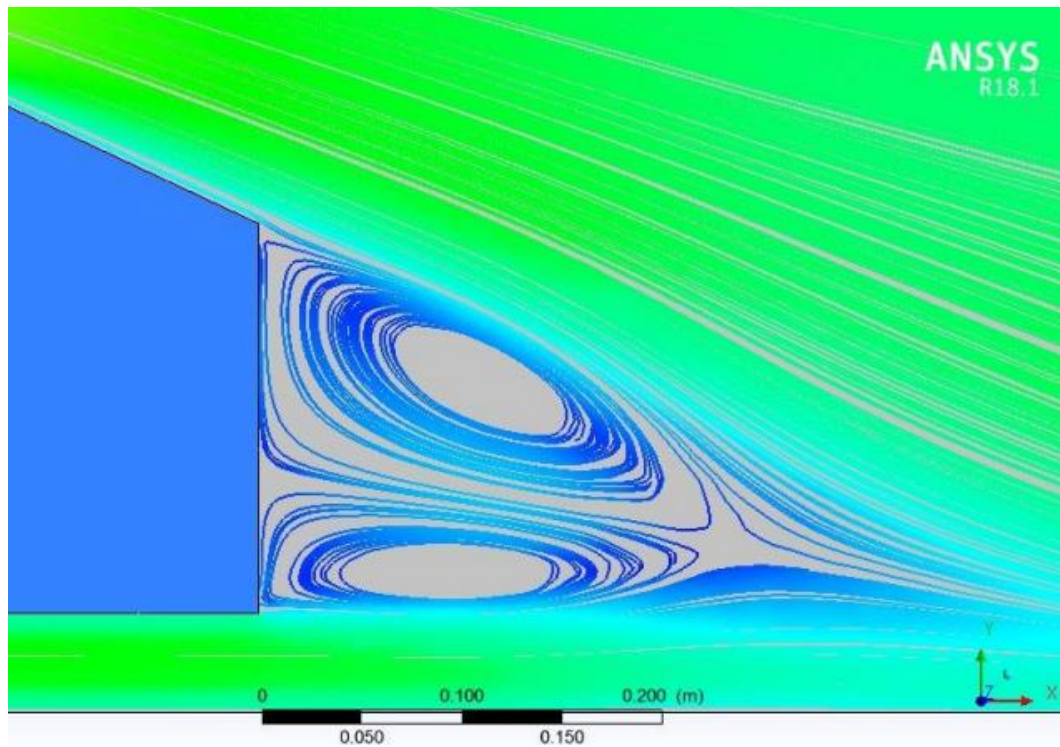


Figura 18 – Linhas de corrente de velocidade em x com foco na recirculação traseira formada no corpo de Ahmed da simulação com dois milhões de elementos do presente trabalho.



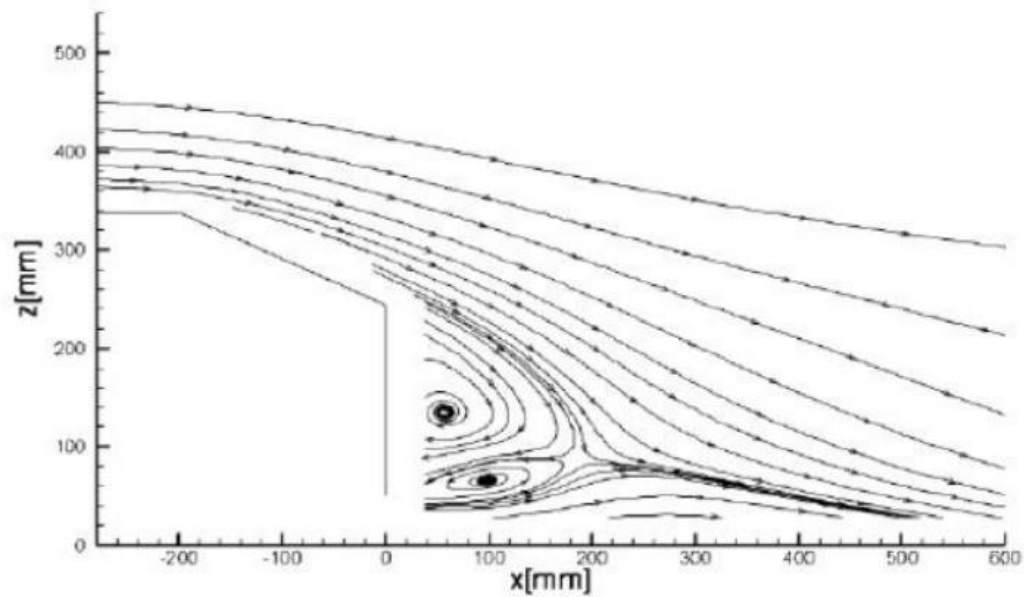
Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - Linhas de corrente com foco na recirculação traseira do corpo de Ahmed a partir da simulação efetuada por Tonet via ANSYS Fluent.



Fonte: Adaptado de Tonet (2019).

Figura 20 - Esboço das linhas de corrente com foco na recirculação efetuadas por Lienhart et al.

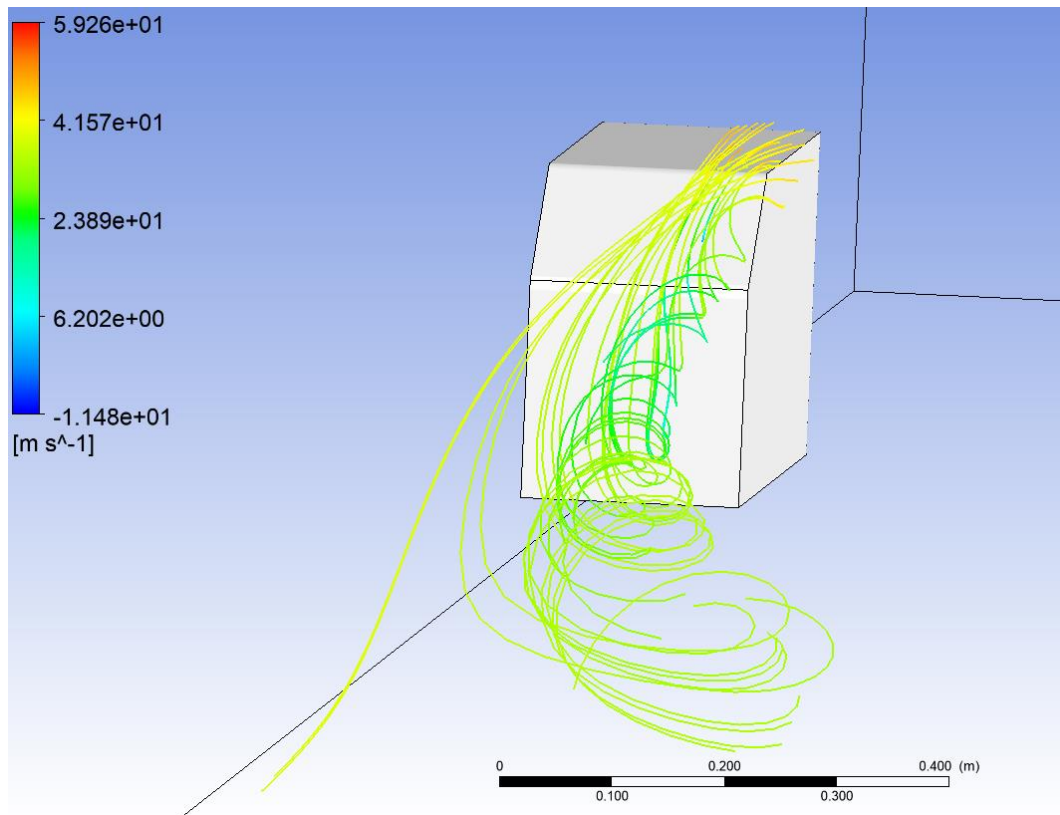


Fonte: Lienhart et al. (2002).

Ao comparar-se a Figura 18 com as Figuras 19 e 20, pode-se notar que a recirculação obtida apresenta características semelhantes à dos outros autores e estão localizadas em regiões próximas, também é possível observar que o comprimento do final do corpo até o retorno do fluxo ao estado laminar está bem próximo ao dos outros trabalhos.

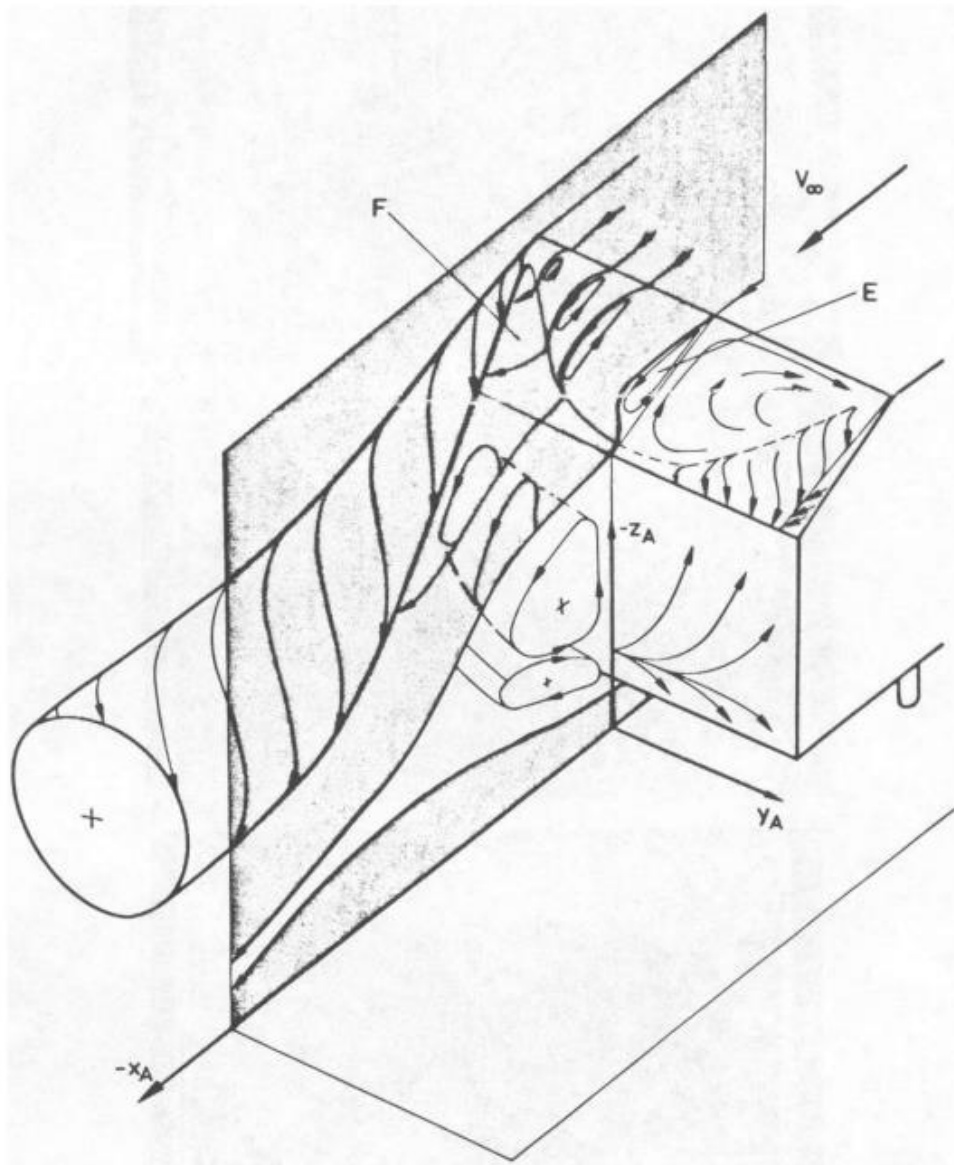
Os vórtices formados a partir do ângulo de saída do corpo de Ahmed também foram avaliados como apresentado na Figura 21 e comparado com esboço da Figura 22, presente no artigo de Ahmed (1984).

**Figura 21 - Vórtice formado na saída traseira do corpo de Ahmed da simulação de dois milhões de elementos do presente trabalho.**



**Fonte: Autoria própria.**

Figura 22 - Esboço do vórtice e recirculações apresentados por Ahmed et al. em seu artigo.



Fonte: Ahmed (1984).

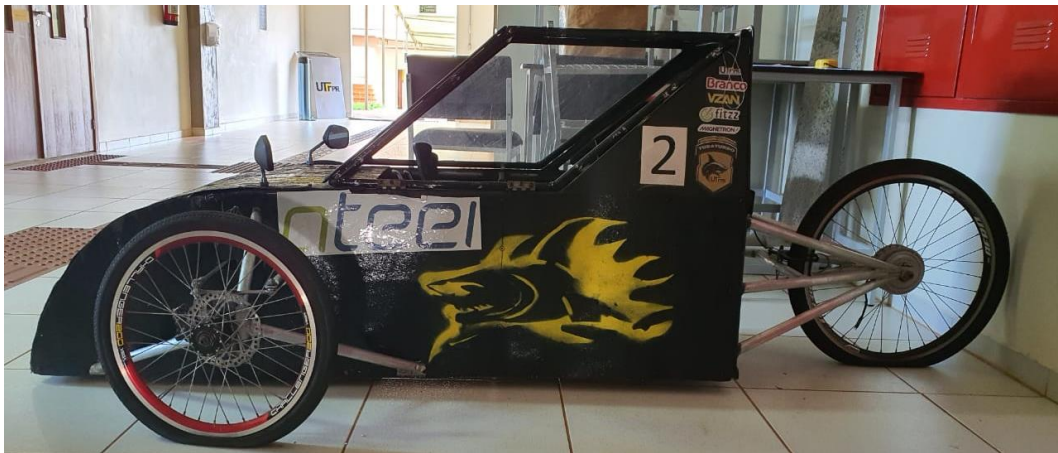
Pode-se observar que o vórtice obtido no presente trabalho possui grande semelhança com o esboço apresentado por Ahmed (1984), pois, o vórtice se inicia em um ponto bem próximo ao do esboço e tende a aumentar de dimensões formando uma geometria aproximada a de um cone, nota-se também que o sentido de giro do vórtice apresentado na Figura 21 é oposto ao sentido do apresentado na figura 22, o que é esperado já que o vórtice retirado a partir da simulação do presente trabalho é espelhado ao apresentado por Ahmed (1984).



## 7 PROTÓTIPO ATUAL DA EQUIPE TUBA TURBO

O protótipo que a equipe Tuba Turbo possui atualmente foi construído no ano de 2019, e utilizado para a competição de eficiência energética da Inventum que ocorreu em novembro do mesmo ano. O protótipo em questão está apresentado nas Figuras 23 e 24.

**Figura 23 - Foto lateral do protótipo atual da Equipe Tuba Turbo.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 24 - Foto em perspectiva do protótipo atual da Equipe Tuba Turbo.**

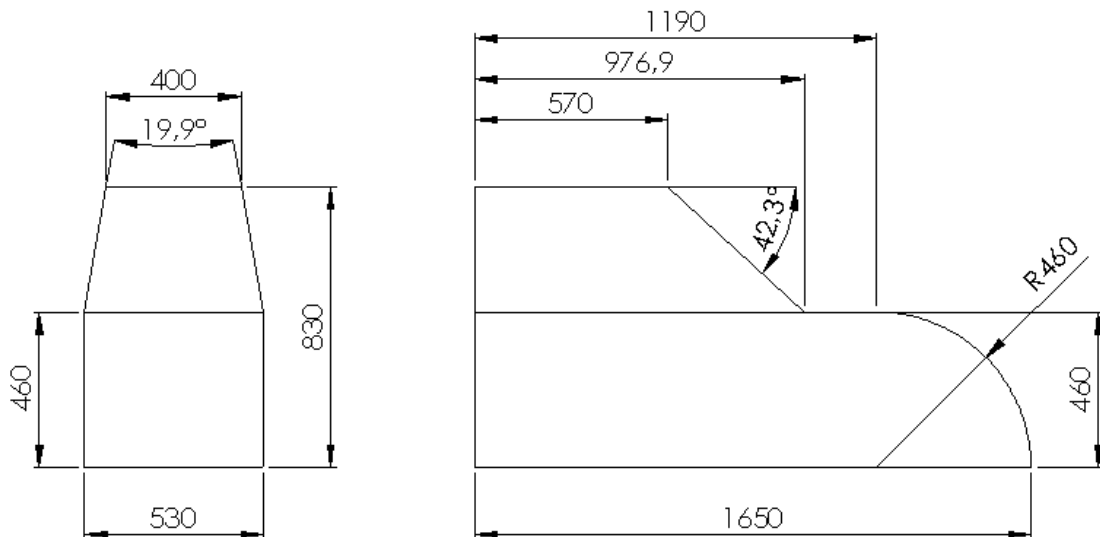


Fonte: Autoria própria.

## 7.1 Simulação da carenagem do protótipo atual

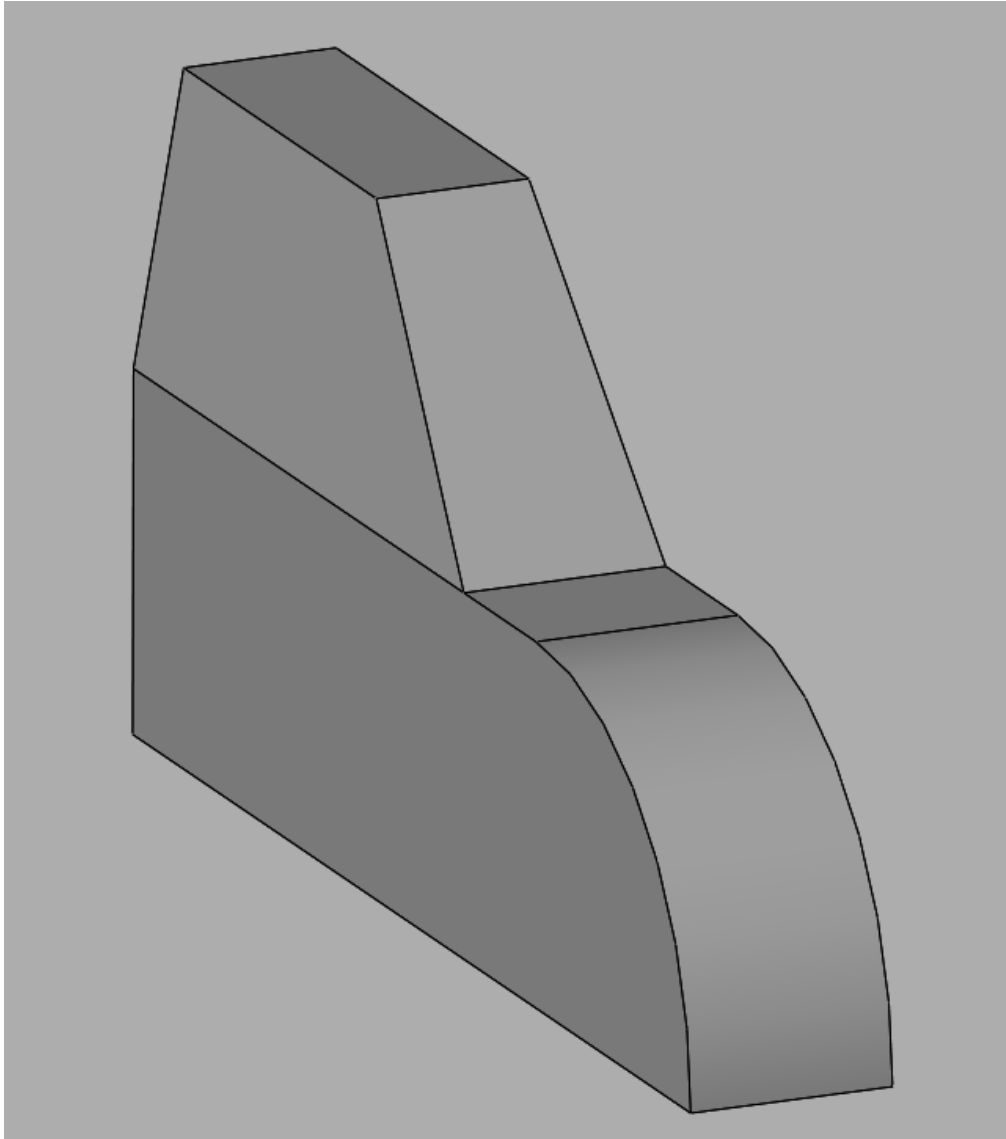
A primeira etapa necessária para a análise fluidodinâmica do protótipo foi a de modelagem tridimensional utilizando o *software* SolidWorks, o veículo real foi medido com o auxílio de uma trena e as medidas obtidas foram utilizadas para a confecção da geometria. Como forma de minimizar a complexidade da simulação, as rodas, as estruturas de fixação das mesmas e os retrovisores foram desconsiderados no modelo tridimensional construído. As dimensões da carenagem estão apresentadas na figura 25 e o modelo confeccionado pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 25 - Dimensões da carenagem do protótipo atual.



Fonte: Autoria própria.

**Figura 26 - Modelo tridimensional simplificado do protótipo atual.**



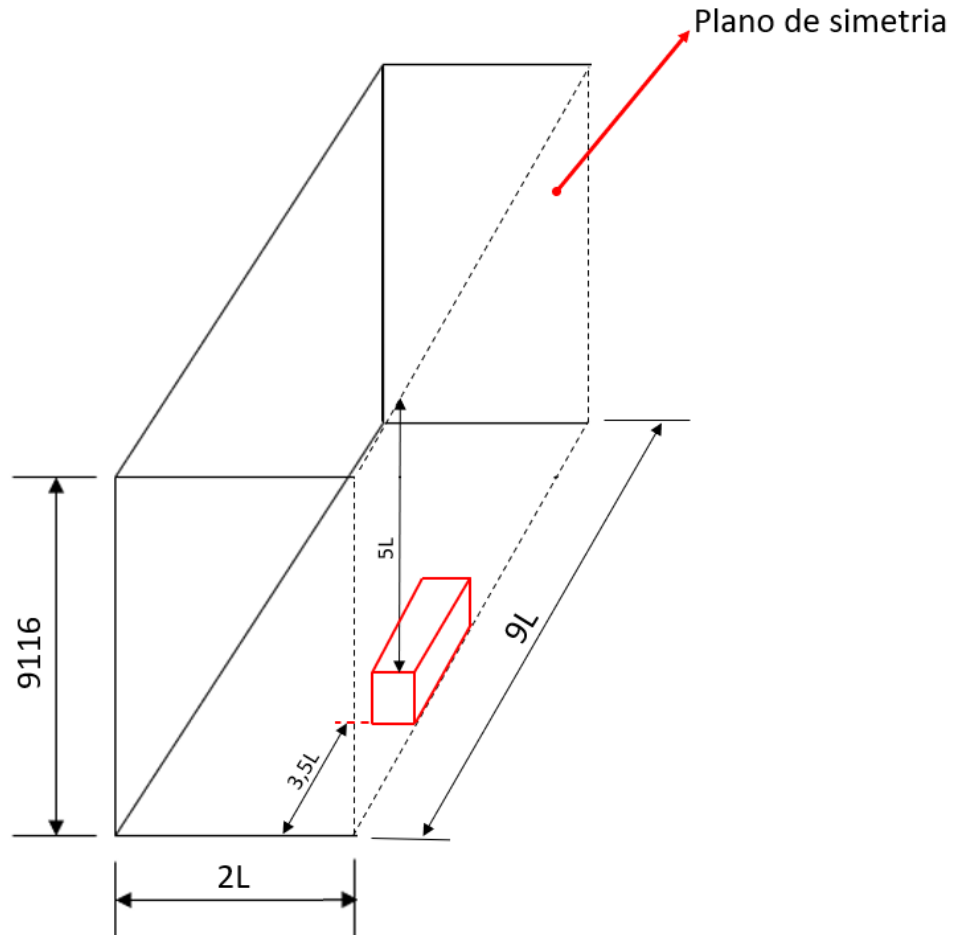
**Fonte: Autoria própria.**

Foi possível notar que o modelo simplificado engloba somente a região carenada do veículo, e que somente metade do modelo foi construído devido ao fato da simulação ser executada utilizando a condição de simetria central do volume de controle a fim de diminuir o custo computacional. A altura do protótipo em relação ao solo é de 36 milímetros.

Após construção do modelo, foi possível dar início à construção do domínio computacional. As dimensões do domínio computacional utilizado na simulação foram proporcionais as validadas no tópico 6 do presente trabalho. As Figuras 27 e 28 apresentam respectivamente um esboço do domínio utilizado para a simulação do

protótipo atual e uma imagem retirada do Icem CFD demonstrando as faces do domínio computacional.

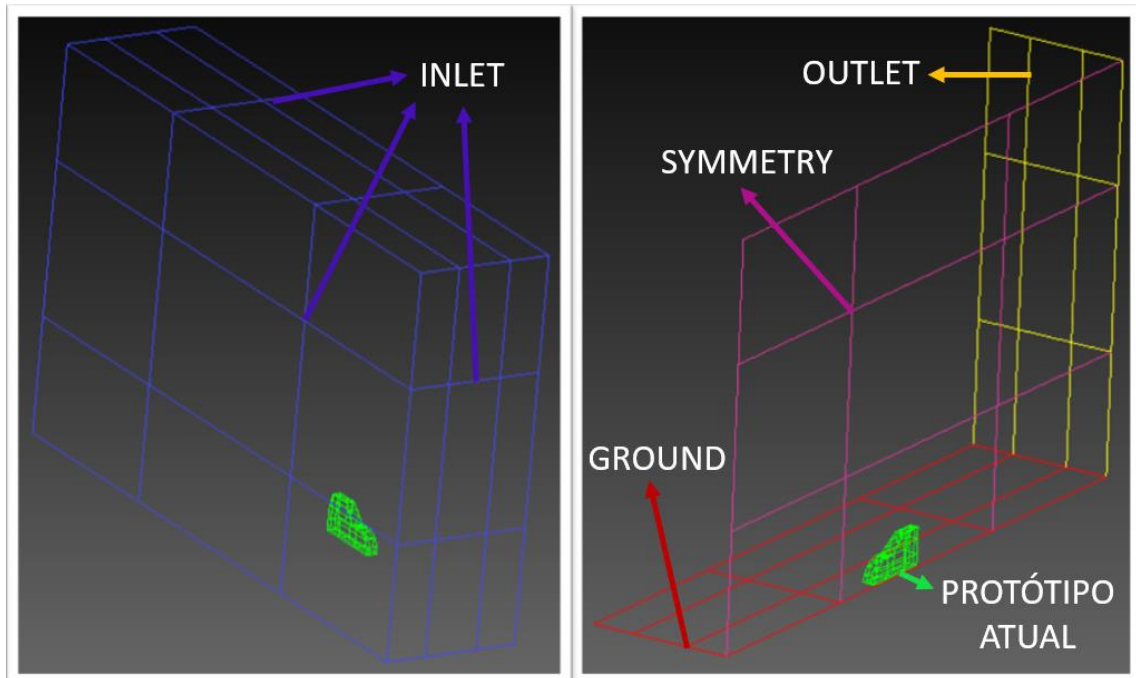
**Figura 27 - Esboço do volume de controle construído para simulação do protótipo atual.**



Fonte: Autoria própria.



Figura 28 - Faces do domínio computacional do protótipo atual efetuado no Icem CFD.

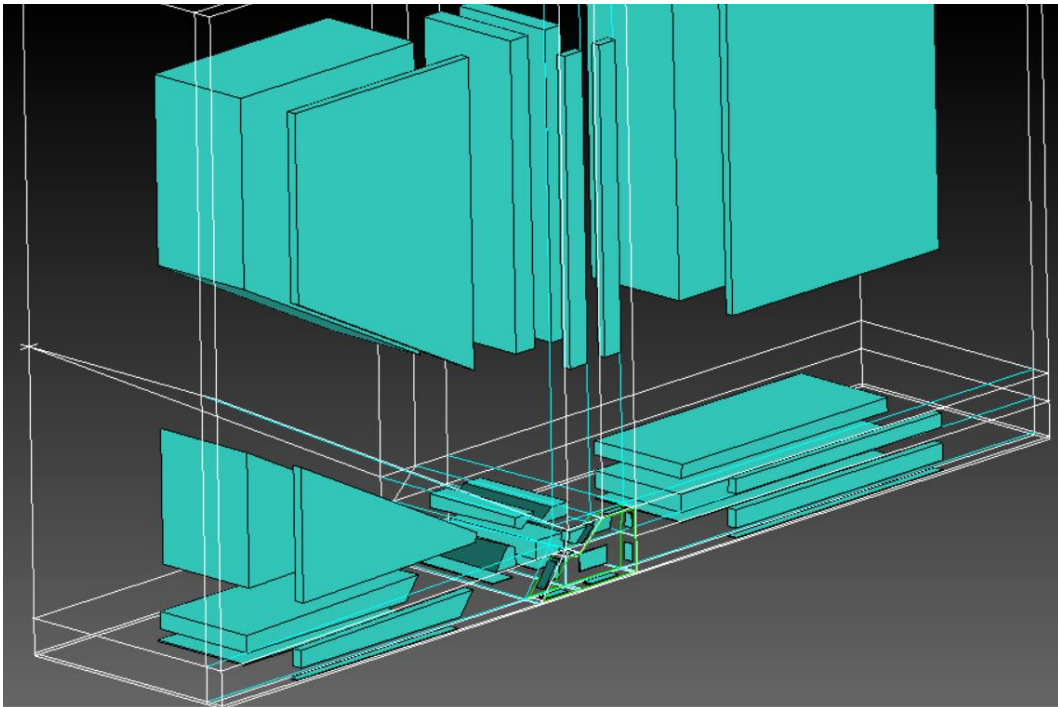


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 26 são apresentadas as seis faces que compõem o volume de controle, sendo elas, as faces azuis que representam as entradas do escoamento de ar para o interior do volume de controle, nomeadas neste trabalho como INLET. A face em rosa definida como o plano de simetria do domínio computacional e nomeada como SYMMETRY. Já o solo foi representado pela face vermelha e foi nomeada como GROUND. E por fim, a saída do volume de controle representada pela face amarela e dado o nome de OUTLET.

A malha foi construída pela técnica de blocagem manual já validada no tópico 6 deste trabalho, controlando os parâmetros relativos à qualidade da mesma. A blocagem manual pode ser visualizada a partir da Figura 29.

**Figura 29 - Blocação manual efetuada para geração de malha do protótipo atual.**



**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se notar que a estratégia de divisão dos blocos e a geometria dos blocos foram semelhantes as validada na simulação do corpo de Ahmed.

Na Tabela 3 estão apresentadas as principais informações referentes a malha gerada.

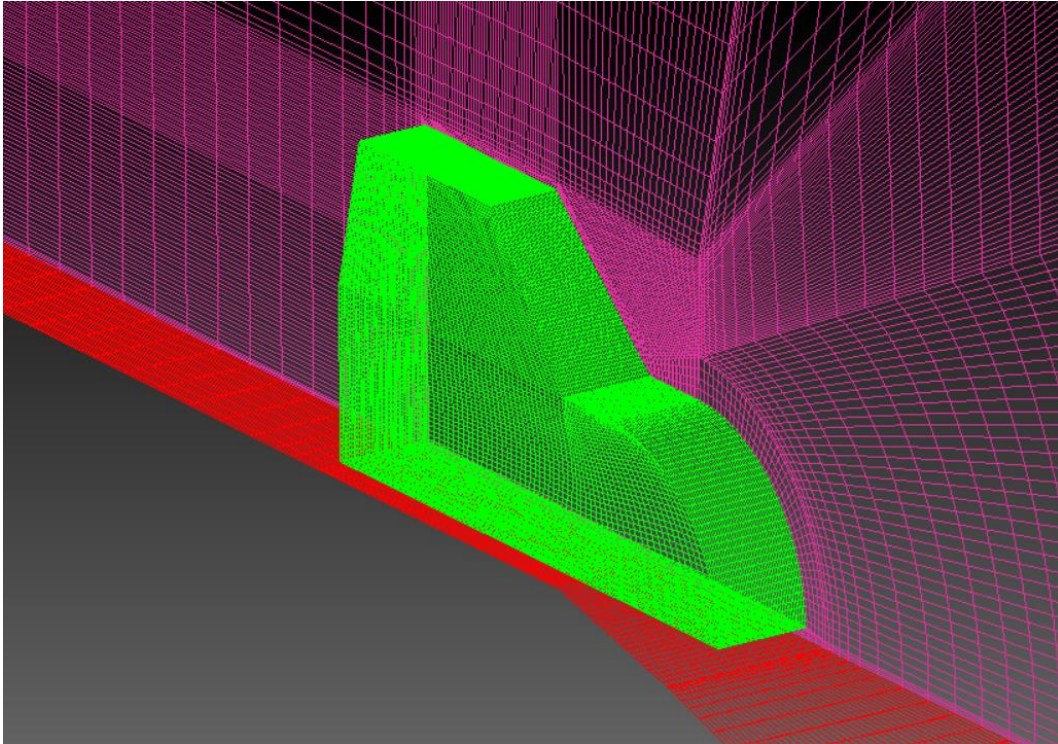
**Tabela 3 - Dados referente a malha construída para simulação do protótipo atual.**

Malha protótipo atual	Quantidade de elementos	Determinante 3x3x3	Ângulo mínimo	Razão de aspecto máxima
	1960612	0,295	13,41°	169

**Fonte: Autoria própria.**

Alguns elementos de malha próximo ao Corpo de Ahmed da malha de dois milhões de elementos podem ser visualizados na Figura 30.

Figura 30 - Elementos de malha na superfície do protótipo atual..



Fonte: Autoria própria.

Após construção da malha, foi possível efetuar configuração dos parâmetros das simulações a partir do *software* OpenFOAM via Ubuntu. O *solver* utilizado foi o GAMG com tolerância de  $10^{-8}$  e o modelo de turbulência escolhido foi o  $\kappa - \omega$  SST, ambos já validados no tópico 6 do presente trabalho. O fluido utilizado foi o ar na temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  à 1 atm. A velocidade do escoamento de ar nas entradas do domínio (INLET), foi definida como tendo direção normal a face de saída (OUTLET) e módulo igual a 10m/s, velocidade média aproximada do veículo durante a competição baseada nos trabalhos de Sush (2018) e Tonet (2019). O parâmetro de controle na saída do domínio (OUTLET) foi o de gradiente de pressão nulo. E o solo (GROUND) foi configurado com condição de contorno de parede sem deslizamento.

O critério de convergência definido foi o de valores residuais menores que  $10^{-6}$  ou 2000 iterações, mesmo critério utilizado nas simulações de validação. Em todas as simulações foi adotado o regime permanente por necessitar de um menor custo computacional. A rugosidade da geometria para todos os casos foi desconsiderada.

## 7.2 Resultados referentes a simulação do protótipo atual

A partir da simulação foi possível obter os valores de coeficientes de arrasto e sustentação do corpo protótipo atual da Equipe Tuba Turbo, além do tempo gasto na simulação, como apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4 - Coeficientes de arrasto e sustentação referentes as simulações do protótipo atual.**

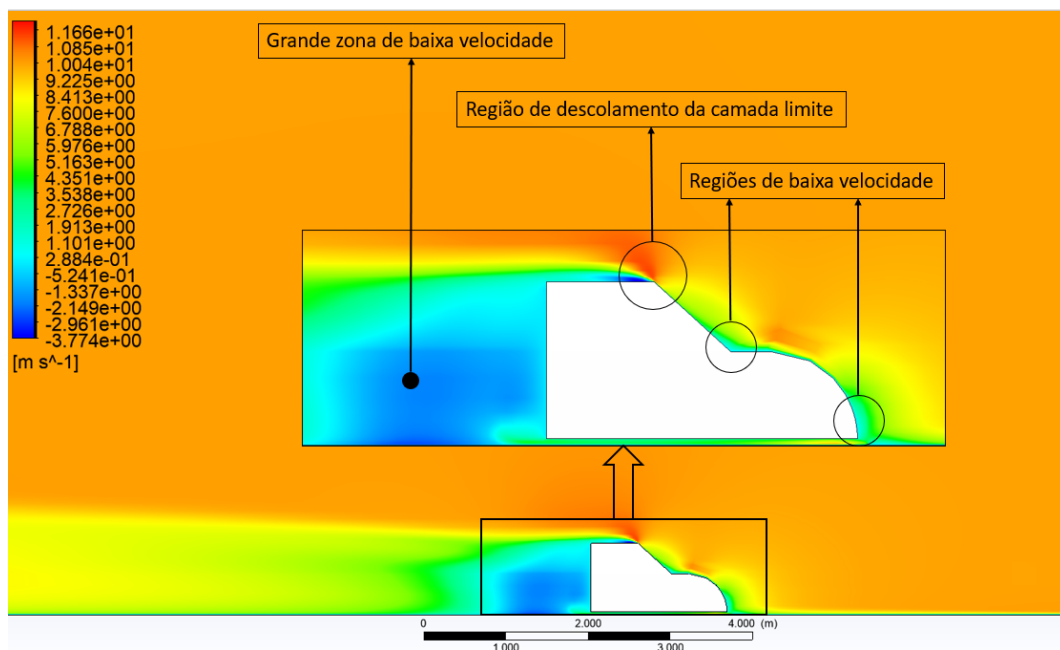
Resultado protótipo atual	Quantidade de elementos	Coefficiente de arrasto	Coefficiente de sustentação	Tempo de execução (seg.)	Número de Reynolds
	1960612	0,5169	1,3854	13837,62	1,09E+06

**Fonte: Autoria própria.**

Foi possível observar que o valor do coeficiente de arrasto está bem elevado em comparação com os protótipos de alto nível apresentados na figura 11 deste trabalho.

Para que fosse possível efetuar uma análise qualitativa do comportamento fluido dinâmico do escoamento ao redor do protótipo, foram efetuados alguns gráficos de contornos e linhas de corrente a partir do *software* CFD-Post.

**Figura 31 - Contorno de velocidade na região do plano de simetria com destaque em pontos importantes do protótipo atual.**

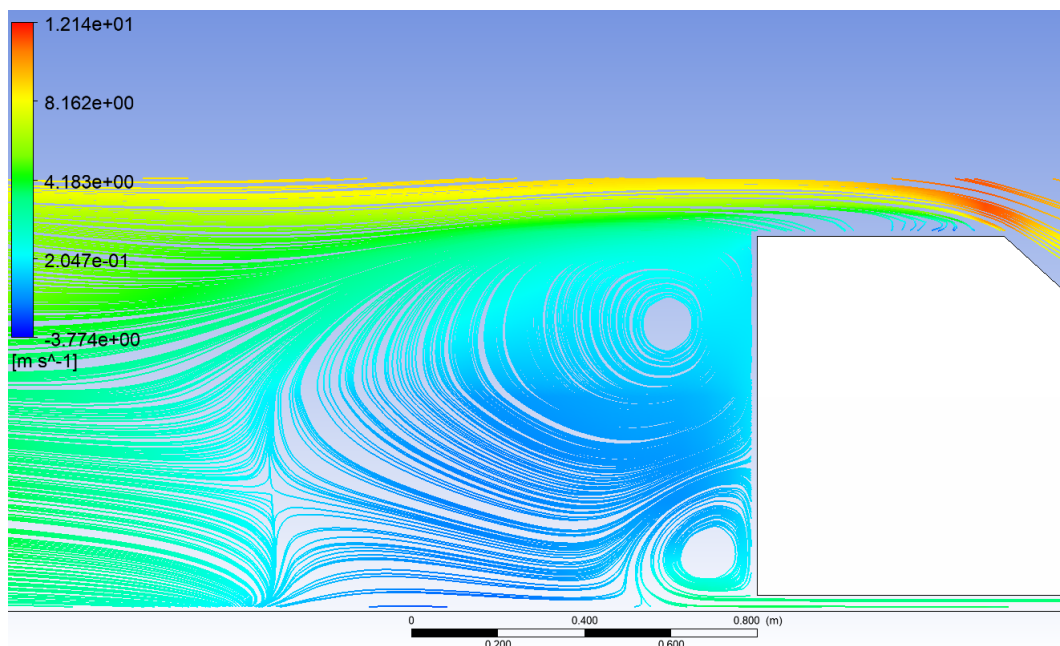


**Fonte: Autoria própria.**

Analisando o contorno de velocidade da Figura 31, pode-se notar que a região de descolamento da camada limite destacada ocorre de maneira prematura auxiliando à formação de uma grande zona de baixa velocidade na região traseira do protótipo, fator este que proporciona elevado arrasto do veículo.

A fim de observar o comportamento do escoamento na grande zona de baixa velocidade destacada na Figura 31, foi possível gerar as linhas de corrente referente a simulação efetuada, conforma apresentado na Figura 32.

**Figura 32 - Linhas de corrente de velocidade obtidas a partir da simulação do protótipo atual da equipe.**

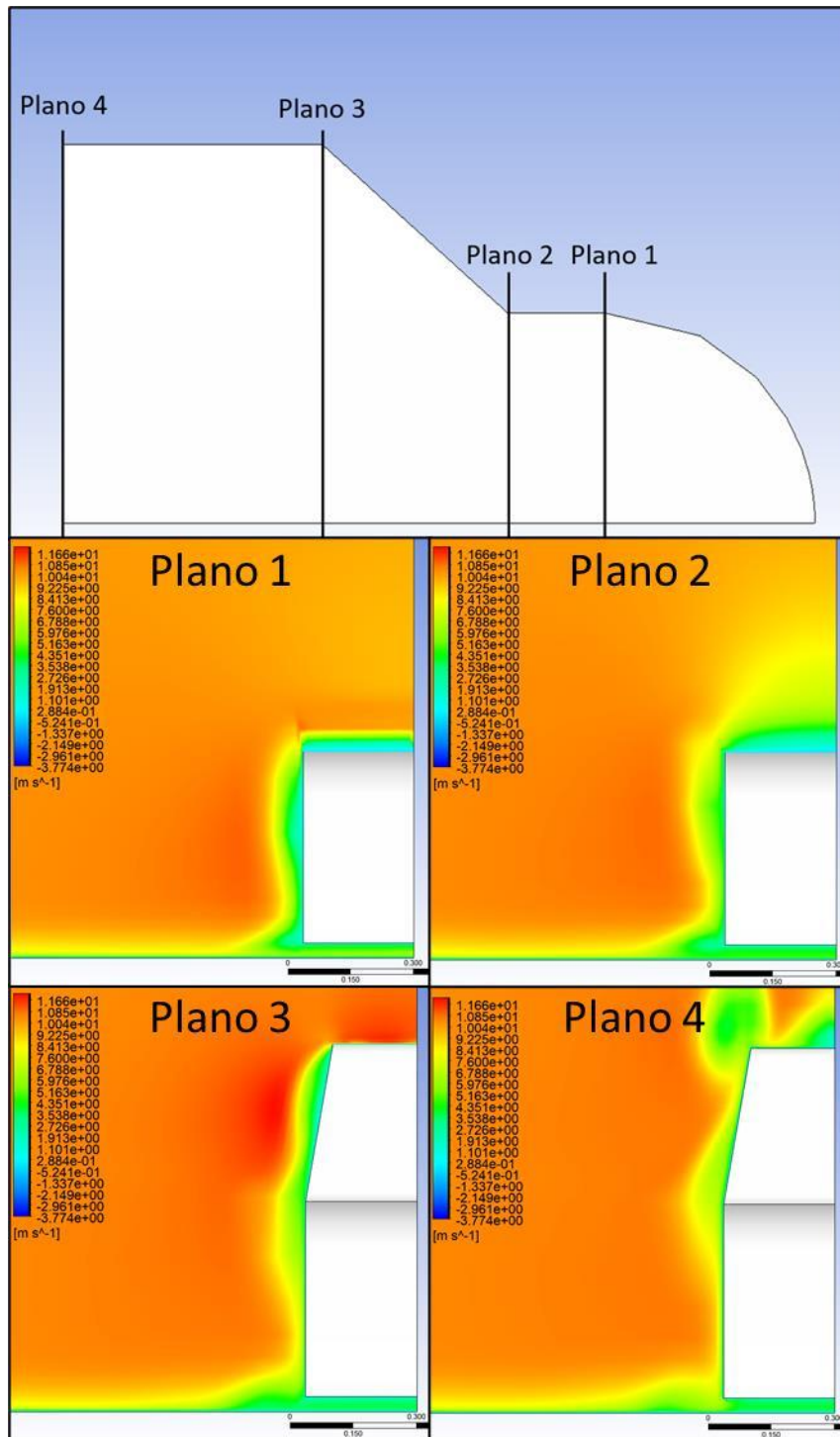


**Fonte: Autoria própria.**

É possível notar que são formadas duas recirculações na saída traseira do veículo com dimensões próximas ao comprimento do protótipo. A recirculação superior gerada pelo descolamento da camada limite na região superior e a recirculação da parte inferior traseira do protótipo gerada pelo descolamento da camada limite na região inferior.



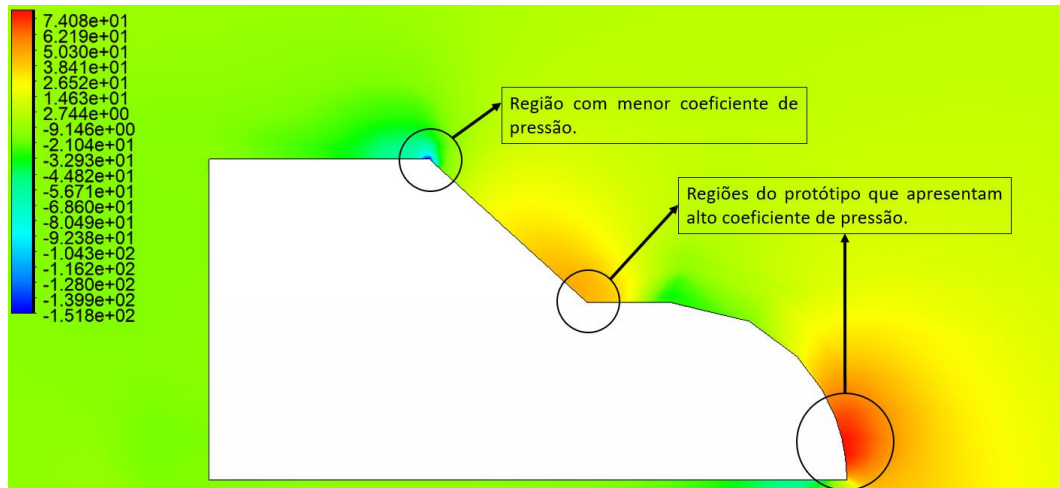
Figura 33 - Contorno de velocidade em planos frontais do protótipo atual.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar na figura 33 as variações de velocidade em vários pontos da carenagem do protótipo referente ao escoamento do fluido na lateral da carenagem e também é possível notar nos planos 3 e 4, que a angulação lateral do protótipo influencia negativamente na velocidade do escoamento próximo ao corpo.

**Figura 34 - Contorno de coeficiente de pressão na região do plano de simetria com destaque nas regiões de maior e menor coeficiente do protótipo atual.**

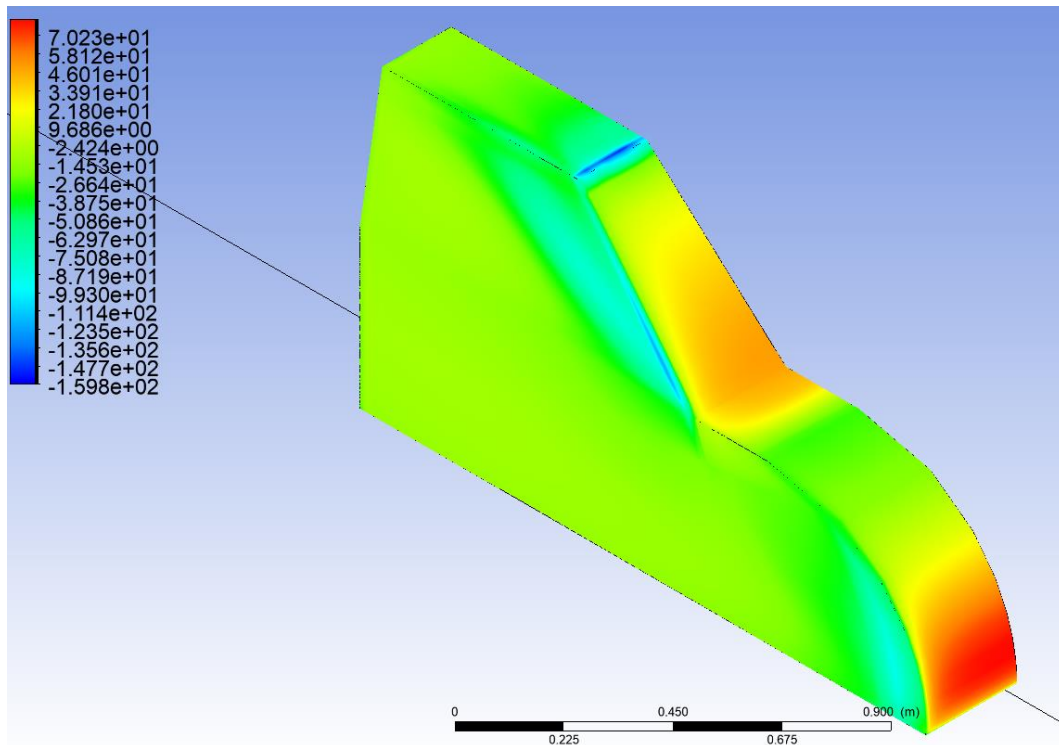


Fonte: Autoria própria.

A Figura 34 apresenta o contorno do coeficiente de pressão com destaque para as regiões de maior e menor pressão, regiões essas que apresentam grande influência no arrasto do protótipo. É possível notar que a região de menor coeficiente de pressão é a mesma em que ocorre o descolamento da camada limite. Embora o aumento agudo de angulação do para-brisa para o teto do veículo proporcione gradientes de pressão negativos na região, favorecendo o desvio do fluxo, os mesmos não são suficientes para evitar o descolamento da camada limite. Também é possível observar que os pontos de maior coeficiente de pressão têm relação com as regiões de baixa velocidade destacadas na Figura 31, o que se deve pela diminuição brusca da angulação da geometria.

A Figura 35 apresenta contornos do coeficiente de pressão na superfície da carenagem, possibilitando uma visão tridimensional dos valores do coeficiente ao redor de todo o corpo.

**Figura 35 – Contorno do coeficiente de pressão ao redor do protótipo atual.**



**Fonte: Autoria própria.**

É possível observar na Figura 35 alguns pontos de alta e baixa pressão já destacados na Figura 34. Também é possível observar algumas regiões de baixo coeficiente de pressão na parte lateral do veículo que influenciam negativamente no coeficiente de arrasto do mesmo.



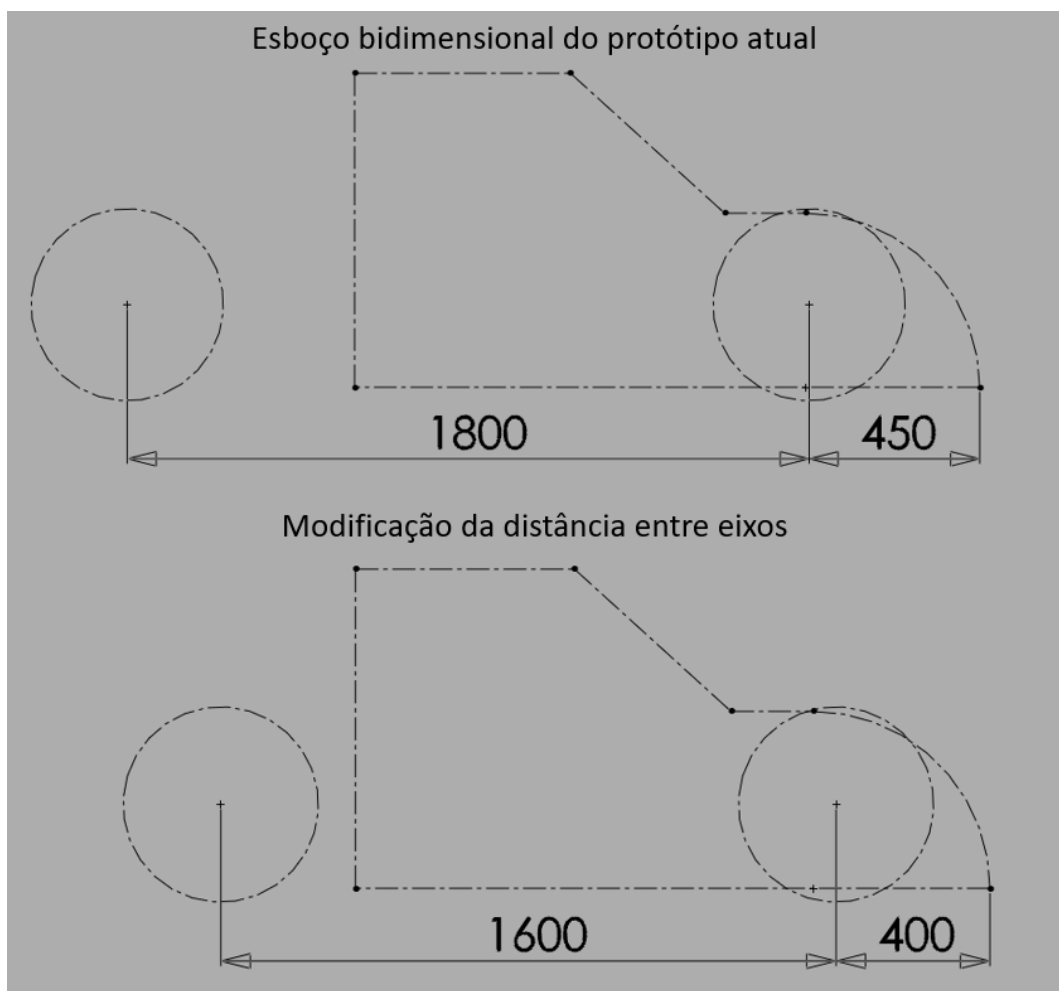
## 8 NOVA PROPOSTA DE CARENAGEM

Neste tópico do trabalho estão contidas as técnicas empregadas para que fosse possível obter uma proposta de carenagem com menor coeficiente de arrasto, baseando-se nos pontos negativos evidenciados a partir análise da carenagem do protótipo atual da equipe Tuba Turbo. Outros requisitos de projeto também foram levados em consideração, sendo eles, a cobertura das rodas frontais e traseira pela carenagem e o design com mais curvaturas para fins de marketing da equipe.

### 8.1 Melhorias empregadas no perfil da carenagem

A primeira modificação necessária foi a da mudança da distância entre eixos, conforme apresentado na figura 36.

Figura 36 – Esboços lateral da modificação da distância entre eixos.



Fonte: Autoria própria.

A mudança apresentada na Figura 36 referentes a alteração da distância entre eixos do veículo foi necessária para que fosse possível atender ao requisito de cobertura das rodas pela carenagem do protótipo buscando manter o menor comprimento possível da carenagem.

Posteriormente foi possível efetuar a extensão da carenagem conforme apresentado na Figura 37.

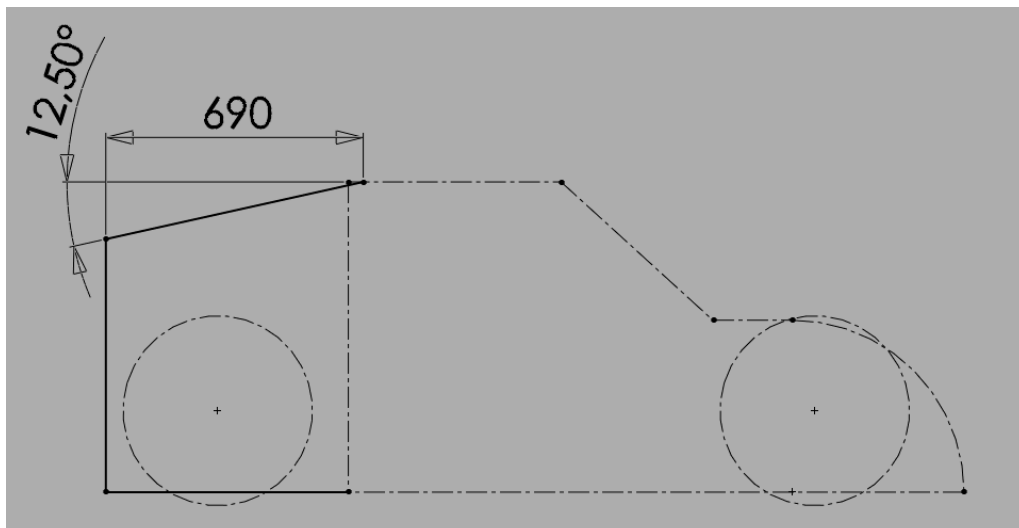
**Figura 37 – Esboço lateral da modificação do comprimento da carenagem.**



**Fonte: Autoria própria.**

Após a mudança da distância entre eixos ser efetuada foi possível estender a carenagem do protótipo para que a mesma proporcionasse a cobertura total da roda traseira do veículo.

**Figura 38 – Esboço lateral da adição de um ângulo de saída traseiro.**



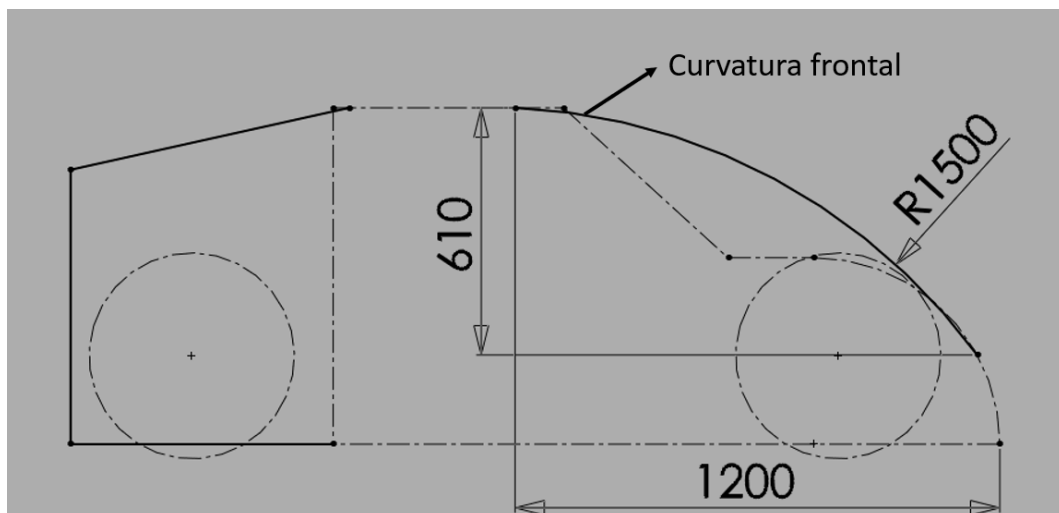
**Fonte: Autoria própria.**

Conforme demonstrado na Figura 38, foi efetuada a adição de um ângulo de saída traseiro na geometria do veículo para favorecer o escoamento do ar na traseira do mesmo, afim de minimizar a dimensão dos vórtices e os efeitos de aumento de arrasto gerados nesta região. O trabalho efetuado por Ahmed et al. (1984) demonstra a efetividade da adição de um ângulo de saída para a diminuição do coeficiente de arrasto através de testes em túneis de vento, onde foram feitos testes na geometria do corpo de Ahmed variando o ângulo de saída de  $0^\circ$  a  $30^\circ$ . O estudo em questão também conclui que a geometria com o ângulo de saída de  $12,5^\circ$  apresenta o menor coeficiente de arrasto do corpo de Ahmed.

A possibilidade da adição de um ângulo difusor na parte inferior traseira da geometria estudada é descartada, baseando-se no artigo de Assi et al. (2021). Os autores efetuaram um estudo computacional da influência do ângulo de saída inferior traseiro no valor do coeficiente de arrasto do corpo de Ahmed e concluíram que independentemente do ângulo a adição de um difusor na região inferior traseira proporciona um aumento no coeficiente de arrasto do corpo.

Em seguida foram efetuadas algumas mudanças na parte frontal do protótipo conforme demonstrado nas Figuras 39 e 40.

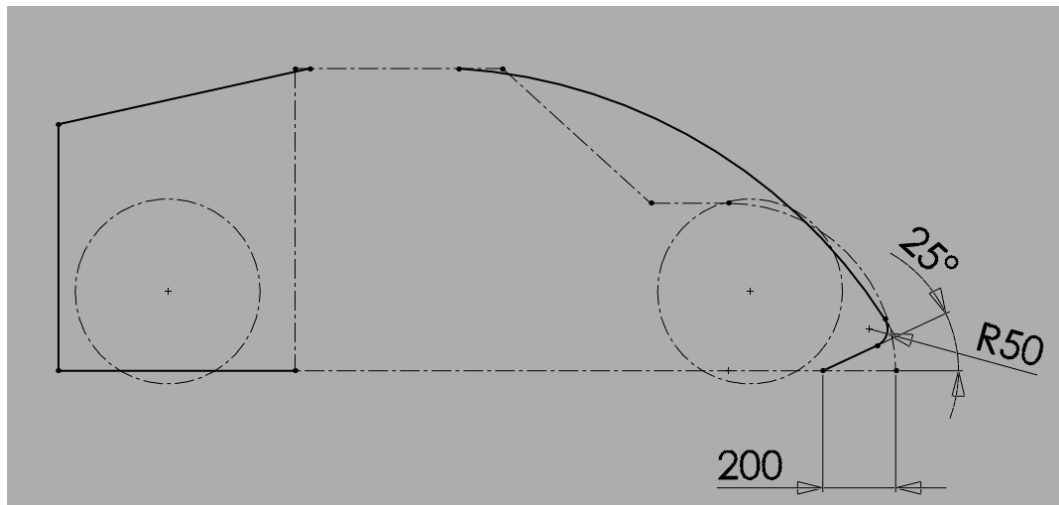
**Figura 39 – Esboço lateral da adição de uma curvatura frontal.**



**Fonte: Autoria própria.**

A curvatura frontal apresentada na Figura 39 foi adicionada a geometria do protótipo afim minimizar os pontos de pressão existentes na geometria do protótipo atual da equipe. A curvatura também tem a função minimizar o gradiente de velocidade do escoamento ao longo da parte superior da carenagem.

**Figura 40 – Esboço lateral da adição de um ângulo de entrada inferior.**

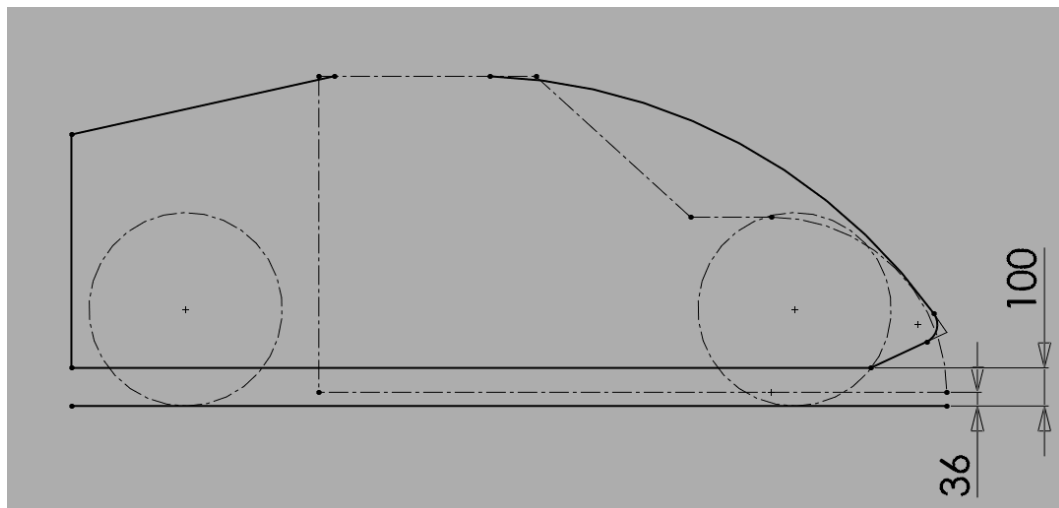


**Fonte: Autoria própria.**

Conforme apresentado na Figura 40, um ângulo de entrada inferior e um raio na parte frontal do veículo foram adicionados para favorecer a divisão do escoamento entre a parte superior e inferior de maneira a promover um menor gradiente de velocidade do escoamento ao longo da carenagem do protótipo.

A Figura 41 apresenta a mudança da altura do veículo em relação ao solo efetuada.

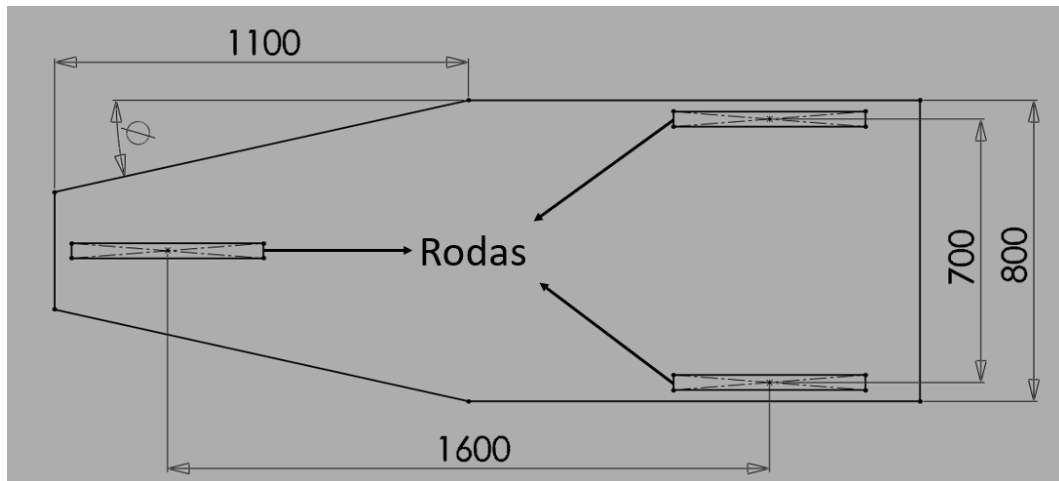
**Figura 41 – Esboço lateral da mudança da distância do veículo em relação ao solo.**



**Fonte: Autoria própria.**

Conforme concluído em um estudo efetuado por George (1981), a distância do veículo em relação ao solo é inversamente proporcional ao coeficiente de arrasto do mesmo. Utilizando isto como base e também visando garantir a estabilidade do veículo, a distância do veículo em relação ao solo foi aumentada para 100 milímetros.

**Figura 42 - Esboço superior da nova proposta.**

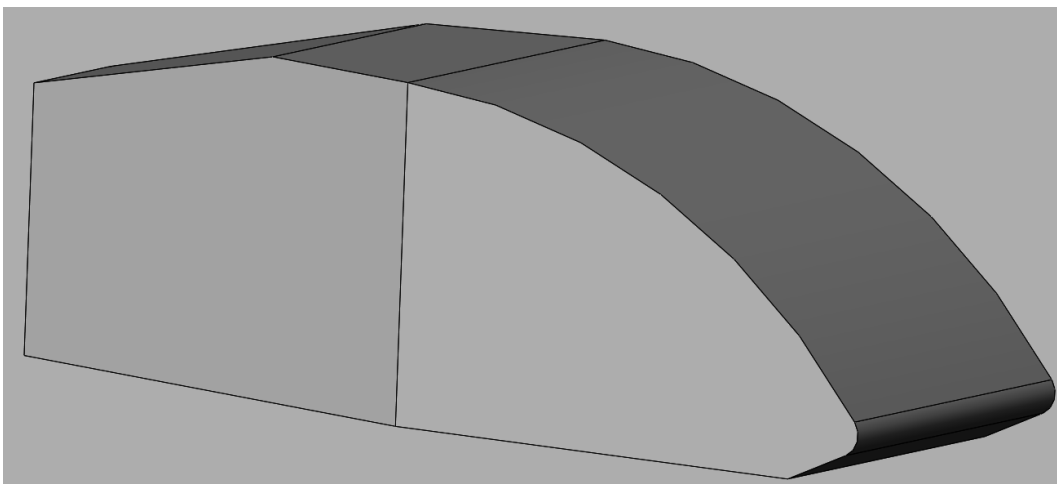


**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 42 contém o esboço da nova proposta de carenagem, e pode-se observar que a largura do veículo possibilita que as rodas frontais sejam cobertas, também é possível notar que foi adicionado um ângulo de saída nas laterais do veículo com a finalidade de minimizar a dimensão dos vórtices e os efeitos de aumento de arrasto gerados nesta região. O valor do ângulo lateral que proporciona o menor coeficiente de arrasto para a nova proposta de carenagem será estudado posteriormente no presente trabalho.

A geometria tridimensional da carenagem com as alterações efetuadas foi modelada em SolidWorks e está apresentada na Figura 43.

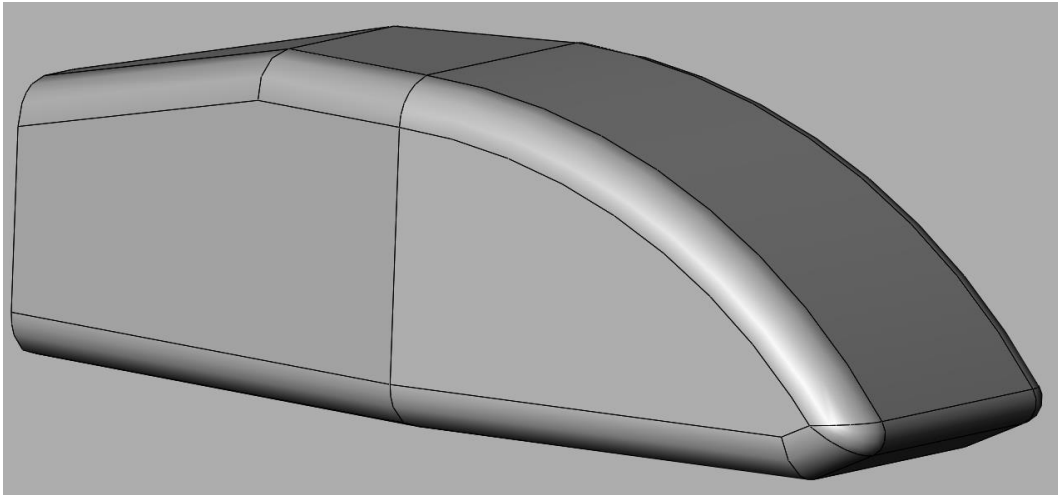
**Figura 43 - Modelo tridimensional modificado.**



**Fonte: Autoria própria.**

A última alteração efetuada na nova geometria foi a adição de raios em algumas arestas externas, minimizando o efeito das arestas lateral no escoamento e proporcionando também ganhos estéticos a geometria. A Figura 44 apresenta a proposta com a adição dos raios.

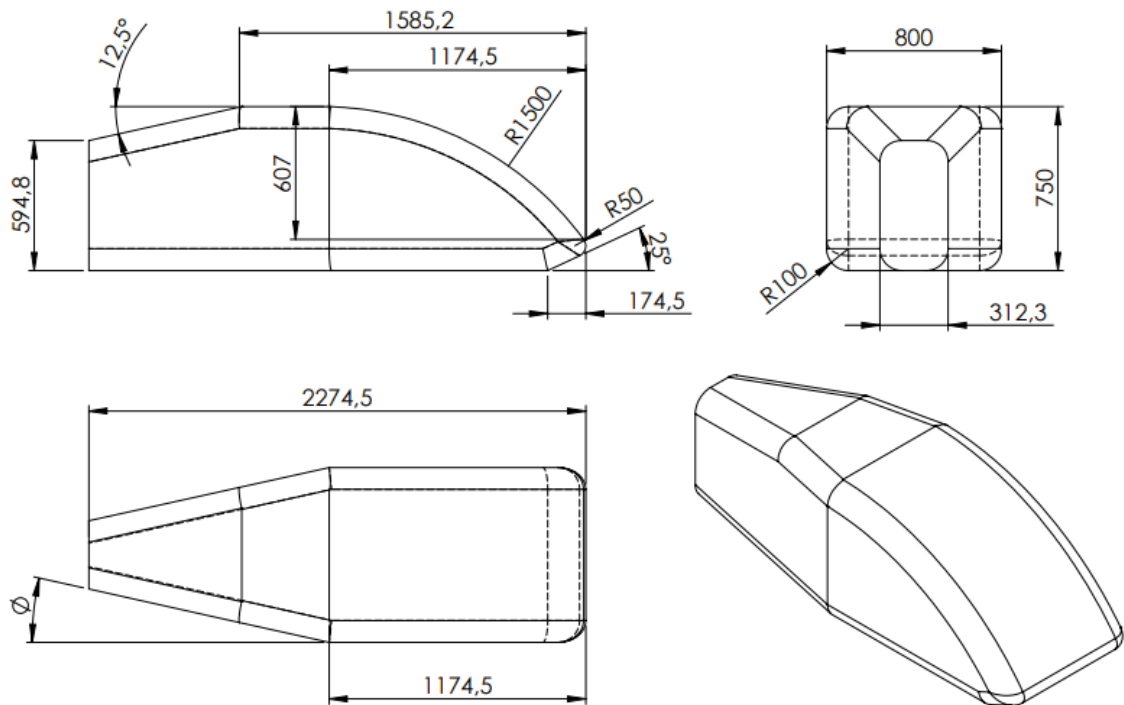
**Figura 44 - Geometria da nova carenagem com a adição dos raios em alguns vértices.**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 45 contém todas as dimensões da nova geometria proposta.

**Figura 45 - Dimensões da nova proposta de carenagem.**

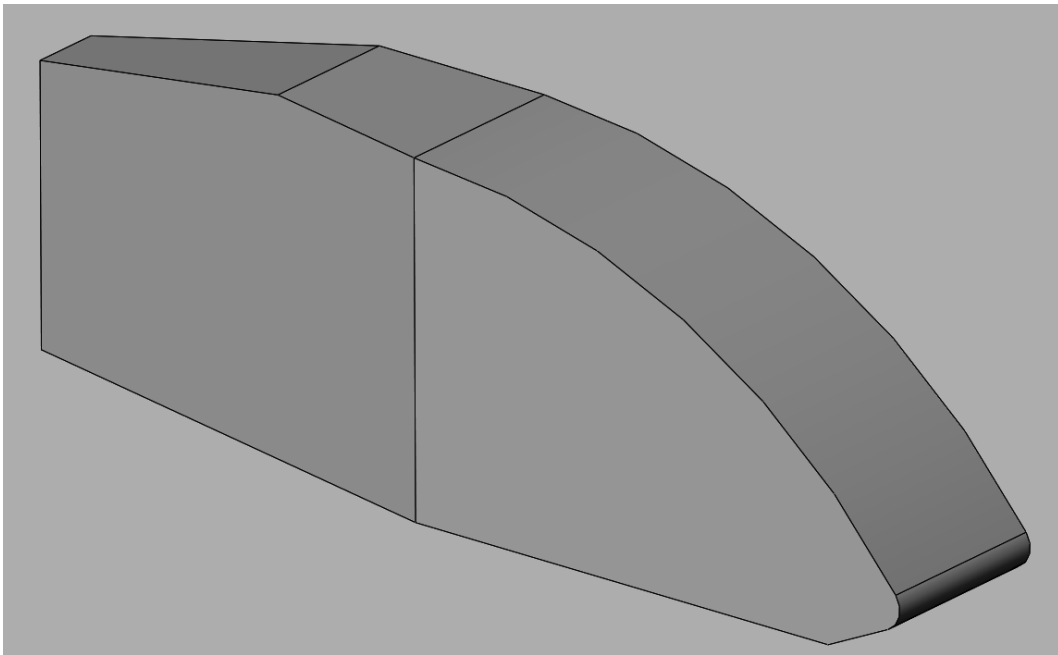


Fonte: Autoria própria.

## 8.2 Simulações da nova proposta de carenagem

A primeira etapa necessária foi a modelagem simétrica da nova proposta de carenagem utilizando o modelo da Figura 43 construído no SolidWorks. Os raios adicionados nas arestas da carenagem foram desconsiderados devido à dificuldade de construção de uma malha por blocagem manual para geometrias de grande complexidade. A Figura 46 apresenta o modelo tridimensional simétrico efetuado.

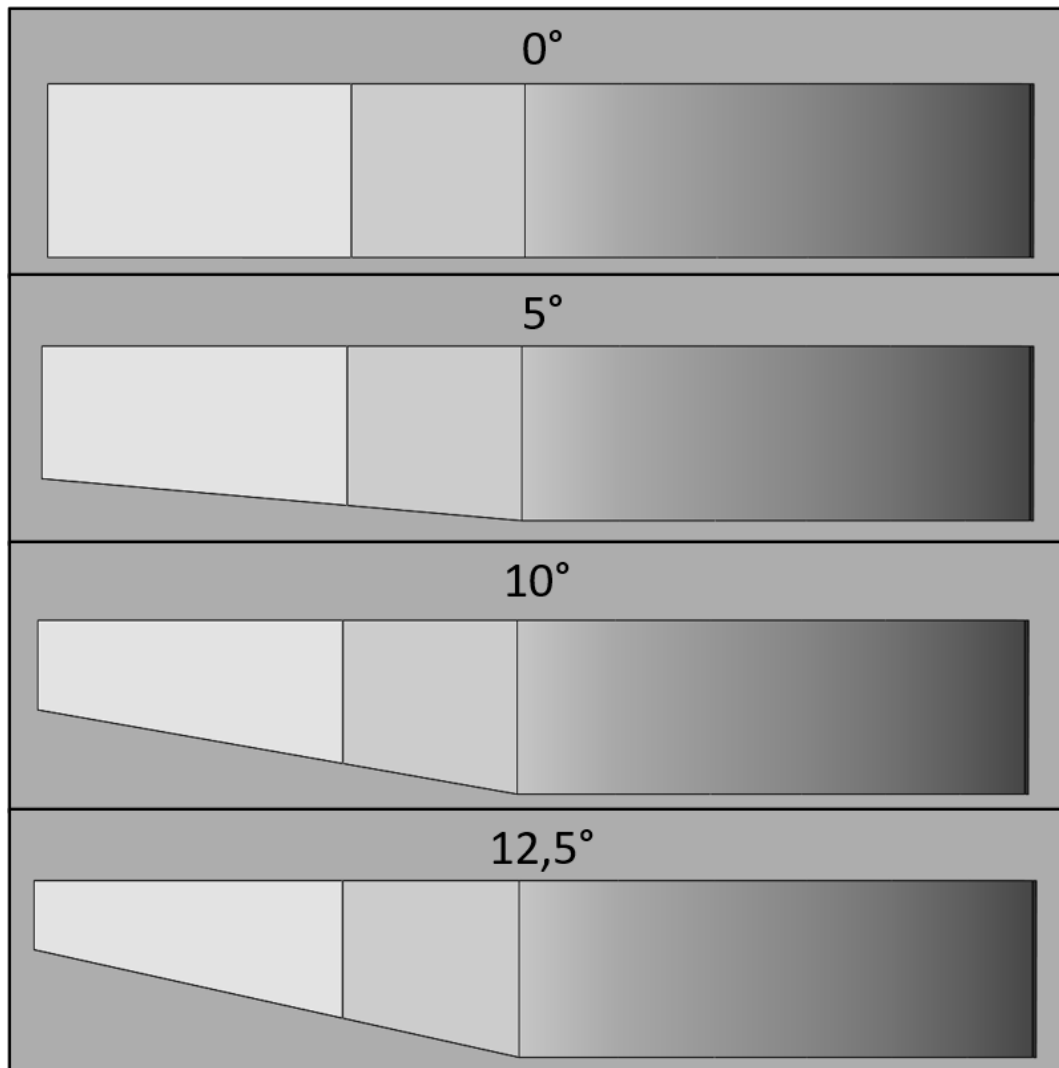
**Figura 46 - Modelo tridimensional simétrico da nova proposta de carenagem.**



**Fonte: Autoria própria.**

Para que fosse possível avaliar qual o valor do ângulo de saída lateral proporciona o menor coeficiente de arrasto para a geometria em questão, foram construídas quatro modelos com diferentes ângulos de saída, conforme mostrado na Figura 47.

Figura 47 – Nova proposta de carenagem com diferentes ângulos de saída lateral.

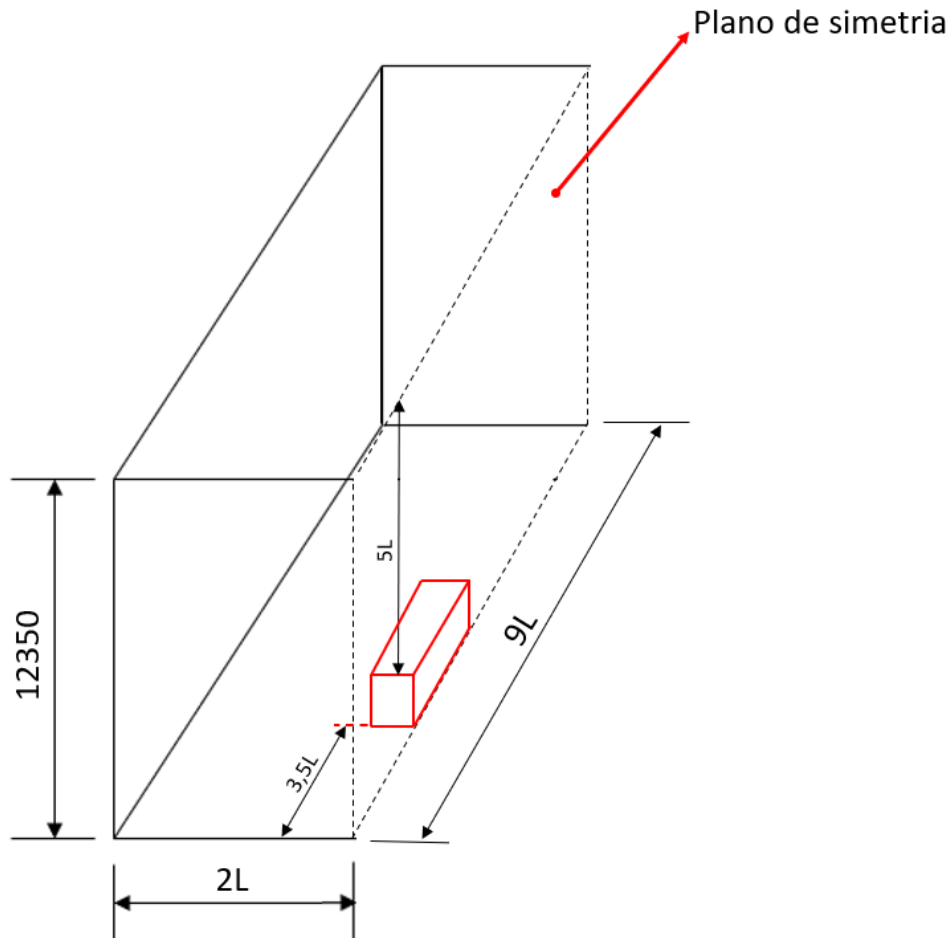


Fonte: Autoria própria.

Após construção do modelo, foi possível dar início à construção do domínio computacional. As dimensões do domínio computacional utilizado na simulação foram proporcionais as validadas no tópico 6 do presente trabalho. A Figura 48 apresenta um esboço do domínio utilizado para a simulação da nova proposta de carenagem.



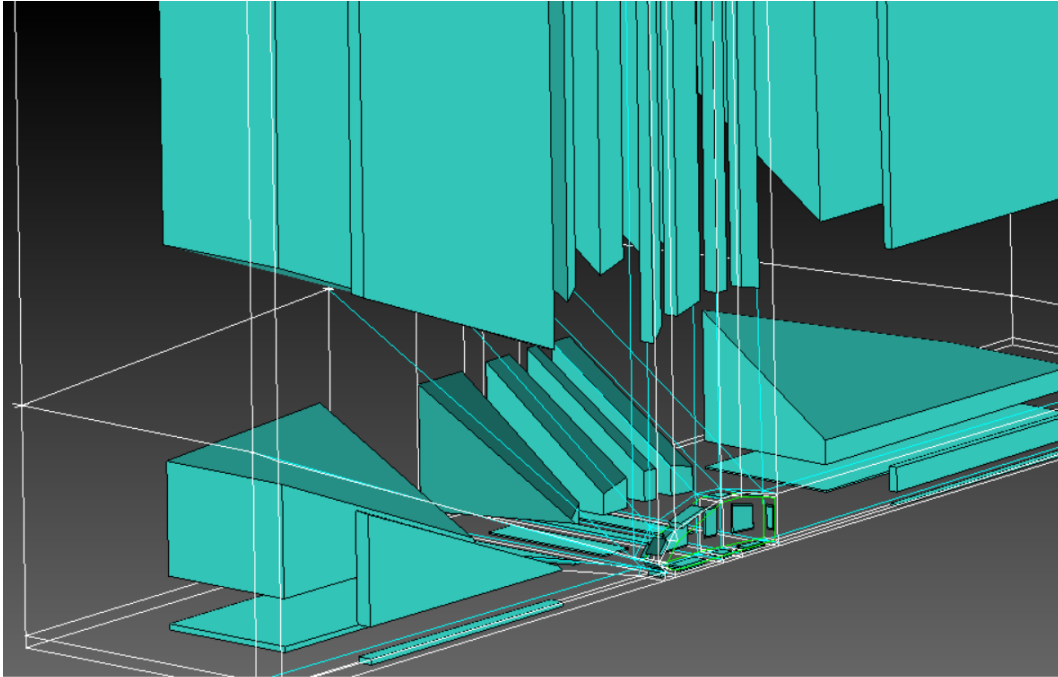
Figura 48 - Esboço do volume de controle construído para simulação da nova proposta.



Fonte: Autoria própria.

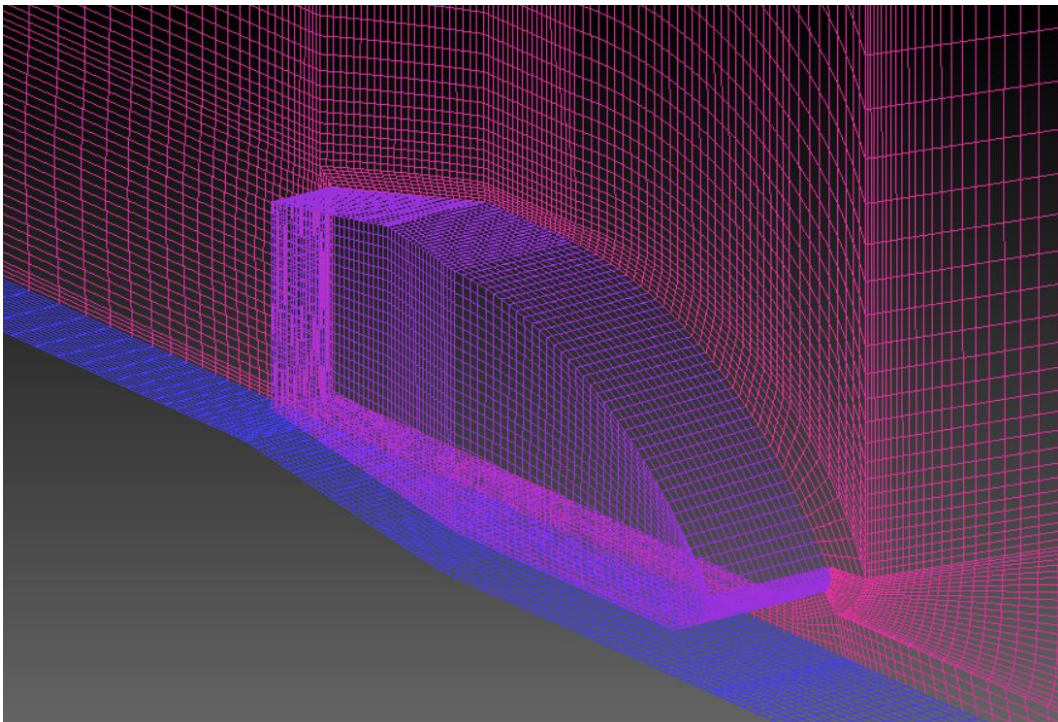
As condições de contorno referente as faces do domínio computacional foram as mesmas empregadas na simulação de validação efetuada no tópico 6 do presente trabalho. A blocagem manual também foi efetuada utilizando as técnicas validadas, controlando os parâmetros referentes a qualidade da malha. Visando ganho de tempo na construção das malhas para cada um dos ângulos de saída lateral que foram propostos para análise, foi empregado a função de gravação de *script* contida no ICFM CFD, na confecção da malha com ângulo lateral de  $12,5^\circ$ , e posteriormente o *script* foi utilizado para a construção por blocagem das demais malhas de maneira automática. A estratégia de utilização do *script* possibilitou que as quatro malhas fossem construídas de maneira idêntica. A Figura 49 e 50 mostram respectivamente a blocagem manual efetuada e os elementos de malha na superfície da nova proposta.

**Figura 49 - Blocação manual efetuada para geração de malha da nova proposta de carenagem.**



**Fonte: Autoria própria.**

**Figura 50 - Elementos de malha na superfície da nova proposta de carenagem.**



**Fonte: Autoria própria.**

A Tabela 5 contém as principais informações referente as malhas.

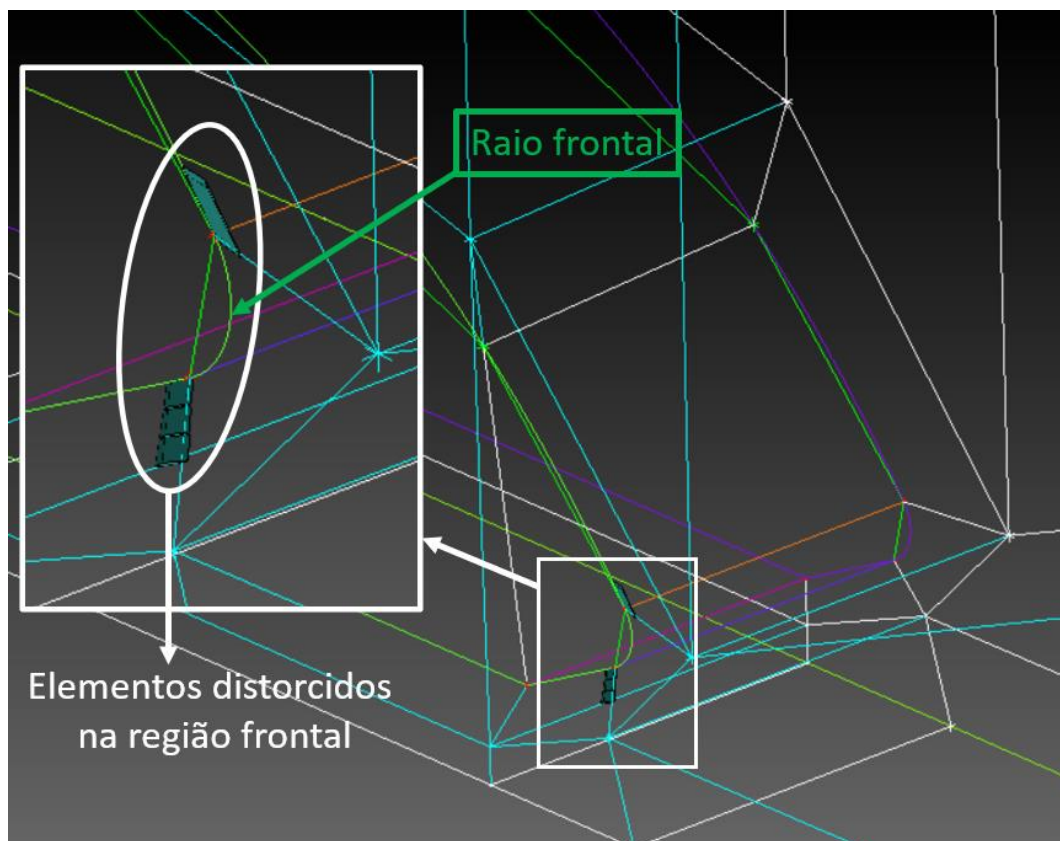
**Tabela 5 - Informações referente as malhas construídas para as simulações da nova proposta.**

Ângulo de saída lateral	Quantidade de elementos	Determinante 3x3x3 mínimo	Ângulo mínimo	Razão de aspecto máxima
0°	1997262	0,149	2,385	41,6
5°	1997262	0,149	2,385	41,6
10°	1997262	0,149	2,385	41,6
12,5°	1997262	0,149	2,385	41,6

Fonte: Autoria própria.

O baixo valor do ângulo mínimo de elemento de malha e do determinante mínimo são referentes a quatro elementos localizados próximos ao pequeno raio de entrada frontal como evidenciado na Figura 51.

**Figura 51 – Região frontal da blocagem da nova proposta com foco nos elementos de malha com baixo ângulo.**



Fonte: Autoria própria.

A distorção dos elementos em questão se deve ao ajuste do bloco da região em relação ao raio de entrada. Por entender que os elementos em questão não teriam

influência mínima nos resultados, foi dado continuidade ao processo de simulação. Todos os parâmetros das simulações foram configurados e definidos de forma idêntica a simulação da carenagem do protótipo atual efetuada no tópico 7.1 do presente trabalho.

### 8.3 Resultados referentes a nova proposta de carenagem

A partir das simulações foi possível obter os valores de coeficientes de arrasto e sustentação da nova proposta de carenagem para cada um dos ângulos de saída definidos para análise, além do tempo gasto em cada uma das simulações, conforme apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6 - Resultado das simulações referentes a nova proposta de carenagem.**

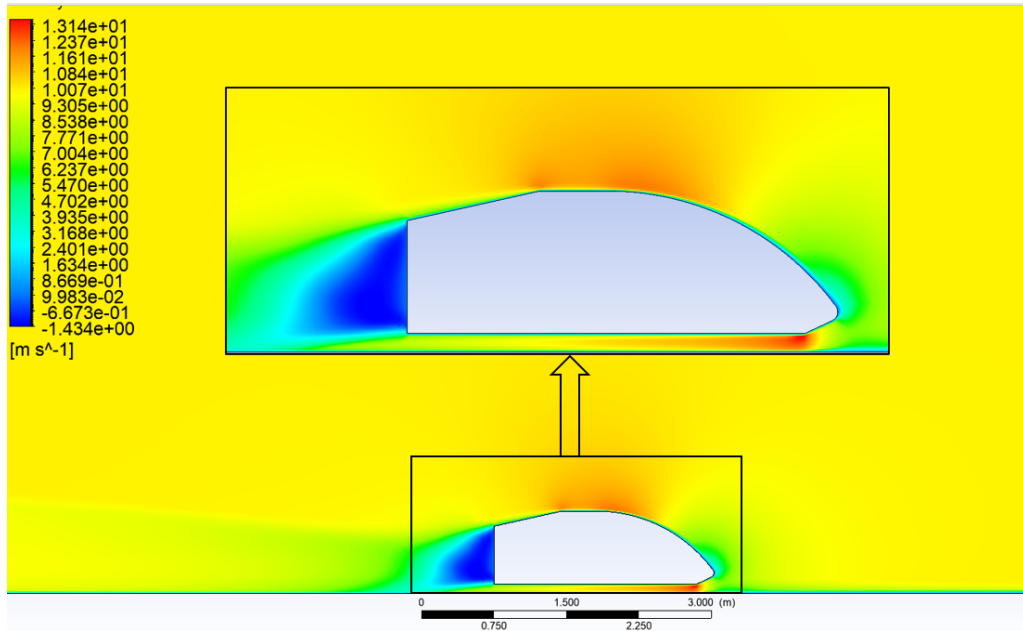
Ângulo lateral	Coeficiente de arrasto	Coeficiente de sustentação	Tempo de execução (seg.)	Número de Reynolds
0°	0,3609	1,0571	17035,67	1,52E+06
5°	0,2946	1,2395	17169,70	
10°	0,2601	1,3934	17563,93	
12,5°	0,2649	1,4410	17568,48	

**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se observar que o perfil com o ângulo de saída lateral de 10° apresentou o menor coeficiente de arrasto, sendo definido como a melhor proposta carenagem.

Para que fosse possível efetuar uma avaliação qualitativa do comportamento fluido dinâmico do escoamento ao redor da nova proposta de carenagem com angulação de 10°, foram efetuados alguns gráficos de contornos e linhas de corrente a partir do *software* CFD-Post.

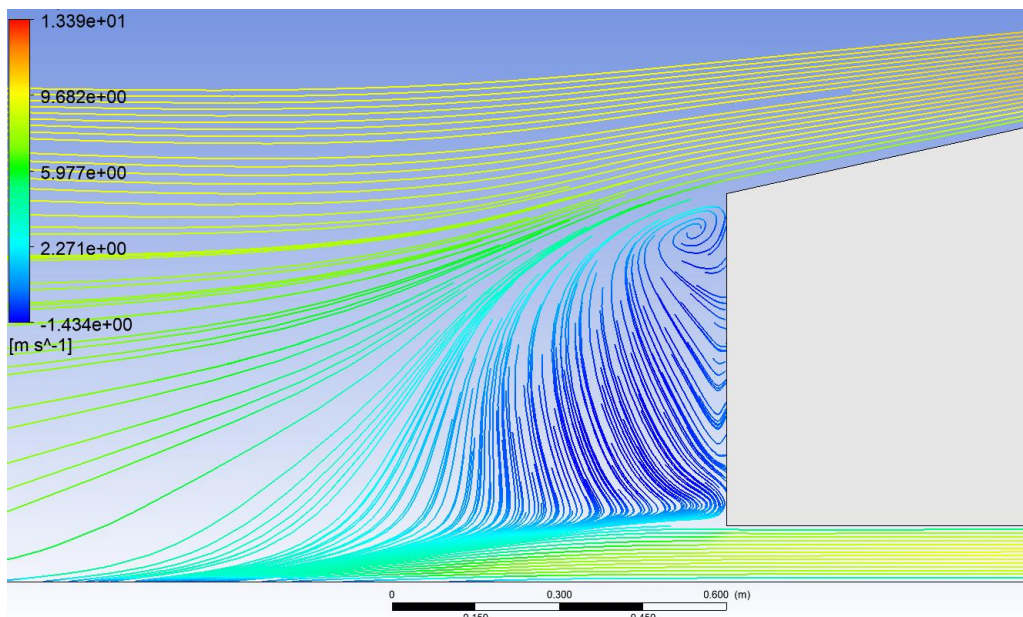
**Figura 52 - Contorno de velocidade na região do plano de simetria com destaque em pontos importantes da nova proposta de carenagem.**



Fonte: Autoria própria.

É possível notar que a zona de desaceleração na região traseira do veículo é relativamente pequena, e que há uma baixa magnitude da velocidade negativa do escoamento nesta região. Pode-se observar que a esteira formada na região traseira tende a se tornar homogênea em relação ao escoamento. Também é possível observar que o descolamento da camada limite ocorre somente no final da geometria como o esperado após a adição do ângulo de saída superior.

**Figura 53 - Linhas de corrente no plano de simetria da nova proposta de carenagem.**

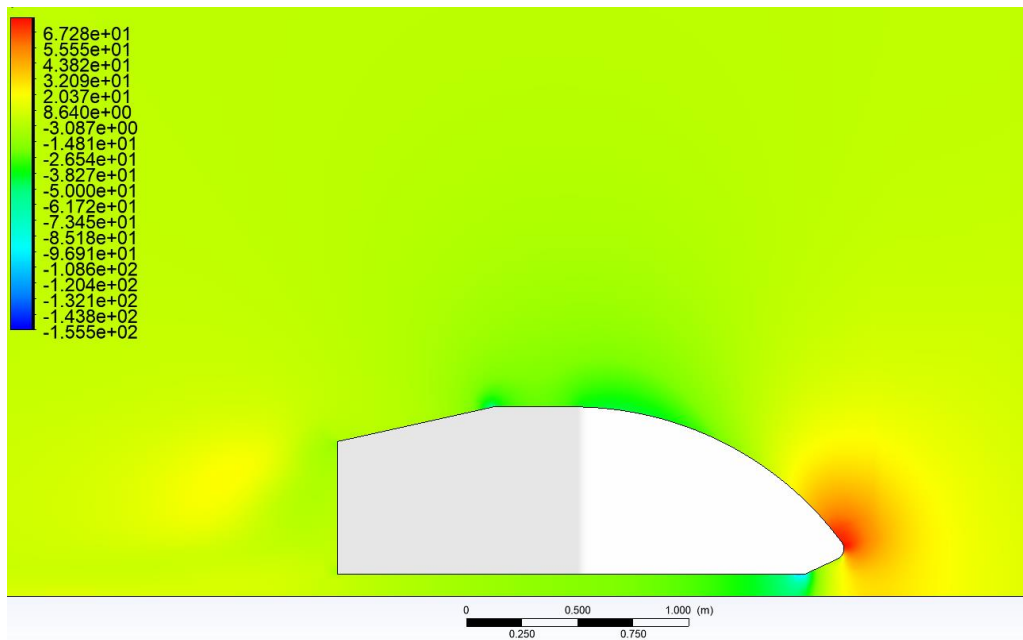


Fonte: Autoria própria.



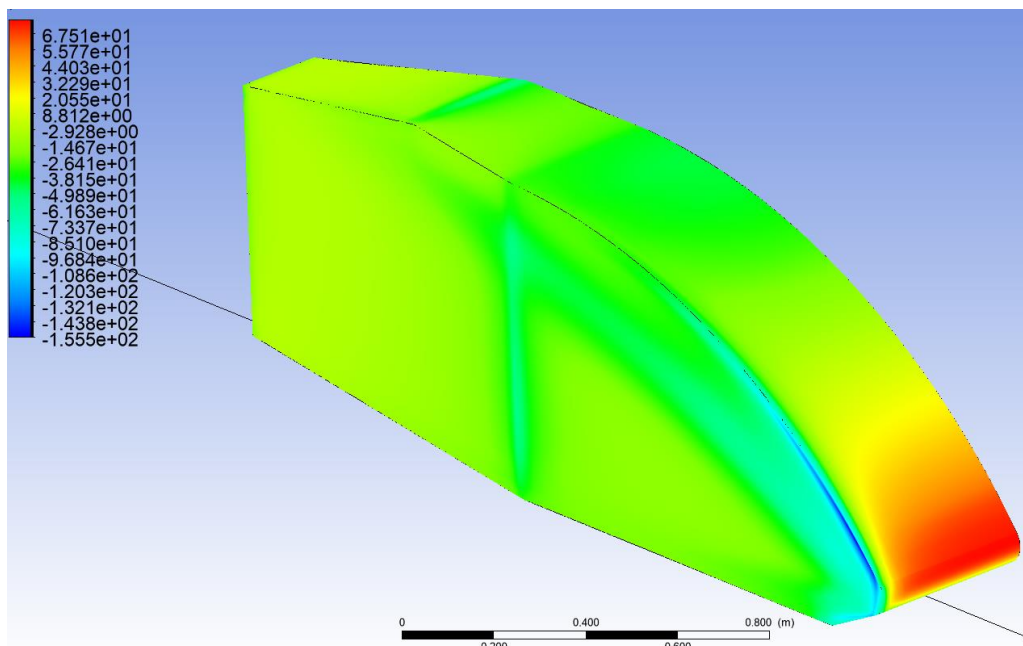
A partir da Figura 53 pode-se observar que os vórtices formados na região traseira da carenagem são consideravelmente menores e que a região de velocidade negativa do escoamento apresenta baixa magnitude. Também é possível notar que o comprimento da região de baixa velocidade traseira apresenta pequena dimensão em relação ao comprimento do corpo carenado da nova proposta.

**Figura 54 - Contorno de coeficiente de pressão na região do plano de simetria da nova proposta de carenagem.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 55 - Contorno de coeficiente de pressão ao redor da nova proposta de carenagem.**



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar nas Figura 54 e 55 que a região do bico frontal da carenagem é o único local onde há elevado coeficiente de pressão positivo. Também é possível observar que há uma região de pressão negativa com magnitude elevada na região de entrada inferior do veículo, o que se deve a um ângulo de entrada muito elevado empregado. A aresta externa que acompanha a curvatura superior também apresenta elevado coeficiente de pressão negativo, fator que provavelmente será minimizado com a aplicação dos raios propostos na Figura 44.

#### 8.4 Comparação dos resultados

Como forma final de comprovação das melhorias implementadas para proposta da nova carenagem foram feitas comparações entre os coeficientes de arrasto e sustentação e também da força de arrasto com os valores do protótipo atual.

**Tabela 7 - Comparação dos resultados obtidos.**

	Coeficiente de arrasto	Coeficiente de sustentação	Força de arrasto (N)
Protótipo atual	0,5169	1,3854	13,17
Nova proposta	0,2601	1,3934	9,56
Variação (%)	-49,68%	+0,58%	-27,40%

**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se notar uma diminuição de aproximadamente 50% do coeficiente de arrasto, o que é um ótimo indicio de melhorias bem aplicadas a carenagem. A força de arrasto teve uma redução de menor porcentagem devido ao aumento da largura da nova carenagem proposta para que a mesma proporcionasse uma cobertura para as rodas frontais. Já o coeficiente de sustentação não apresentou mudanças significativas.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se comentar que dentre todos os fatores que influenciam na eficiência energética dos protótipos, a aerodinâmica é o que possui maior facilidade de estudos visando melhoria de consumo energético por necessitar de um menor investimento quando comparado com melhorias na fonte de energia ou aplicação de materiais na construção, os quais necessitam de custos elevados para aplicação.

O presente trabalho proporcionou a obtenção de amplo conhecimento relacionado a aerodinâmica, possibilitando a construção de uma metodologia de simulação fluidodinâmica para análises e projetos de carenagens de protótipos de eficiência energética da equipe Tuba Turbo.

Foi possível efetuar um estudo simplificado na carenagem do protótipo atual da equipe visando a diminuição do coeficiente de arrasto do veículo a partir de propostas de melhorias qualitativas. A análise dos resultados obtidos da simulação fluidodinâmica da geometria da carenagem atual permitiu a identificação de região que influenciavam negativamente o coeficiente de arrasto do veículo da equipe.

A proposta de melhoria apresentada no trabalho demonstrou minimizar a maior parte dos problemas identificados. Além disto, foi possível notar um ganho de aproximadamente 50% na diminuição do coeficiente de arrasto comparando a carenagem simplificada do protótipo atual e a nova proposta simplificada apresentada.

É interessante ressaltar que as rodas e estrutura de fixação das mesmas foram desconsideradas na simulação do protótipo atual, o que não ocorreu na simulação da nova proposta devido a adição da carenagem sobre as rodas, além da desconsideração dos raios laterais para a simulação da nova geometria de carenagem. Todos estes fatores indicam que o ganho aerodinâmico provavelmente deve ser maior do que o apresentado no presente trabalho.

A utilização da técnica de blocagem manual possibilitou um grande controle dos parâmetros relativos qualidade dos elementos de malha como ângulo mínimo e razão de aspecto máxima, além de permitir a aplicação de refinamento de malha necessário em regiões específicas. Em contrapartida a blocagem manual acaba se tornando inviável à medida que a complexidade da geometria estudada aumenta, sendo necessário a aplicação de algumas simplificações para viabilizar a construção da malha utilizando a técnica em questão.



## 9.1 Sugestões para trabalhos futuros

Alguns comentários devem ser feitos a fim de facilitar e direcionar estudos posteriores relacionados a futuras melhorias aerodinâmicas nos protótipos de eficiência energética da equipe Tuba Turbo.

Para futuras análises será necessária a mudança da estratégia de confecção de malha para geração automática devido à grande complexidade das possíveis propostas de geometrias futuras, inviabilizando a utilização da técnica de blocagem manual.

É recomendado que para futuros trabalhos os estudos de melhorias sejam efetuados de forma isolada, analisando cada ponto de influência de forma separada e aprofundada. É possível citar como possíveis estudos, a análise do ângulo de saída traseiro ótimo, a definição da altura ótima do veículo em relação ao solo, implementação de raios nas regiões lateral e frontal visando ganho aerodinâmico, dentre outros.

Por fim, é importante destacar que todos os estudos de melhoria devem levar em consideração os processos de fabricação utilizados para a confecção da carenagem e do chassi dos protótipos, a fim de garantir a possibilidade de construção dos perfis propostos.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, S. R.; RAMM, G.; FALTIN, G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. **SAE Transactions**, v. 93, p. 473-503, 1984.
- ASSI, Gustavo R. S., BUSCARIOLO, Filipe F., SHERWIN, Spencer J. Computational study on an Ahmed Body equipped with simplified underbody diffuser, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Volume 209, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610520303214>.
- BURDEN, Richard L., FAIRES, J. Douglas. **Análise numérica**: Tradução da 8ª edição norte americana. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- ÇENGEL, Yunus A., CIMBALA, John M. **Mecânica dos Fluidos**: Fundamentos e Aplicações. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: AMGH Editora Ltda., 2012.
- Equipe ESSS. Blog ESSS. **Fluidodinâmica computacional**: o que é?. 24 Jun. 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>. Acesso em: 10 out. 2021.
- Equipe ESSS. Blog ESSS. **Métodos numéricos para simulação na engenharia**. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodos-numericos-para-simulacao-na-engenharia/>. Acesso em: 12 out. 2021.
- FERRARI, Jalusa Maria da Silva. **Simulação numérica do escoamento turbulento sobre o corpo de Ahmed**. 2019. 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Aeroespacial, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- FERZIGER, Joel H., PERIC, Milovan. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. rev. ed, - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.
- FOX, R.; T., MCDONALD, A.; J., PRITCHARD, P.; W., MICHELL, J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 9ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2018. 9788521635000. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521635000/>. Acesso em: 24 out. 2021.
- GEORGE, Albert R. **Aerodynamic Effects of Shape, Camber, Pitch, and Ground Proximity on Idealized Ground-Vehicle Bodies**. Cornell University: Journal of Fluids Engineering, 1981.
- HUCHO, Wolf-Heinrich. **Aerodynamics of Road Vehicles**. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1998.
- HUCHO, Wolf-Heinrich. **Aerodynamics of road vehicles**: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. Great Britain: University Press Cambridge, 1987.
- 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.

KATZ, Joseph. **Automotive Aerodynamics**. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2016.

KORKISCHKO, Ivan. **Investigação experimental e simulação numérica do escoamento ao redor de um modelo automobilístico: corpo de Ahmed**. São Paulo. USP. 2006. Disponível em: [http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2006/Artigos/Art\\_TCC\\_056\\_2006.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2006/Artigos/Art_TCC_056_2006.pdf). Acesso em: 10 out. 2021.

LAUNDER, B. E.; SHARMA, B. **Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc**. Letters in heat and mass transfer, Pergamon, v. 1, n. 2, p. 131–137, 1974.

MENTER, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, **AIAA Journal**, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, 1994.

MOAVENI, Saeed. **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. USA, New Jersey, Upper Saddle River: Prentice-Hall, inc, 2014. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM738/Livros/Finite%20Element%20Analysis,%20Theory%20and%20application%20with%20ANSYS,%20.pdf>. Acesso em: 12 out. 2021.

REZENDE, André L. T., ARAÚJO, Fernando N. Características de modelos RANS aplicados ao escoamento sobre uma placa plana. **Anais da 8ª Escola de Primavera de Transição e Turbulência**, São Paulo, p. 140-148, 2012.

SANTOS, Adalberto R., SILVA, Bruno W. X., NETO, Francisco S., et Al. **Elaboração de túnel de vento para aplicações de ensaios aerodinâmicos**. 2014. 39 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Técnico em mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo. São José dos Campos, 2014.

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

SUSH, Matheus Rosa. **Análise aerodinâmica de um veículo de eficiência energética**. 2018. 53 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

TONET, Christian Roberto. **Estudo fluidodinâmico computacional aplicado a um protótipo de eficiência energética para competições na Shell Eco-Marathon**. 2019. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

VERGEL, J. L. G. **Estudo da influência da malha computacional, modelos de turbulência e aspectos numéricos da modelagem CFD em impelidores PBT usando malhas não estruturadas**. 2013. 121 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2013.

WHITE, Frank. M. *Mecânica dos Fluidos*. Rio Grande do Sul, Porto Alegre: Grupo A, 2018. 9788580556070. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580556070/>. Acesso em: 24 out. 2021.

WILCOX, D. C. et al. **Turbulence modeling for CFD**. [S.l.]: DCW industries La Canada, CA, v. 2, 1993.

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.