

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JÚLIA BENTEIO MARTINS**

**SOPHIA ANNA D'HAESE ROENNFELDT**

**ESTUDO AERODINÂMICO DA CARENAGEM DO PROTÓTIPO DE VEÍCULO  
DO PROJETO DE EXTENSÃO DA SHELL ECOMARATHON**

**CURITIBA**

**2022**

**JÚLIA BENTEIO MARTINS  
SOPHIA ANNA D'HAESE ROENNFELDT**

**ESTUDO AERODINÂMICO DA CARENAGEM DO PROTÓTIPO DE VEÍCULO  
DO PROJETO DE EXTENSÃO DA SHELL ECOMARATHON**

**Aerodynamic study of the vehicle prototype from the Shell Ecomarathon  
extension project**

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Matos Germer

**CURITIBA**

**2022**



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

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**JÚLIA BENTEIO MARTINS  
SOPHIA ANNA D'HAESE ROENNFELDT**

**ESTUDO AERODINÂMICO DA CARENAGEM DO PROTÓTIPO DE VEÍCULO  
DO PROJETO DE EXTENSÃO DA SHELL ECOMARATHON**

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

Data de aprovação: 01/dezembro/2022

---

Eduardo Matos Germer  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Moises Alves Marcelino Neto  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rodrigo Schlischtig  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA  
2022**

Dedicamos este trabalho as nossas famílias,  
amigos e a todos que fizeram parte da nossa  
trajetória de graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a todos que fizeram parte da nossa jornada de graduação.

As nossas famílias pelo apoio incondicional dado, incentivando nos momentos difíceis e compreendendo as ausências nos momentos em que nos dedicávamos à realização de projetos acadêmicos.

Aos amigos feitos nesta jornada, que sempre estiveram ao nosso lado, pela amizade incondicional, pelo apoio demonstrado durante a realização deste trabalho e durante todo o período de graduação.

Aos professores desta instituição, por todos os conselhos, ajudas e ensinamentos passados, que nos permitiram apresentar um melhor desempenho neste processo de formação profissional. Em especial ao Prof. Dr. Eduardo Matos Germer que nos guiou na execução deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por oferecer grandes oportunidades e infraestrutura ao longo dos últimos cinco anos, mesmo nas adversidades.

Aos nossos colegas da equipe Relampinhão, agradecemos a oportunidade de fazer parte da fundação desta equipe, na tentativa de que o ensino se torne cada vez mais aliado as praticas cotidianas da profissão, com desenvolvimento de soluções criativas. Que a equipe seja um bom legado deixado por nós nesta instituição, incentivando a formação de profissionais cada vez mais completos.

*"A imaginação é mais importante que o conhecimento, porque o conhecimento é limitado, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro"*  
Einstein (1929)

## RESUMO

Estudos em aerodinâmica veicular têm sido cada vez mais comuns nas últimas décadas, devido ao interesse em veículos mais eficientes energeticamente, com baixo impacto ao meio ambiente e consumo de combustível reduzido. O objetivo deste trabalho consiste na análise aerodinâmica de três geometrias de protótipos de veículos, a fim de definir o melhor design para o próximo carro da equipe Relampinhão UTFPR que compete na Shell Eco-Marathon, uma competição que desafia estudantes do mundo inteiro a projetar e construir veículos de alta eficiência energética. Dois novos modelos de carenagem são propostos para comparação com o veículo atual da equipe, projetado para a categoria *Prototype-Etanol* de 2022. A análise é feita com base no coeficiente de arrasto, obtido por meio de simulação numérica CFD em duas dimensões (2D) com o *Software Ansys Fluent*®. Para simular as condições, os resultados serão obtidos baseados nas equações médias de Reynolds (RANS) para isso, foi escolhido o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  devido ao fato de ser amplamente utilizado para escoamentos externos com gradiente de pressão relativamente baixo. O modelo numérico foi validado a partir dos resultados de coeficiente de arrasto obtidos para o corpo de Ahmed em experimentos realizados em túneis de vento, com um erro de 2,07%. A geometria atual da equipe atingiu um coeficiente de arrasto de 0,3111, a primeira geometria proposta, Geometria 2, atingiu um coeficiente de arrasto de 0,1356 e a Geometria 3 atingiu um coeficiente de arrasto de 0,2447. Com isso, ao final deste trabalho, foi possível definir a Geometria 2 como a próxima a ser fabricada pela equipe.

**Palavras-chave:** aerodinâmica; shell eco-marathon; arrasto; eficiência energética; .

## ABSTRACT

Studies in vehicle aerodynamics are growing in the past decades, due to increased interest in highly efficient vehicles with low environmental impact and low fuel consumption. This work aims to analyze the aerodynamics of three vehicle prototypes designed for the Shell Eco-Marathon competition, and evaluate which one is more suited to be used by Relampinhão UTFPR team in the next edition of the contest. Shell Eco-Marathon is a contest that challenges students around the globe to design and manufacture a highly efficient car. Two new designs are proposed to be compared with the vehicle currently used by the team, which was designed to compete in the Prototype-Ethanol category in 2022. The analysis was done through evaluation of the drag coefficient, which was obtained through bidimensional CFD numerical simulations in the Ansys Fluent ® Software. To simulate flow conditions, the results were based on Reynolds averaged equations (RANS) and the  $\kappa$ - $\epsilon$  turbulence model was chosen due to its wide use in external flows with low pressure gradient. The turbulence model was validated with results obtained for the Ahmed body in wind tunnel experiments, with an error of 2,07%. The current vehicle geometry has a drag coefficient of 0,3111, the first proposed geometry, has a drag coefficient of 0,1356 and with the second proposal a drag coefficient of 0,2447 was achieved. With that analysis, at the end of this study, it was defined that the first proposed geometry will be the next one used by the team.

**Keywords:** aerodynamics; shell eco-marathon; drag; energy efficiency; .



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perdas energéticas em um veículo no ciclo urbano/estrada, respectivamente . . . . .	19
Figura 2 – Eficiência de consumo de combustível em relação ao coeficiente de arrasto, $C_d$ . . . . .	20
Figura 3 – Carros alinhados para fotografia no primeiro dia de Shell Eco-marathon Brasil no Riocentro, Rio de Janeiro . . . . .	21
Figura 4 – Curi 1, primeiro carro da equipe Relampinhão, durante a competição da SEM no Rio de Janeiro em 2022 . . . . .	22
Figura 5 – Esteira atrás de um veículo convencional e o veículo de Rumpier . . . . .	26
Figura 6 – Evolução da aerodinâmica veicular no tempo . . . . .	27
Figura 7 – Comportamento da camada limite durante o comprimento de um corpo . . . . .	28
Figura 8 – Variação do perfil de velocidades ao longo da linha de corrente em torno de um corpo sólido submetido ao escoamento . . . . .	28
Figura 9 – Descontinuidade das linhas de corrente . . . . .	29
Figura 10 – Formação de vórtices devido ao descolamento da camada limite . . . . .	29
Figura 11 – Deslocamento da camada limite para um escoamento turbulento . . . . .	30
Figura 12 – Coeficiente de arrasto sobre uma estrutura carenada como uma função da razão de espessura, mostrando as contribuições do atrito superficial e da pressão sobre o arrasto total. . . . .	30
Figura 13 – Área de referência para determinação do coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) . . . . .	32
Figura 14 – Forças em um objeto bidimensional submerso. (a) forças de pressão e (b) forças de atrito . . . . .	33
Figura 15 – Convergência dos valores de coeficiente de arrasto em função do aumento do refino da malha . . . . .	35
Figura 16 – PAC-Car II . . . . .	37
Figura 17 – Eco-Arrow - Protótipo da equipe polonesa Iron Warriors . . . . .	37
Figura 18 – (a) Eco-Arrow (b) Protótipo 1 (c) Protótipo 2 (d) Protótipo 3 . . . . .	38
Figura 19 – Modelo avaliado por Czyż, Karpiński e Koçak (2019) . . . . .	38
Figura 20 – Nebula . . . . .	39
Figura 21 – Protótipos vencedores em diferentes categorias . . . . .	40

Figura 22 – Fluxograma das atividades . . . . .	42
Figura 23 – Fluxograma das atividades de design utilizadas no projeto do PAC-Car II	43
Figura 24 – Dimensões gerais e geometria do modelo atual utilizado pela equipe Relampinhão, Curi 1 . . . . .	45
Figura 25 – Geometria 2 - Dimensões gerais . . . . .	46
Figura 26 – Detalhe do formato de gota e dos tamanhos de comprimento de corda e espessura. . . . .	46
Figura 27 – Geometria 3 - Dimensões gerais . . . . .	47
Figura 28 – Dimensões do corpo de Ahmed . . . . .	48
Figura 29 – Tamanho do domínio a ser utilizado nas simulações . . . . .	49
Figura 30 – Condições de contorno . . . . .	51
Figura 31 – Área frontal projetada ( $A_p$ ), utilizada como <i>setup</i> no <i>software</i> . . . . .	51
Figura 32 – Convergência do resultado do coeficiente de arrasto vs o número de Iterações para as malhas 1, 2 e 3 testadas para o Corpo de Ahmed . . . . .	53
Figura 33 – Convergência do coeficiente de arrasto vs o número de iterações para as malhas 1, 2 e 3 testadas para a Geometria 1. . . . .	54
Figura 34 – Convergência do coeficiente de arrasto vs o número de iterações para as malhas 1, 2 e 3 testadas para a Geometria 2. . . . .	54
Figura 35 – Convergência do coeficiente de arrasto vs o número de iterações para as malhas 1, 2 e 3 testadas para a Geometria 3. . . . .	54
Figura 36 – Resultados gráficos para validação do modelo utilizando o corpo de Ahmed. Em (a) Vetores de velocidade e (b) Coeficiente de pressão. . . . .	55
Figura 37 – Comparação qualitativa entre as linhas de corrente encontradas experi- mentalmente por Ahmed, Ramm e Faltin (1984) (a) e pela presente simu- lação (b). É possível observar nas duas figuras a formação dos Vórtices de padrão A e B . . . . .	56
Figura 38 – Contorno de velocidade na Geometria 1. . . . .	57
Figura 39 – Coeficiente de pressão na Geometria 1. . . . .	58
Figura 40 – <i>Streamline</i> na Geometria 1, com a presença da formação de vórtices na parte posterior. . . . .	58
Figura 41 – Contorno de velocidade na Geometria 2. . . . .	59
Figura 42 – Coeficiente de pressão na Geometria 2. . . . .	60

<b>Figura 43 – <i>Streamline</i> na Geometria 2. . . . .</b>	<b>60</b>
<b>Figura 44 – Contorno de velocidade na Geometria 3. . . . .</b>	<b>61</b>
<b>Figura 45 – Detalhe do contorno de velocidade na região traseira do veículo para a Geometria 3, com a formação de vórtices. . . . .</b>	<b>61</b>
<b>Figura 46 – Coeficiente de pressão na Geometria 3. . . . .</b>	<b>62</b>
<b>Figura 47 – <i>Streamline</i> na Geometria 3. . . . .</b>	<b>62</b>
<b>Figura 48 – Comparação entre os coeficientes de arrasto obtidos nas Geometrias 1, 2 e 3. . . . .</b>	<b>63</b>
<b>Figura 49 – Gráfico residual para verificar a convergência do corpo de Ahmed. . . . .</b>	<b>69</b>
<b>Figura 50 – Gráfico residual para verificar a convergência da geometria 1. . . . .</b>	<b>69</b>
<b>Figura 51 – Gráfico residual para verificar a convergência da geometria 2. . . . .</b>	<b>70</b>
<b>Figura 52 – Gráfico residual para verificar a convergência da geometria 3. . . . .</b>	<b>70</b>
<b>Figura 53 – Exemplo de malha estruturada, bidimensional . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>Figura 54 – Exemplo de malha de bloco estruturada, bidimensional, aplicada a um perfil NACA. . . . .</b>	<b>72</b>
<b>Figura 55 – Exemplo de malha não estruturada . . . . .</b>	<b>73</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Resultados experimentais de coeficiente de arrasto obtidos por diferentes autores . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 2 – Medidas de domínio utilizadas por diferentes autores . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 3 – Condições de contorno para ambos os modelos . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 4 – Condições de contorno singulares de cada Geometria . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 5 – Resultados para malhas 1, 2 e 3 do Corpo de Ahmed e diferença percentual entre os resultados obtidos por cada malha . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 6 – Resultados para malhas 1, 2 e 3 da Geometria 1 e diferença percentual entre os resultados obtidos por cada malha . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 7 – Resultados para malhas 1, 2 e 3 da Geometria 2 e diferença percentual entre os resultados obtidos por cada malha . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 8 – Resultados para malhas 1, 2 e 3 da Geometria 3 e diferença percentual entre os resultados obtidos por cada malha . . . . .</b>	<b>53</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 – Geometrias que serão analisadas . . . . .</b>	<b>44</b>
---	-----------

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### Siglas

BOE	Barril Equivalente de Petróleo
CAD	Desenho assistido por computador
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
GNV	Gás Natural Veicular
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
RANS	Equações Médias de Reynolds
SEM	Shell Eco-Marathon
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

$A_p$	Área Projetada	$[m^2]$
$C_d$	Coefficiente de Arrasto	$[-]$
$C_L$	Coefficiente de Sustentação	$[-]$
$L$	Comprimento	$[m]$
$F_D$	Força de Arrasto	$[N]$
$F_L$	Força de Sustentação	$[N]$
$g$	Gravidade	$[m/s^2]$
$H$	Altura	$[m]$
$P$	Pressão Estática Local	$[Pa]$
$P_f$	Pressão de escoamento	$[N]$
$Re$	Número de Reynolds	$[-]$
$T$	Temperatura	$[K]$
$u$	Velocidade em x	$[m/s]$
$V$	Velocidade	$[m/s]$
$v$	Velocidade em y	$[m/s]$
$W$	Largura	$[m]$

### Letras Gregas

$\mu$	Viscosidade dinâmica	$[kg/(m \cdot s)]$
$\nu$	Viscosidade cinemática	$[m^2/s]$
$\rho$	Massa específica	$[kg/m^3]$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	Contexto do tema	18
1.2	Caracterização do Problema	19
1.3	Caracterização da oportunidade	21
1.4	Objetivos	23
1.4.1	Objetivo Geral	23
1.4.2	Objetivos Específicos	23
1.5	Justificativa	23
1.6	Enquadramento na Engenharia Mecânica	24
1.7	Etapas do trabalho	24
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>26</b>
2.1	Desenvolvimento da aerodinâmica	26
2.2	Aerodinâmica Veicular	27
2.2.1	Escoamento sobre superfícies não planas	27
2.3	Número de Reynolds	31
2.4	Equação de Navier-Stokes e da continuidade	31
2.5	Coefficientes de Arrasto e Sustentação	32
2.6	Modelo de Turbulência	33
2.6.1	Modelo $k-\epsilon$	34
2.7	Malhas	34
2.8	Revisão Bibliográfica	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
3.1	Preparação do modelo em CAD	42
3.1.1	Requisitos da Competição	43
3.1.2	Geometria 1 - Curi 1	45
3.1.3	Geometria 2	45
3.1.4	Geometria 3	47
3.2	Validação do Modelo Numérico	47
3.3	Malhas	49
3.3.1	Qualidade da Malha	50



3.4	Condições de Contorno . . . . .	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	52
4.1	Análise da qualidade de malha . . . . .	52
4.2	Validação do Modelo Numérico . . . . .	55
4.3	Resultados da Geometria 1 . . . . .	57
4.4	Resultados da Geometria 2 . . . . .	59
4.5	Resultados da Geometria 3 . . . . .	60
4.6	Comparação de resultados e definição da próxima geometria . . . . .	63
5	CONCLUSÃO . . . . .	64
	REFERÊNCIAS . . . . .	65
	APÊNDICE A GRÁFICOS RESIDUAIS DO <i>SOFTWARE ANSYS</i> . . . . .	69
	APÊNDICE B TIPOS DE MALHAS . . . . .	72
	B.1 Malha Estruturada . . . . .	72
	B.2 Malha Bloco Estruturada . . . . .	72
	B.3 Malha não Estruturada . . . . .	73

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do tema

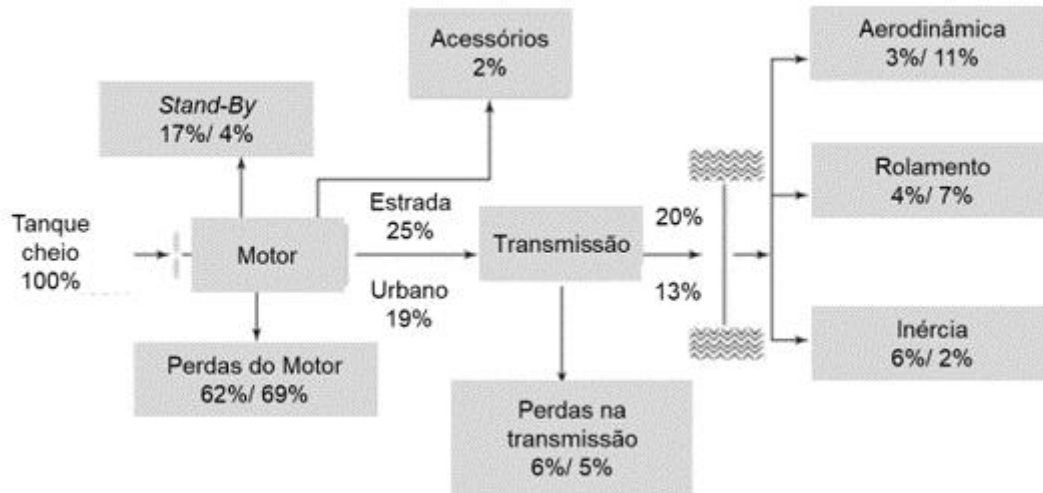
Assuntos relacionados ao meio ambiente como a preservação da fauna e flora, dos recursos naturais, as mudanças climáticas e o avanço do efeito estufa têm entrado cada vez mais nas pautas de discussões globais. Acordos e encontros de líderes de várias nações buscam unir os países para discutir e implementar medidas de desenvolvimento sustentável e de preservação ambiental para o planeta.

Neste contexto, vários acordos internacionais vêm sendo firmados ao longo dos anos, entre eles o Acordo de Paris sobre o Clima, em 2015, que tem como principal objetivo a redução de emissão de gases do efeito estufa (ONU, 2015a). A Organização das Nações Unidas (ONU) (2015b) criou 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são um apelo global para atingir o desenvolvimento sustentável em todas as nações. Os objetivos abrangem vários problemas atuais como a pobreza, a fome e as desigualdades. O objetivo 13, mais especificamente, busca ações que visam mitigar as mudanças climáticas globais, através de medidas urgentes para combater as causas dessas mudanças e reduzir seus impactos (ONU, 2015b).

Entre as ações que têm sido tomadas, visando conter o avanço das mudanças climáticas negativas e a diminuição da emissão de gases do efeito estufa, destaca-se um amplo conjunto de medidas de contenção que devem ser implementadas, como a melhora na eficiência energética, a utilização de energias renováveis e mudanças nas técnicas do setor agropecuário e de transportes (ROVERE, 2016). De acordo com estudos realizados em 2015, a respeito do consumo de energia e o potencial de ganho em eficiência energética em diferentes cenários macroeconômicos, o setor de transporte aparece em segundo lugar com o maior consumo de energia, atrás apenas do setor industrial, e com o maior potencial para que medidas relacionadas ao aumento eficiência energética sejam aplicadas (ALTOÉ *et al.*, 2017). As ações variam desde o reparo de rodovias, o reativamento de ferrovias, a criação de vias navegáveis, o desenvolvimento de veículos mais eficientes e a ampliação do uso de biocombustíveis (ALTOÉ *et al.*, 2017).

A eficiência energética veicular pode ser definida como “a energia mecânica útil produzida pelo veículo para cada unidade de energia fornecida pelo combustível que alimenta este veículo” (SMITH, 2010, p. 35). Segundo Council *et al.* (2002), as perdas de energia são distribuídas como indicado na Figura 1, cerca de dois terços das perdas ocorrem durante a conversão da energia química do combustível em energia mecânica no motor, além de perdas no sistema de transmissão, refrigeração, frenagem e arrasto aerodinâmico. A Figura 1 retrata os diferentes subsistemas do carro em que podem ocorrer perdas, nos subsistemas que apresentam mais de uma porcentagem, a primeira representa as perdas em ciclos urbanos e a segunda em ciclos na estrada.

Figura 1 – Perdas energéticas em um veículo no ciclo urbano/estrada, respectivamente



Fonte: Adaptado de Study (2006).

Os veículos têm se tornado energeticamente mais eficientes com a adoção de novas tecnologias, além de aprimoramentos visando a redução do coeficiente de arrasto aerodinâmico, redução da massa do veículo e a redução do coeficiente de rolamento (SMITH, 2010). Além disso, novos sistemas de propulsão de veículos, como veículos elétricos a bateria e veículos elétricos híbridos, bem como a utilização de biocombustíveis, se tornam cada vez mais comuns.

Os biocombustíveis são produzidos através da biomassa, que pode ser retirada de diversas fontes, sejam elas vegetais ou animais (OLIVEIRA; CRUZ; FERREIRA, 2021). Como possuem diversas fontes renováveis como matéria-prima, os biocombustíveis não causam impactos ambientais tão elevados, quando comparados aos combustíveis fósseis (OLIVEIRA; CRUZ; FERREIRA, 2021).

Além da questão ambiental, o aumento constante no preço do combustível justifica os investimentos em pesquisa e desenvolvimento de veículos mais eficientes. Atualmente, existem várias empresas que investem no desenvolvimento de soluções e tecnologias nesta área, uma delas é a Shell, que promove anualmente a competição de eficiência energética denominada Shell Eco-Marathon.

## 1.2 Caracterização do Problema

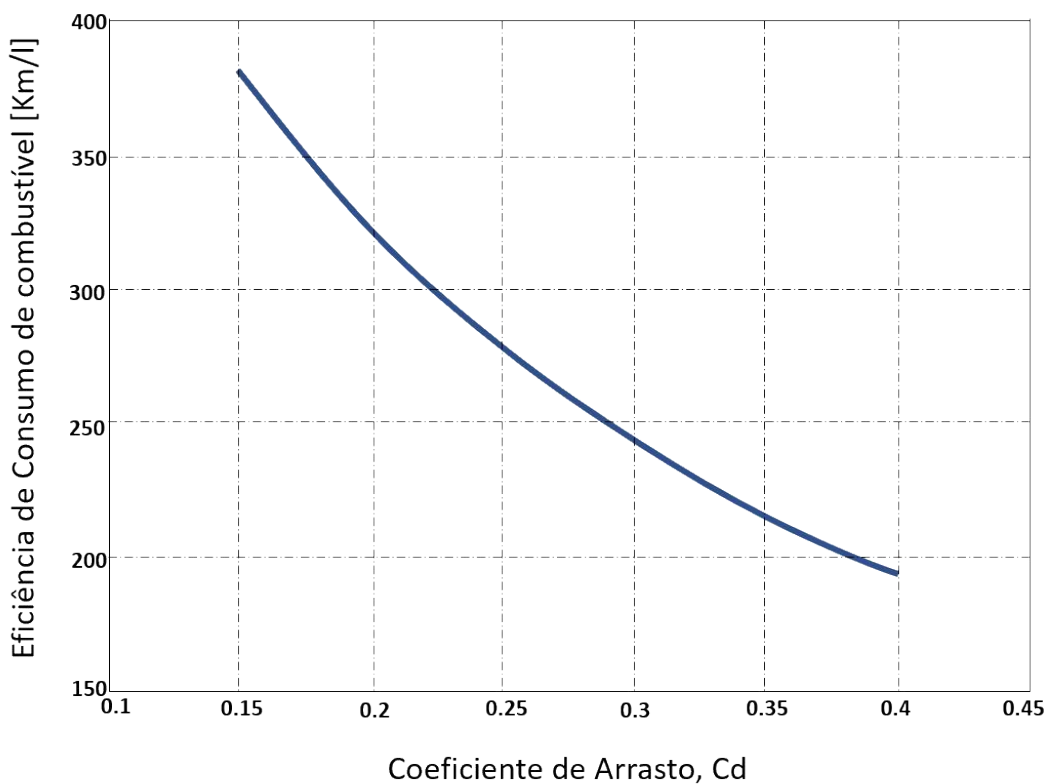
Conforme discutido na seção anterior, existem diversas formas de ganho de eficiência energética e melhora do desempenho de veículos, uma dessas formas é a análise da aerodinâmica, visando a redução do coeficiente de arrasto.

A aerodinâmica veicular é uma das áreas da mecânica dos fluidos que estuda os efeitos do escoamento do ar sobre a superfície de um veículo. Com isso, é possível analisar a magnitude e o comportamento das forças de arrasto aerodinâmico, entendendo como elas afetam o deslocamento de um veículo. Em geral, para veículos de alta eficiência energética, é necessá-

rio minimizar as forças de arrasto, para diminuir o esforço necessário para colocar e manter o veículo em movimento.

Reduzir o coeficiente de arrasto aerodinâmico pode, além de aumentar a velocidade máxima de um veículo, reduzir o consumo de combustível e aumentar o conforto dos passageiros (MANSOUR; AFIFY; KASSEM, 2020). A eficiência energética, que pode ser medida através do consumo de combustível, varia consideravelmente conforme o coeficiente de arrasto (GRUNDITZ; JANSSON, 2009), como pode-se observar na Figura 2, nela é possível perceber que a eficiência é maior para baixos coeficientes de arrasto.

**Figura 2 – Eficiência de consumo de combustível em relação ao coeficiente de arrasto, Cd**



**Fonte: Adaptado de Grunditz e Jansson (2009).**

Uma redução de 10% no arrasto aerodinâmico pode resultar em uma melhoria de 1 a 2% na redução de consumo de combustível do veículo (STUDY, 2006). Além do coeficiente de arrasto, outros parâmetros podem influenciar no consumo de combustível como a massa total do veículo, a área de seção transversal, entre outros (GRUNDITZ; JANSSON, 2009).

Com isso é possível perceber que a redução das forças de arrasto têm um papel importante no desempenho e no consumo de combustível de um veículo.

### 1.3 Caracterização da oportunidade

A competição promovida pela Shell, a Shell Eco-Marathon (SEM), é um evento criado para incentivar estudantes do mundo inteiro a pesquisar e desenvolver veículos ultra eficientes, capazes de percorrer a maior distância, com o menor consumo de combustível possível (SHELL ECO-MARATHON, 2022).

A Shell Eco-Marathon possui duas categorias principais a *Prototype*, cujo objetivo é minimizar o consumo de combustível com otimização da geometria do protótipo para máxima performance, e a categoria *Urban Concept*, cujo objetivo, além da eficiência energética, é de que os veículos tenham um design mais próximo aos modelos de microcarros. Na competição brasileira, dentro dessas duas categorias existem subcategorias que se dividem de acordo com o tipo de energia utilizada para propulsão: gasolina, etanol ou bateria elétrica (SHELL ECO-MARATHON, 2022).

A competição Shell Eco-Marathon ocorre no mundo inteiro, no Brasil a cidade sede da competição é o Rio de Janeiro. As equipes que obtêm maior desempenho nesta etapa, podem disputar a competição na etapa das Américas, nos Estados Unidos. A Figura 3 representa o alinhamento dos carros em uma competição da SEM no Brasil.

**Figura 3 – Carros alinhados para fotografia no primeiro dia de Shell Eco-marathon Brasil no Rio-centro, Rio de Janeiro**



Fonte: (SHELL, 2020).

A equipe Relampinhão, projeto de extensão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba, foi fundada em 2020, para desenvolver um protótipo e competir na Shell Eco-Marathon dentro da categoria de *Prototype* etanol. A equipe participou da competição pela primeira vez na etapa Brasil, que ocorreu no Rio de Janeiro em agosto de 2022, com o primeiro carro da equipe, o Curi 1, que pode ser visto na Figura 4.

**Figura 4 – Curi 1, primeiro carro da equipe Relampinhão, durante a competição da SEM no Rio de Janeiro em 2022**



**Fonte: Autoria da equipe (2022).**

A equipe é composta por alunos de graduação da UTFPR, sendo a sua maioria do curso de Engenharia Mecânica. A Relampinhão é dividida em 6 subsistemas sendo eles: *powertrain*, direção e freio, estruturas, design e aerodinâmica, elétrica e eletrônica, marketing e administrativo.

O subsistema de estruturas, design e aerodinâmica, é responsável por projetar o chassi e a carenagem do veículo. O primeiro protótipo da equipe, o Curi 1, possui chassi de aço e a carenagem em fibra de vidro. Para os próximos projetos o objetivo é utilizar materiais mais leves para melhorar o desempenho geral do veículo na competição. A aerodinâmica da carenagem também deve ser aprimorada para os próximos protótipos.

Durante o desenvolvimento do primeiro protótipo do veículo em 2021, a influência das forças de arrasto aerodinâmico não foi levada em consideração. Para melhorar o desempenho do veículo para o segundo protótipo, tornam-se necessários os conhecimentos de mecânica dos fluidos para projetar uma carenagem visando um melhor desempenho aerodinâmico para atingir menores forças de arrasto.

Além de aspectos aerodinâmicos, o projeto de um carro de competição para a SEM deve respeitar certos requisitos do regulamento da competição, que interferem nas dimensões e no projeto geral do veículo. Uma boa carenagem deve apresentar uma ampla visibilidade, ergonomia e segurança para o piloto, deve proteger o motor e outros componentes do veículo e facilitar o acesso a eles, também é interessante construir e manter a identidade visual da equipe através do design e das cores do carro.

O projeto do novo protótipo de carro da equipe será feito a partir de lições aprendidas na construção e desenvolvimento do primeiro protótipo, bem como de sugestões e práticas consagradas por outras equipes, sempre levando em conta as restrições impostas pelo regulamento da competição que garantem segurança e igualdade no julgamento e performance das equipes. Por esses motivos, é necessário projetar uma carenagem com um coeficiente de arrasto menor, possibilitando um consumo de combustível reduzido e um carro mais competitivo para a próxima edição da competição.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo Geral

Definir a geometria do carro da competição Shell Eco-Marathon 2023, partindo de duas geometrias propostas e comparando-as com a geometria atual. O parâmetro usado para isto será o coeficiente de arrasto, obtido por simulações de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), considerando uma modelagem bidimensional (2D).

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Modelar a geometria de 3 protótipos (modelo atual e 2 novas propostas), utilizando as regras oficiais da Shell Eco-Marathon 2022;
- Validar um modelo numérico comparando os dados numéricos (2D) obtidos aos dados experimentais de Ahmed, Ramm e Faltin (1984);
- Comparar a influência do arrasto no modelo atual da equipe Relampinhão com os modelos propostos e com isso definir a próxima geometria a ser utilizada pela equipe.

## 1.5 Justificativa

Com objetivo de construir um protótipo de veículo competitivo, a equipe Relampinhão tem que se preocupar com diversos fatores, sendo que, para a carenagem, os mais importantes são: a aerodinâmica, a massa total do protótipo e a resistência mecânica. Devido ao fato de a equipe ter sido fundada há menos de dois anos, fatores financeiros e inexperiência em competições, o primeiro carro, o Curi 1, foi modelado visando a construção do primeiro carro-piloto para aprendizagem dos membros da equipe e para experiência na execução do projeto, sendo assim, estudos aerodinâmicos não foram levados em conta.

Desta forma, a equipe trabalha para aperfeiçoar diversos fatores, otimizando a estrutura do chassi e a carenagem para o projeto do próximo carro, o Curi 2. De forma que, torna-se fundamental o aperfeiçoamento da aerodinâmica do novo protótipo para as próximas competições, com o auxílio da dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics (CFD)*), e de conceitos da mecânica dos fluidos.

Além disso, os projetos de extensão possuem uma alta rotatividade de membros, e para que o projeto continue crescendo e prosperando, é importante a documentação dos conhecimentos adquiridos. Então, este trabalho poderá ser utilizado como material de consulta por membros da equipe Relampinhão, por outras equipes que também competem na competição

da Shell Eco-Marathon e por estudantes que desejem aprofundar conceitos de aerodinâmica veicular.

## 1.6 Enquadramento na Engenharia Mecânica

A Engenharia Mecânica é uma forte aliada no desenvolvimento de veículos e em toda a indústria automotiva. Para projetar um carro é necessário conhecimento em dinâmica veicular, *powertrain*, freios, projeto de estruturas, elétrica e eletrônica, aerodinâmica entre outros.

Para fazer os estudos, simulações e propostas de modelos de carenagem do Curi 2, para a equipe de competição da Shell Eco-Marathon da UTFPR Curitiba, serão aplicados os conhecimentos adquiridos na área de ciências térmicas, principalmente em mecânica dos fluidos e aerodinâmica. Ferramentas de modelagem geométrica e simulação em CFD, também tornam-se fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, bem como conhecimentos adquiridos ao longo do curso, necessários para projeto de peças e componentes mecânicos como a carenagem do veículo.

## 1.7 Etapas do trabalho

Esse Trabalho de Conclusão de Curso será dividido em 5 capítulos. No primeiro capítulo, Introdução, foi feita uma breve revisão acerca da questão ambiental e foi discutido como a aerodinâmica de veículos pode provocar um aumento da eficiência energética e, conseqüentemente, uma diminuição no consumo de combustíveis. Neste contexto, foi apresentada a competição Shell Eco-Marathon (SEM) e a equipe Relampinhão, que representa a UTFPR Curitiba na competição, na categoria *Prototype* etanol.

O segundo capítulo contém a fundamentação teórica para o desenvolvimento do projeto. Nele serão apresentados um breve histórico sobre aerodinâmica veicular, os fundamentos teóricos de ciências térmicas necessários para o desenvolvimento do projeto, tais como escoamentos em superfícies não planas, número de Reynolds, Equações de Navier-Stokes, os coeficientes de arrasto e sustentação e o modelo de turbulência que será utilizado no desenvolvimento do projeto. Também será feita uma revisão bibliográfica de veículos desenvolvidos por outras equipes para competir na Shell Eco-Marathon em todo o mundo.

No terceiro capítulo são apresentadas as metodologias que serão aplicadas no desenvolvimento do projeto. São propostas as novas geometrias para avaliação aerodinâmica, bem como o modelo atual utilizado pela equipe. A metodologia de validação do modelo numérico, o domínio computacional para criação de malhas e as condições de contorno também são apresentadas.

O quarto capítulo é dedicado ao estudo das malhas para as simulações numéricas, os resultados obtidos nas simulações para validação do modelo numérico e para as três geometrias



propostas, com a avaliação do coeficiente de arrasto e escolha da geometria mais adequada para o próximo protótipo da equipe.

O quinto capítulo apresenta as considerações finais da equipe e sugestões para próximos estudos relacionados.

Como fechamento do primeiro capítulo, é ressaltada a importância da aerodinâmica para o desenvolvimento de veículos mais eficientes, e das competições em nível universitário que promovem o estudo e desenvolvimento em diversas áreas da engenharia. Foi demonstrado que diversos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de engenharia mecânica serão utilizados para desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, sobretudo na área de ciências térmicas. Também foi apresentada a estruturação do projeto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

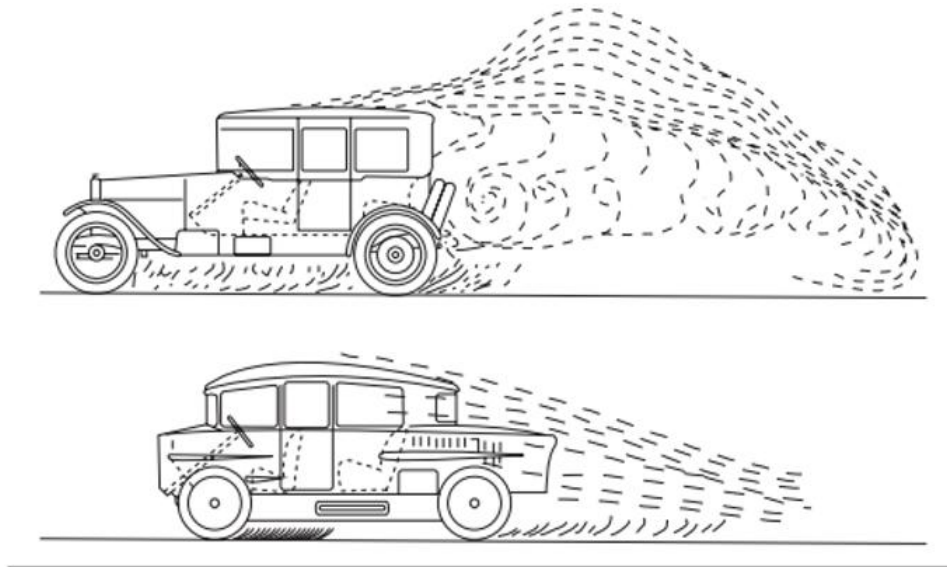
Este capítulo apresentará uma revisão bibliográfica sobre os conhecimentos que serão necessários para o desenvolvimento do projeto, além de pesquisas a respeito de projetos desenvolvidos para a Shell Eco-Marathon (SEM) em todo o mundo.

### 2.1 Desenvolvimento da aerodinâmica

Ao contrário de outras áreas, como a aeronáutica e naval, nas quais o desenvolvimento da aerodinâmica ocorreu ao mesmo tempo em que ocorriam outros avanços tecnológicos, no setor automotivo a aerodinâmica se desenvolveu lentamente (WINDLIN *et al.*, 2012). Apenas após a primeira guerra mundial que os estudos de aerodinâmica veicular começaram a se desenvolver.

Em 1919, o fabricante alemão de aeronaves e automóveis, Rumpler, projetou um carro com perfil aerodinâmico, denominado *Teardrop*, lágrima em português, que foi testado em um túnel de vento, obtendo coeficientes de arrasto cerca de três vezes menores que os de veículos da época, e produzindo uma esteira menor na parte traseira do veículo (WINDLIN *et al.*, 2012), como pode-se observar na Figura 5.

**Figura 5 – Esteira atrás de um veículo convencional e o veículo de Rumpler**



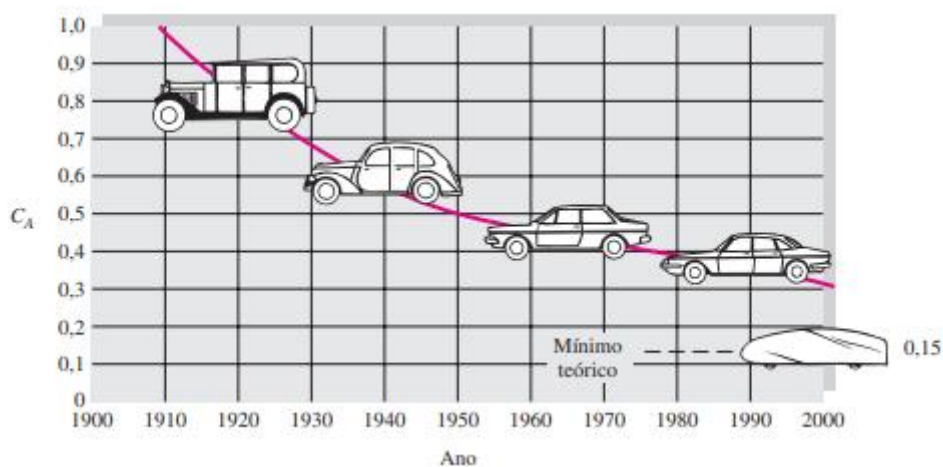
**Fonte: Windlin *et al.* (2012).**

Pode-se considerar que este foi o marco inicial em estudos focados em aerodinâmica veicular. Desta forma, o perfil dos carros foi mudando ao longo dos anos, visando diminuir as forças de arrasto, que consistem na resistência ao movimento de um objeto sólido em meio a um fluido (LUCENA *et al.*, 2012), e as forças de sustentação, que são geradas devido à diferença de pressão entre a parte superior e inferior do veículo, e também têm influência no comportamento do veículo, sendo interessante obter uma sustentação negativa, a *downforce*

(SOUSA BRUNO SILVA DE; GONÇALVES, 2013) . A *downforce* mantém o veículo “colado” no chão, isso é interessante em veículos de competição por facilitar a realização de curvas em alta velocidade.

Atualmente, há um interesse dos fabricantes, consumidores e até governos na diminuição de gastos energéticos, aumento da eficiência dos veículos e, principalmente, redução do consumo de combustíveis fósseis, desta forma, ao longo dos anos a aerodinâmica dos veículos foi aprimorada, e apresenta grandes reduções nos coeficientes e, conseqüentemente, nas forças de arrasto (WHITE, 2010), como pode-se observar na Figura 6.

**Figura 6 – Evolução da aerodinâmica veicular no tempo**



Fonte: White (2010).

Atualmente os carros possuem um coeficiente de arrasto em torno de 0,3. O mínimo teórico indicado na figura ( $C_d= 0,15$ ) é uma aproximação para veículos comerciais (WHITE, 2010). É possível alcançar valores menores com veículos experimentais (WHITE, 2010), como no caso dos veículos da competição da Shell Eco-Marathon.

## 2.2 Aerodinâmica Veicular

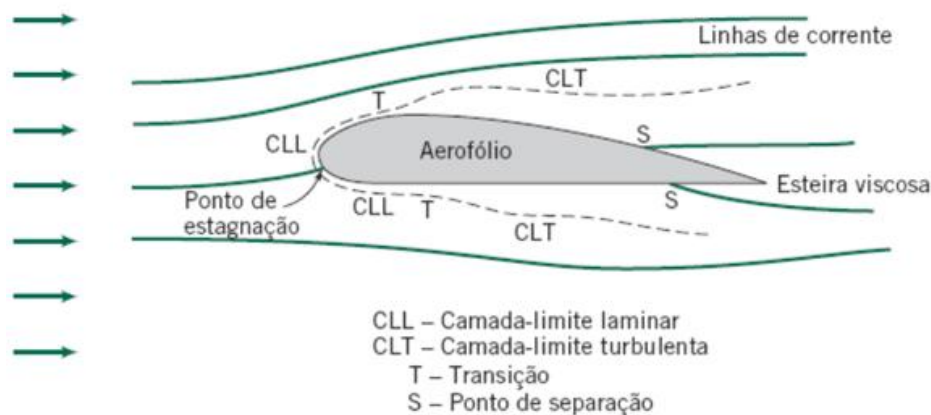
A aerodinâmica é a área da mecânica dos fluidos que estuda a interação entre fluido e sólido. Nesse sentido, a aerodinâmica veicular tem como objetivo estudar o escoamento ao redor de veículos automotivos, avaliando com isso, a estabilidade, a segurança, os ruídos e, sobretudo, como esses fatores influenciam o consumo de combustível do veículo.

### 2.2.1 Escoamento sobre superfícies não planas

Ao escoar ao redor de uma superfície não plana, há o desenvolvimento de uma camada limite, na qual são importantes os efeitos viscosos. A camada limite representa a parte do escoamento entre o corpo em movimento e o fluido, nesta região a velocidade varia na direção

normal à superfície, de zero na parede do corpo até a velocidade da corrente livre. Ela inicia em regime laminar, passa por uma transição e pode tornar-se turbulenta ao longo do comprimento da superfície. Pode ocorrer o descolamento da camada limite e a formação de uma região turbulenta denominada de esteira (FOX *et al.*, 2014). O comportamento da camada limite durante o comprimento de um corpo pode ser visto na Figura 7, onde T indica o ponto de transição da camada limite laminar (CLL) para camada limite turbulenta (CLT) e S indica o ponto de separação do escoamento.

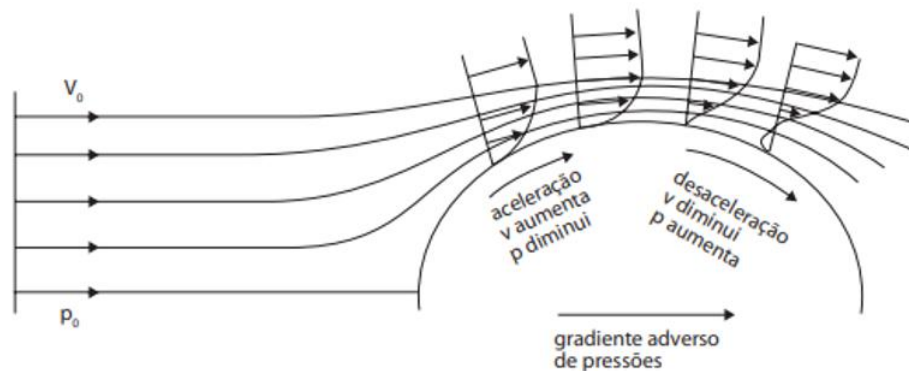
**Figura 7 – Comportamento da camada limite durante o comprimento de um corpo**



Fonte: Fox *et al.* (2014).

À medida que o fluido escoar ao longo da geometria, pode ocorrer o aumento da velocidade e, como consequência, uma diminuição da pressão, já quando o fluido sofre uma desaceleração, ocorre um aumento da pressão, gerando um gradiente adverso de pressões. Essa variação de pressão pode ocasionar uma variação no perfil de velocidades dentro da camada limite (WINDLIN *et al.*, 2012), como é possível observar na Figura 8.

**Figura 8 – Variação do perfil de velocidades ao longo da linha de corrente em torno de um corpo sólido submetido ao escoamento**

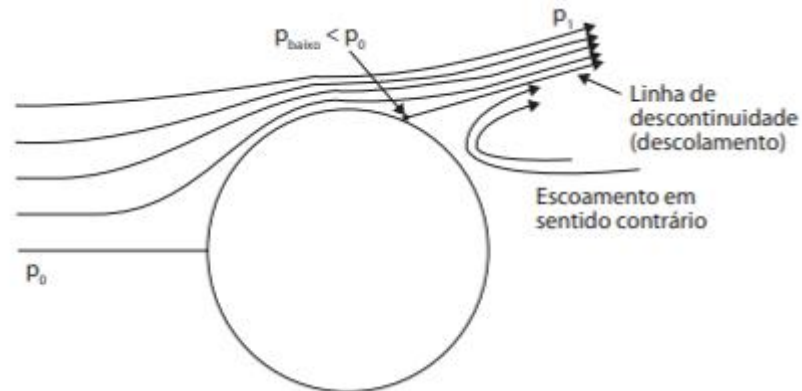


Fonte: Windlin *et al.* (2012).

Com a desaceleração do fluido, as partículas podem diminuir a velocidade a ponto de se tornarem estacionárias ou até mudar de direção e, como na mesma linha de corrente não

pode existir fluido escoando em sentidos diferentes, as linhas de corrente se desprendem. A esse fenômeno, dá-se o nome de descolamento da camada limite (WINDLIN *et al.*, 2012). Esse processo é representado pela Figura 9.

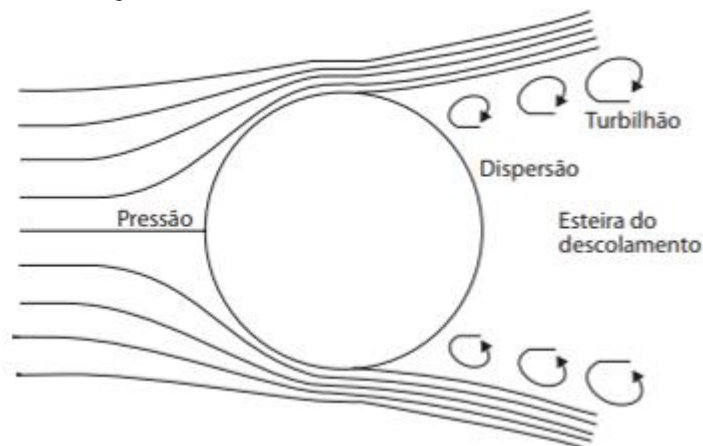
**Figura 9 – Descontinuidade das linhas de corrente**



**Fonte: Windlin *et al.* (2012).**

A corrente externa, então, torna-se fortemente perturbada pelo descolamento da camada-limite (WHITE, 2010), e se rompe em vórtices (WINDLIN *et al.*, 2012), formando a esteira de descolamento, como representado na Figura 10.

**Figura 10 – Formação de vórtices devido ao descolamento da camada limite**

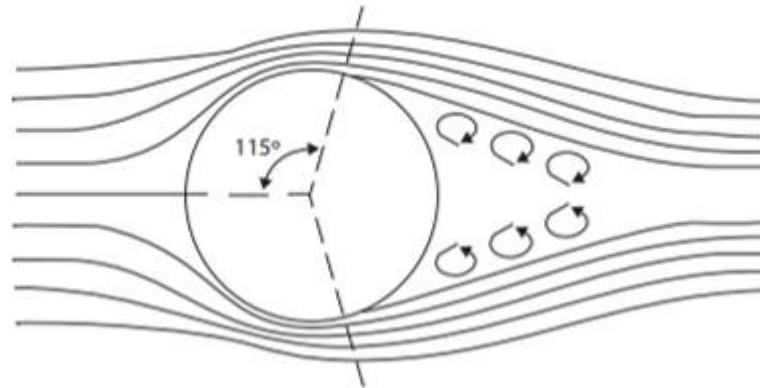


**Fonte: Windlin *et al.* (2012).**

Com valores baixos para o número de Reynolds, o escoamento assemelha-se muito ao representado na Figura 10, caracterizando-se como laminar. A medida que o número de Reynolds aumenta e alcança números superiores a  $3,5 \cdot 10^5$ , o escoamento passa a ser turbulento, e o descolamento da camada gera vórtices na parte traseira do corpo. O resultado é a formação de uma bolha de separação, com o fluido se movendo no sentido contrário do escoamento principal na parte posterior do corpo. A Figura 11 retrata o descolamento da camada limite e a formação dos vórtices.

Esse efeito acaba causando uma diminuição no coeficiente de arrasto, ou seja, dependendo da geometria do corpo, é vantajoso o escoamento turbulento. Vale ressaltar que é comum, no caso de veículos, o número de Reynolds ser alto mesmo em baixas velocidades.

**Figura 11 – Deslocamento da camada limite para um escoamento turbulento**

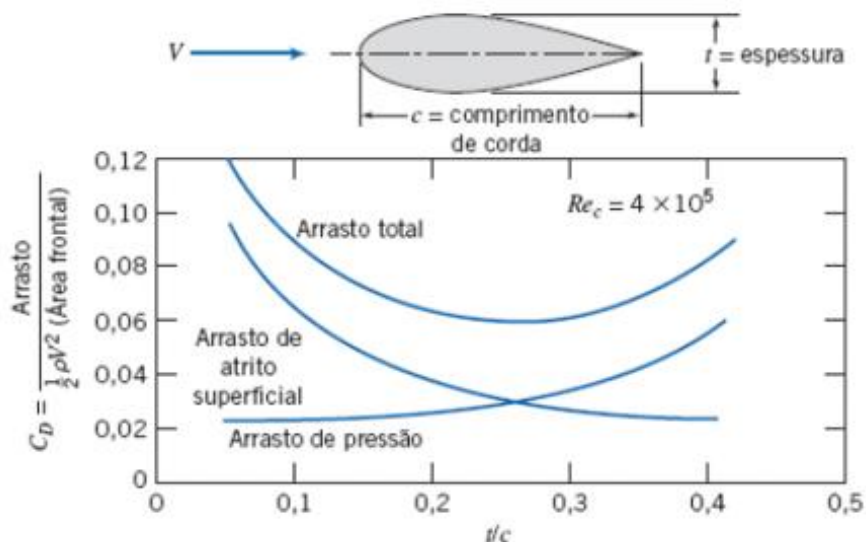


Fonte: Windlin *et al.* (2012).

Conseqüentemente, a camada limite também tende a ser turbulenta nesses casos, o que acaba gerando um atraso no descolamento dela, acarretando em uma diminuição das forças de arrasto (WINDLIN *et al.*, 2012).

Visando reduzir o arrasto sob um corpo, foram desenvolvidos os corpos carenados, que podem ser obtidos afinando a região posterior, fazendo com que ele adquira o formato de “gota” ou “lágrima”. Esse formato faz com que o escoamento se mantenha “colado” à superfície do corpo e, conseqüentemente, haja uma redução no desbalanceamento de pressão, com isso, a esteira turbulenta torna-se menor (FOX *et al.*, 2014).

**Figura 12 – Coeficiente de arrasto sobre uma estrutura carenada como uma função da razão de espessura, mostrando as contribuições do atrito superficial e da pressão sobre o arrasto total.**



Fonte: Fox *et al.* (2014).

Entretanto, ao afinar o corpo, corre-se o risco de aumentar a área de superfície dele e, como consequência disso, o arrasto de atrito superficial também aumenta (FOX *et al.*, 2014). A Figura 12 representa, no eixo das abcissas, a razão entre a espessura e o comprimento da

corda e, no eixo das ordenadas, o coeficiente de arrasto. Observa-se que o arrasto total torna-se menor com uma razão de espessura e comprimento da corda de aproximadamente 0,25.

### 2.3 Número de Reynolds

A transição entre regime de escoamento laminar e turbulento depende de uma série de fatores, como a geometria, rugosidade da superfície, temperatura, tipo de fluido, velocidade do escoamento entre outros (ÇENGEL Y. A.; CIMBALA, 2015). O número de Reynolds é um parâmetro adimensional usado para caracterizar o escoamento. Valores altos relacionam-se com escoamentos turbulentos, enquanto valores mais baixos indicam escoamentos laminares.

O número de Reynolds para escoamentos externos é determinado pela Equação 1.

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

Onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $v$  é a velocidade característica do escoamento, definida pela velocidade da corrente livre,  $L$  é referente ao comprimento característico, e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

### 2.4 Equação de Navier-Stokes e da continuidade

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais, não lineares, utilizadas para soluções de escoamentos de fluidos newtonianos, para obtenção de campos de velocidade e pressão (ÇENGEL Y. A.; CIMBALA, 2015). Elas são descritas pelas Equações 2 e 3, em coordenadas cartesianas (nas coordenadas  $x$  e  $y$ ), uma vez que será utilizado um modelo bidimensional. Essas duas equações combinadas com a equação da continuidade (conservação da massa), Equação 4, são usadas para obter as propriedades de um escoamento de um fluido Newtoniano (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 2004).

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

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Onde,  $\rho$  representa a densidade do fluido,  $g$  a aceleração da gravidade,  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido,  $p$  pressão e  $u$  e  $v$  correspondem à velocidade nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente.

As soluções analíticas das equações de Navier-Stokes, só podem ser obtidas para campos de escoamento muito simples (ÇENGEL Y. A.; CIMBALA, 2015). Por esse motivo, as aplicações da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) têm sido desenvolvidas para análises e soluções numéricas das equações de Navier-Stokes para problemas mais complexos e aplicáveis em parte dos problemas reais (FOX *et al.*, 2014), como o deste trabalho.

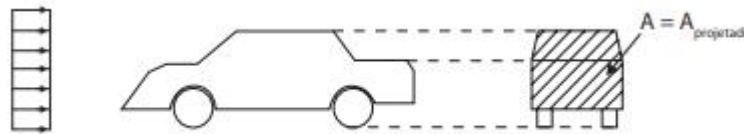
## 2.5 Coeficientes de Arrasto e Sustentação

O coeficiente de arrasto é descrito pela Equação 5 e indica como acontece a resistência ao movimento de um corpo imerso em um fluido.

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_p} \quad (5)$$

Sendo,  $F_D$  a força de arrasto,  $V$  a velocidade do fluido relativa ao objeto e  $A_p$  a área projetada. Em carros, geralmente, a área é projetada num plano normal às trajetórias do escoamento (WINDLIN *et al.*, 2012). A área projetada de um veículo pode ser vista na Figura 13.

**Figura 13 – Área de referência para determinação do coeficiente de arrasto ( $C_d$ )**



**Fonte: Windlin *et al.* (2012).**

A força de arrasto total é a soma do arrasto de atrito e de pressão, que podem ser escritos em função da tensão de cisalhamento e da distribuição de pressões na parede, que é provocada pelos efeitos viscosos e tensões normais (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 2004). A Figura 14 mostra a distribuição das forças de pressão e atrito na superfície de um aerofólio.

A força de sustentação é uma força normal ao arrasto atuando no corpo (WHITE, 2010). Ela é gerada pela diferença de pressão entre a parte superior e inferior do corpo e é descrita pela Equação 6.

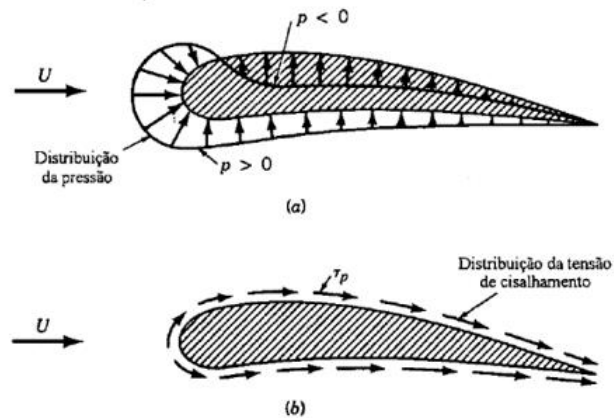
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_p} \quad (6)$$

Onde  $C_L$  é o coeficiente de sustentação e  $F_L$  a força de sustentação.

Outro coeficiente que pode ser utilizado no estudo da aerodinâmica, é o coeficiente de pressão, ele é definido como a diferença de pressão estática local,  $P$ , e a pressão de referência da corrente livre,  $P_F$ , conforme a Equação 7. Ao contrário dos coeficientes de arrasto e susten-



Figura 14 – Forças em um objeto bidimensional submerso. (a) forças de pressão e (b) forças de atrito



Fonte: Munson, Young e Okiishi (2004).

tação, não é um valor único para o corpo inteiro, mas possui um valor diferente em diferentes pontos na superfície (WHITE, 2010).

$$C_P = \frac{P - P_F}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (7)$$

Com estes coeficientes podemos caracterizar e entender as forças envolvidas na análise aerodinâmica de um corpo. É importante ressaltar a dependência que esses coeficientes têm com a velocidade e a densidade do fluido.

## 2.6 Modelo de Turbulência

As equações de Navier-Stokes modelam o escoamento em problemas com geometrias diversas. Contudo, para problemas reais e mais robustos, outros métodos são necessários, utilizando CFD (FOX *et al.*, 2014). O método mais utilizado para resolução de problemas de turbulência em CFD é o das Equações Médias de Reynolds (RANS), em que as variáveis são decompostas em componentes médias e flutuantes (SIMON, 2021). Porém esse método introduz outras variáveis, e mais algumas equações são necessárias para a solução do problema, neste contexto é necessária a escolha de um modelo de turbulência.

A turbulência será abordada neste trabalho com base na modelagem via RANS. Para resolver problemas com escoamento turbulento, vários modelos são propostos e disponibilizados no *Ansys Fluent*®, neste trabalho será abordado somente o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$ , que será utilizado nas simulações.

### 2.6.1 Modelo $k-\epsilon$

Entre as diversas formas de resolver problemas do tipo RANS estão os modelos de duas equações, um deles é o modelo  $k-\epsilon$ . O modelo  $k-\epsilon$  foi proposto por Launder e Spalding (1974), e é um modelo baseado em equações de transporte para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e pela taxa de dissipação dessa energia turbulenta ( $\epsilon$ ).

Segundo Wilcox *et al.* (1998) este é o modelo mais popular, uma vez que ele foca nos mecanismos que afetam a energia cinética turbulenta (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). O modelo  $k-\epsilon$  é o modelo de turbulência mais comum para simular as características médias de um escoamento turbulento, ele é amplamente utilizado para escoamentos externos com gradiente de pressão relativamente baixo, e apresenta melhores resultados para geometrias mais simples e sem grandes curvaturas (BARDINA; HUANG; COAKLEY, 1997).

As vantagens que este modelo oferece são a de que ele é o modelo de duas equações mais simples e com o menor gasto computacional, tem um excelente desempenho para muitos escoamentos industrialmente relevantes, e é o modelo de turbulência mais bem estabelecido e amplamente validado (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). O modelo também é comumente utilizado para estudos de aerodinâmica veicular (AHMAD; ABO-SERIE; GAYLARD, 2010). Segundo Dosil (2016), o modelo  $k-\epsilon$  apresenta resultados suficientes para avaliação da aerodinâmica de veículos, além de ser um dos mais indicados para o estudo de aerodinâmica veicular.

O modelo é aplicado em vários trabalhos de avaliação aerodinâmica de veículos da Shell Eco-Marathon. Arpino *et al.* (2019) compararam os resultados obtidos pelo modelo  $k-\epsilon$  e pelo  $k-\omega$ , com resultados experimentais, e concluíram que o  $k-\epsilon$  modela com mais precisão as componentes de velocidade do escoamento, principalmente na parte posterior do veículo. Além disso, eles concluíram que o modelo  $k-\epsilon$  é mais preciso que o  $k-\omega$  quando comparado com os resultados experimentais obtidos no experimento em túnel de vento (ARPINO *et al.*, 2019).

Galmarini *et al.* (2017) e Ambarita, Siregar e Kawai (2018) também utilizaram o modelo  $k-\epsilon$  para as suas simulações do comportamento aerodinâmico do protótipo da SEM desenvolvido por eles.

## 2.7 Malhas

Algumas definições preliminares são importantes ao realizar estudos utilizando CFD, duas delas são o tamanho do domínio físico e o refino da malha. Esses valores podem afetar o resultado final obtido, bem como a performance computacional. Uma malha excessivamente refinada ou um domínio muito grande podem gerar grandes gastos computacionais, aumentando o tempo de cálculo e a memória necessária no sistema.

Uma maneira de contornar esses problemas é o uso de malhas mais refinadas somente nas regiões próximas à superfície do veículo e em locais com grandes gradientes de velocidade

(AHMAD; ABO-SERIE; GAYLARD, 2010), e mais esparsas nas extremidades do domínio, como nas simulações feitas por Cieśliński *et al.* (2016).

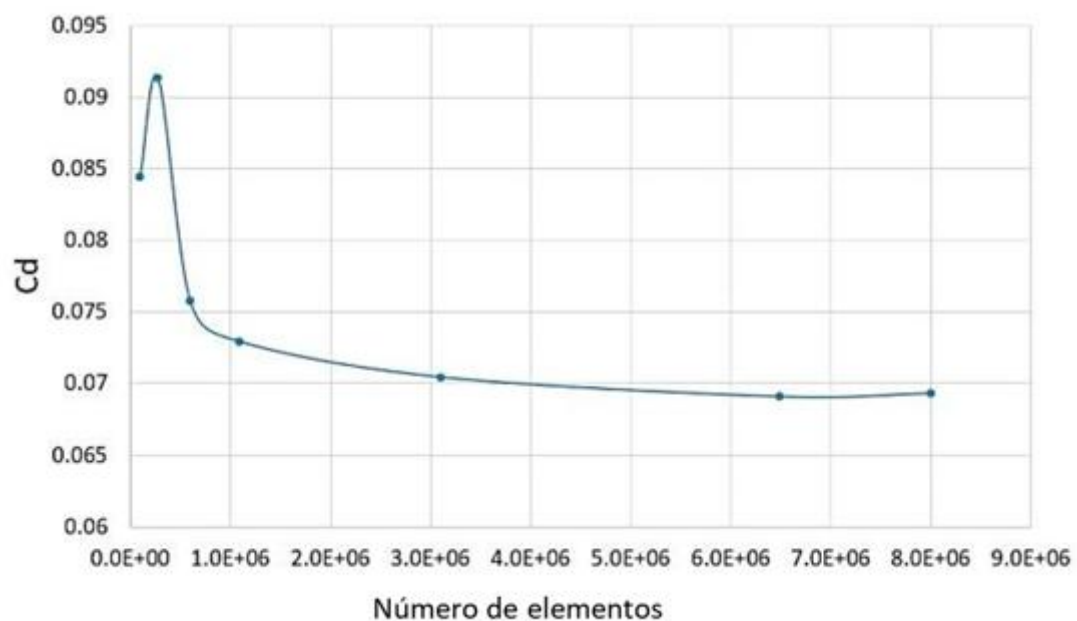
Ahmad, Abo-Serie e Gaylard (2010) avaliaram os efeitos do refino da malha no resultado da solução e chegaram à conclusão que, quanto mais fina a malha, valores de coeficiente de arrasto mais próximos aos resultados experimentais são atingidos, porém, como esperado, o tempo de cálculo computacional também aumenta significativamente. Utilizando uma malha mais refinada apenas nas proximidades do veículo, eles conseguiram perfis de velocidade mais precisos, principalmente na parte traseira do veículo.

Murad *et al.* (2004) também adotaram o uso de malhas mais refinadas nas proximidades da superfície dos veículos, bem como uma malha ainda mais densa na região traseira, para melhorar a qualidade dos resultados.

O tamanho ideal da malha pode ser avaliado realizando simulações com malhas cada vez mais refinadas. Quando os coeficientes de arrasto convergirem e apresentarem uma diferença inferior à 5%, em relação à malha mais grossa, é encontrada a malha ideal para o estudo (MURAD *et al.*, 2004).

Mansour, Afify e Kassem (2020) realizaram várias simulações a fim de encontrar a malha ideal para avaliar o comportamento do protótipo de competição da SEM desenvolvido por eles. Os resultados obtidos foram plotados em um gráfico (Figura 15) e o valor de malha adotado nas simulações foi de  $6,5 \cdot 10^6$  elementos de malha.

**Figura 15 – Convergência dos valores de coeficiente de arrasto em função do aumento do refino da malha**



**Fonte: Mansour, Afify e Kassem (2020).**

Com os resultados obtidos por Mansour, Afify e Kassem (2020) é possível concluir que, para a simulação realizada por eles, os valores de coeficiente de arrasto passaram a se tornar

estáveis após  $3.10^6$  elementos de malha. O valor adotado por eles foi escolhido com base na convergência dos resultados, uma vez que uma pequena diferença entre duas simulações foi atingida, a simulação com a malha menos refinada foi adotada para poupar recursos computacionais. É importante ressaltar que o valor real do coeficiente não é afetado pelo refino da malha, apenas a precisão da solução numérica que se altera.

## 2.8 Revisão Bibliográfica

Ao longo das edições da Shell Eco-Marathon (SEM) inúmeros projetos de carenagem foram desenvolvidos e aprimorados. Como referência para desenvolvimento de um dos primeiros modelos da equipe Relampinhão da UTFPR Curitiba, foram levantadas técnicas e metodologias de equipes que competem na SEM ao redor do mundo. O levantamento de modelos de carenagem será feito tanto para estruturas únicas (monocoque) como para carenagens separadas do chassi, uma vez que o foco principal deste projeto será avaliação da aerodinâmica do modelo a ser projetado para o Curi 2.

A maior parte das equipes opta por construir veículos com chassi e carenagem integradas, os chamados monocoques, geralmente com duas rodas dianteiras e uma traseira. Porém algumas equipes separam o chassi da carenagem, construindo uma gaiola de alumínio ou aço e cobrindo-a com o chassi posteriormente. Nesses tipos de protótipos a carenagem não apresenta função estrutural, ao contrário do que acontece com os monocoques.

O formato geral dos carros da SEM lembra uma lágrima e em alguns casos, as rodas frontais se encontram fora da carenagem, podendo ser cobertas por uma capa própria ou não (CIEŚLIŃSKI *et al.*, 2016). O formato de lágrima é utilizado por apresentar transições suaves entre as superfícies, favorecendo o escoamento laminar (SANTIN, 2007).

O processo de desenvolvimento do veículo PAC-Car II é destrinchando por Santin (2007), no livro *The World's Most Fuel Efficient Vehicle*. O protótipo movido por célula de combustível atingiu a marca de 5385 km por litro de petróleo equivalente na competição europeia de 2005, quebrando todos os recordes estabelecidos até então.

O petróleo equivalente, ou Barril Equivalente de Petróleo (BOE), é uma unidade utilizada para converter a energia gerada por uma fonte energética, comparando-a com a energia gerada por um barril de óleo cru (159 litros) (MEGAWHAT, 2022).

O design do PAC-Car II, que pode ser visto na Figura 16, visou a construção de uma superfície suave para reduzir qualquer efeito de ventos laterais, visto que de cima o veículo se assemelha à forma de uma lágrima (SANTIN, 2007).

O protótipo construído pela equipe polonesa Iron Warriors para as competições europeias de 2015 e 2016 atingiu a marca de 830 quilômetros por litro de gasolina. Em suas análises do modelo projetado pela equipe, Cieśliński *et al.* (2016) chegaram a conclusão de que os principais problemas do modelo decorrem do seu tamanho excessivo, sendo que a área frontal prejudica a aerodinâmica e o material utilizado para a fabricação foi exagerado o que aumentou

**Figura 16 – PAC-Car II**



Fonte: Santin (2007).

a massa e, conseqüentemente, o consumo de combustível do carro. Como solução uma das medidas tomadas foi a mudança do assento do piloto, que ficou numa posição inclinada, permitindo uma redução na altura da carenagem de aproximadamente 10 cm, propiciando também a redução da área frontal do veículo.

**Figura 17 – Eco-Arrow - Protótipo da equipe polonesa Iron Warriors**



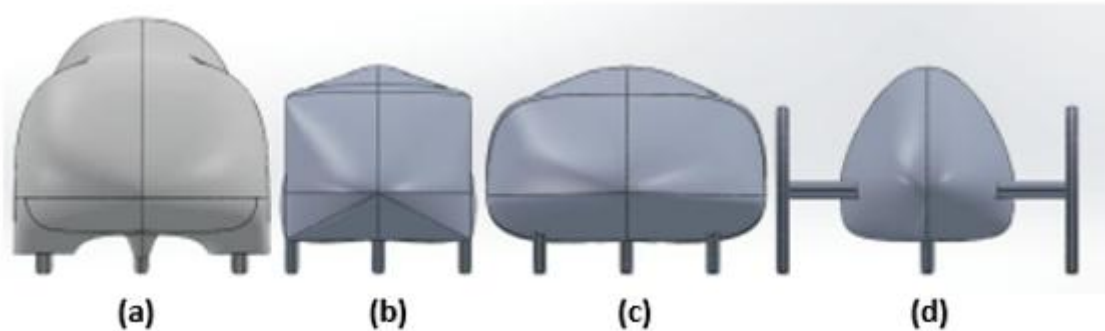
Fonte: Cieśliński *et al.* (2016).

Para garantir o melhor modelo para as próximas competições, a equipe polonesa comparou sua carenagem vencedora da competição nacional com 3 propostas, sendo uma delas com as rodas dianteiras separadas do corpo do veículo. A vista frontal dos 4 modelos comparados podem ser vistos na Figura 18.

Os melhores resultados de coeficiente de arrasto foram obtidos para a geometria (c) e os piores resultados na geometria (d), fato que, segundo os autores, deve-se às rodas dianteiras externas ao corpo principal do veículo (CIEŚLIŃSKI *et al.*, 2016).

Outro estudo conduzido por Czyż, Karpiński e Koçak (2019) avaliou a força aerodinâmica de arrasto de um protótipo construído para a categoria elétrica da SEM, com as rodas dianteiras separadas da carenagem do corpo. Eles concluíram que, conforme esperado, o ponto de maior

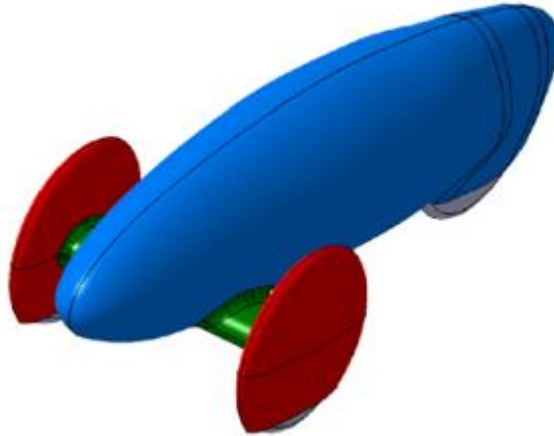
**Figura 18 – (a) Eco-Arrow (b) Protótipo 1 (c) Protótipo 2 (d) Protótipo 3**



Fonte: Cieśliński *et al.* (2016).

pressão é na parte frontal do veículo, sendo que as rodas geram apenas entre 2 e 5% da força de arrasto do veículo. Mesmo assim, em competições futuras eles pretendem incluir as rodas no interior da carenagem principal. O modelo do protótipo avaliado por eles pode ser visto na Figura 19.

**Figura 19 – Modelo avaliado por Czyż, Karpiński e Koçak (2019)**



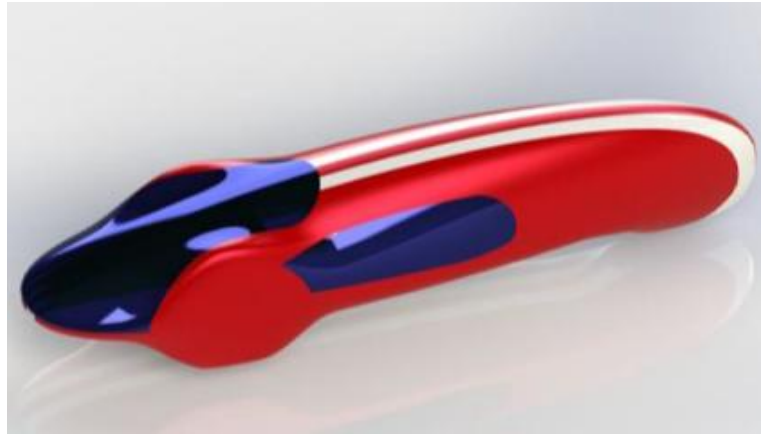
Fonte: Czyż, Karpiński e Koçak (2019).

Na análise realizada por Arpino *et al.* (2019) chegou-se à conclusão que o protótipo da universidade de Cassino na Itália, o Nebula, que pode ser visto na Figura 20, apresenta uma boa performance em termos aerodinâmicos tendo um baixo coeficiente de arrasto, quando comparado com outros carros experimentais. Eles validaram seu modelo numérico através de análises em túnel de vento em escala, com um protótipo impresso em 3D.

Ao avaliar a literatura encontrada sobre a aerodinâmica de veículos da SEM, percebe-se que existem alguns padrões de recomendações a serem seguidas no design desse tipo de veículo. Algumas dessas sugestões se encontram a seguir.

Para um veículo com alta eficiência energética é necessário dimensionar a carenagem para reduzir a área frontal e o tamanho do veículo como um todo, sendo que as principais va-

**Figura 20 – Nebula**



**Fonte: Arpino *et al.* (2019).**

riáveis de entrada a serem consideradas são o tamanho do piloto e os requisitos da competição (GALMARINI *et al.*, 2017).

Para garantir uma boa performance aerodinâmica na competição, o projeto deve contar com áreas frontais e laterais do veículo reduzidas. Além disso, o design deve garantir o escoamento laminar durante a maior parte do perfil do veículo com linhas de pressão paralelas entre si, que mantenham o escoamento colado à superfície do veículo (LEITÃO, 2014).

Outro elemento importante a ser considerado para o design da carenagem é o posicionamento e o formato do visor. Além de possibilitar a ampla visão do piloto, o ideal é que o vidro seja o mais perpendicular possível em relação aos olhos do motorista, a fim de evitar reflexos que podem prejudicar a visão e, conseqüentemente, a segurança do piloto (SANTIN, 2007).

As rodas dianteiras também influenciam no coeficiente de arrasto do veículo. Na maioria dos veículos construídos para as competições da SEM, as carenagens são projetadas para cobri-las e diminuir o arrasto. Capas de rodas com poucas concavidades e transições suaves entre o corpo e a roda do veículo tendem a ter resultados melhores tanto em simulações numéricas quanto em testes em túneis de vento (SANTIN, 2007).

A partir da revisão de literatura é possível perceber que existe uma tendência em optar por projetos que tenham as rodas dianteiras protegidas no interior da carenagem. Ainda assim, os designs de carenagem são extremamente variados e algumas equipes atingem ótimos resultados com rodas externas. Alguns designs de equipes vencedoras podem ser vistos na Figura 21.

O TUFast Eco car construído pela equipe alemã da Universidade Técnica de Munique atingiu em 2016 a marca de 1400 km/kWh na categoria de veículos elétricos, vencendo a etapa europeia. A estrutura do protótipo é um monocoque de fibra de carbono e o veículo tem uma massa total de 25 Kg (TEAM, 2022).

A Equipe francesa *la Joliverie* compete com os veículos chamados de *Microjoule* e já ganhou competições da SEM 26 vezes. Com o veículo movido à Gás Natural Veicular (GNV) foi

**Figura 21 – Protótipos vencedores em diferentes categorias**



TUfast Eco car, 1400 km/kWh, Elétrico



PAC-Car II, 5.385 km/l, Hidrogênio



Microjoule car, 2.606 km/l, GNV



Microjoule car, 2.735 km/l, Gasolina

**Fonte: Autoria própria (2022).**

atingida a marca de 2.606 km/l e, em 2019, a equipe ganhou a competição global na categoria de motores à combustão com a marca de 2.735 km/l (JOLIVERIE, 2019).

No Brasil, a equipe vencedora da SEM na categoria *prototype* etanol foi a Pato a Jato, da UTFPR de Pato Branco, com a marca de 702,4 km/l (SHELL, 2020).

Os modelos e práticas das equipes vencedoras e as metodologias de avaliação aerodinâmica descritas nesta seção serão muito importantes para a definição dos modelos que serão projetados para a análise aerodinâmica deste projeto.

Além disso, como fechamento deste capítulo, resalta-se os conhecimentos adquiridos sobre os modelos numéricos, especialmente o  $k-\epsilon$  que será utilizado neste trabalho, o estudo de malhas e sobre a fundamentação teórica de mecânica dos fluidos e aerodinâmica veicular que serão extremamente importantes para o andamento do projeto como um todo, desde a concepção de ideias para as novas carenagens até a execução das simulações e a análise dos resultados obtidos no *software*.

O próximo capítulo se dedicará em apresentar os procedimentos metodológicos a serem utilizados neste trabalho.



### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento deste trabalho. Para o embasamento teórico descrito no capítulo anterior foram utilizadas literaturas consagradas da mecânica dos fluidos, para a fundamentação teórica de aerodinâmica, e artigos científicos publicados em revistas e congressos.

Para obtenção dos artigos relacionados às competições da Shell Eco-Marathon (SEM) foram realizadas buscas nas bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e Google Acadêmico com as palavras chave *Aerodynamics*, *Shell Eco-Marathon*, *Ansys*, *energy efficiency* e *fuel consumption*. As principais referências dos artigos mais relevantes também foram importantes para obtenção de informações e refino das palavras chave usadas na pesquisa. Informações retiradas dos sites de equipes da SEM e da página oficial da Shell Eco-Marathon também foram utilizadas. Os artigos de outras equipes que competem na SEM são importantes tanto para avaliação de propostas de design da carenagem quanto para informações de malha e modelos de turbulência usados em seus estudos.

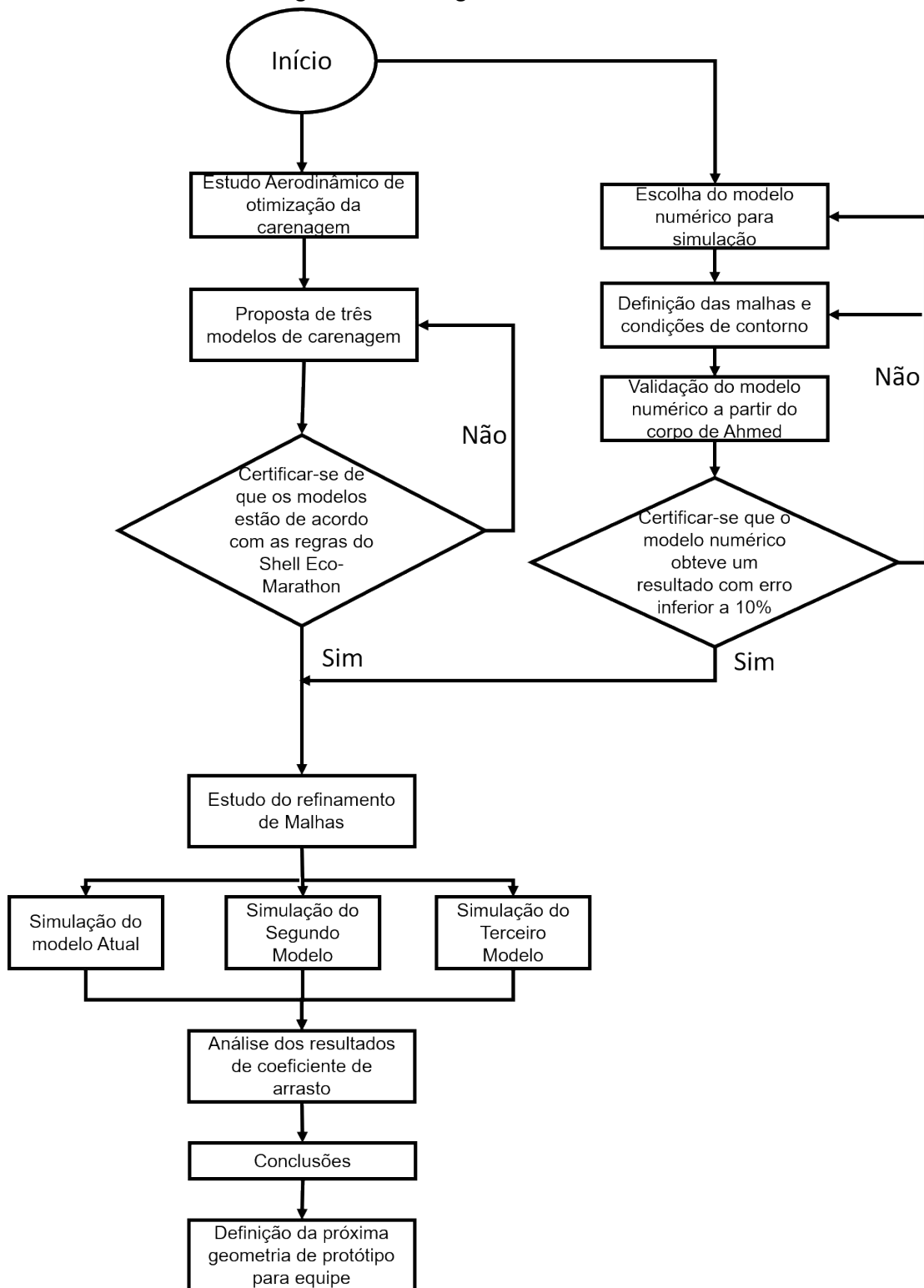
Outros artigos relacionados à simulações no *Ansys Fluent* também foram necessários para estudo de métodos de validação e escolha do modelo de turbulência a ser utilizado nas simulações deste projeto. Efeitos e consequências do refino e tipo da malha também foram obtidos nestes artigos.

Com as informações obtidas na pesquisa exploratória realizada no capítulo 2 foi possível definir as etapas que serão necessárias para o desenvolvimento deste trabalho. Na Figura 22 é possível ver o fluxograma das atividades a serem realizadas para obter os resultados quantitativos desejados ao final do projeto. Ao seguir estas atividades, 3 propostas de modelos serão apresentadas, para definição da geometria da carenagem da equipe Relampinhão para as próximas edições da competição da Shell Eco-Marathon.

Os resultados quantitativos irão possibilitar a análise da performance aerodinâmica dos modelos, através de gráficos comparativos dos coeficientes de arrasto dos protótipos de veículos.

Para realização da análise dos protótipos, é preciso estabelecer os parâmetros para criação dos modelos em Desenho assistido por computador (CAD), o passo a passo de execução no Ansys e como serão feitas as análises dos resultados obtidos na simulação. Existem algumas limitações e regras do design que serão apresentados a seguir.

Figura 22 – Fluxograma das atividades



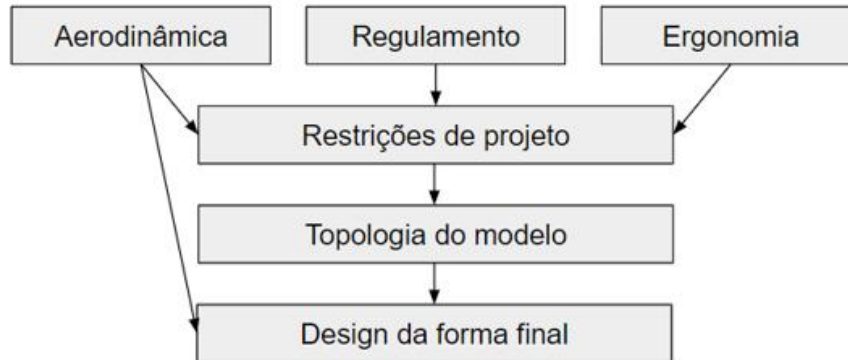
Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.1 Preparação do modelo em CAD

Santin (2007) considera que as principais variáveis a serem consideradas no design da carenagem de um veículo eficiente para competições da SEM são a ergonomia, a aerodinâmica

e o regulamento da competição. O processo de design utilizado por ele no design do PAC-Car II pode ser visto na Figura 23.

**Figura 23 – Fluxograma das atividades de design utilizadas no projeto do PAC-Car II**



**Fonte: Adaptado de Santin (2007).**

Seguindo as etapas de design do PAC-Car II descritas na Figura 23, juntamente com as etapas do fluxograma deste projeto, será possível guiar as atividades para obter 2 modelos finais a serem comparados com a geometria atual.

Nas subseções seguintes, são discutidos os requisitos necessários para a modelagem dos protótipos para o desenvolvimento do Curi 2.

### 3.1.1 Requisitos da Competição

Além das recomendações e práticas que serão seguidas para melhorar a aerodinâmica do veículo, os protótipos devem seguir as regras oficiais da Shell Eco-Marathon (2022). Todos os anos as regras podem passar por mudanças e adequações. Abaixo serão apresentadas as regras relevantes para o desenvolvimento da carenagem, baseadas no regulamento da Shell Eco-Marathon (2022).

1. altura máxima do veículo não poderá ultrapassar 1000 mm;
2. A largura entre as rodas mais externas deverá ser de pelo menos 500 mm;
3. A razão entre altura e largura do protótipo, considerando as rodas mais externas, deverá ser de menos de 1,25;
4. A distância entre as rodas dianteiras e traseiras deve ser de no mínimo 1000 mm;
5. A largura máxima do protótipo deve ser de 1300 mm;
6. O comprimento máximo do protótipo deve ser de 3500mm;
7. O protótipo deve possuir três ou quatro rodas, que mantenham contato constante com o chão;

8. A carenagem do protótipo deve ser rígida e não podem ser moldadas pela ação do vento;
9. Anexos aerodinâmicos que mudam a geometria devido a ação do vento não são permitidos;
10. Os protótipos devem ser completamente fechados, veículos de topo aberto não são permitidos;
11. O Veículo deve possuir uma *roll bar* efetiva que se localize 50mm acima da cabeça do piloto, quando sentado em posição de direção;
12. A *roll bar* deve suportar uma força de 700 N aplicada em qualquer direção, sem apresentar deformações;
13. Os protótipos devem ter espaço livre de pelo menos 100 mm entre a frente do veículo e os pés do motorista;
14. O piloto deve ter um arco de visibilidade de 90° para cada lado do eixo longitudinal do veículo;
15. O veículo deve ser equipado com retrovisores de no mínimo 2500mm<sup>2</sup> em ambos os lados;
16. O piloto deve conseguir sair do veículo em menos de 10 segundos estando totalmente equipado.

Em suma, é preciso respeitar as dimensões máximas do veículo e possibilitar a ampla visão do motorista. Também devem ser consideradas as portas para facilitar a entrada e a saída segura do piloto em casos de emergência.

Levando em consideração o regulamento da competição e as práticas e recomendações descritas por outros autores na revisão bibliográfica, bem como as lições aprendidas no desenvolvimento do Curi 1, foram desenvolvidas 2 geometrias de carenagem que serão comparados à geometria do modelo atual da equipe. As três geometrias que serão avaliados neste trabalho são descritas no Quadro 1.

**Quadro 1 – Geometrias que serão analisadas**

<b>Geometria</b>	<b>Descrição</b>
Geometria 1	Modelo atual da carenagem da equipe Relampinhão, com intuito de servir de comparativo.
Geometria 2	Modelo projetado usando conhecimentos de aerodinâmica e corpos carenados.
Geometria 3	Modelo projetado utilizando práticas de design observadas em veículos de outras equipes, com carenagem se adaptando às rodas dianteiras.

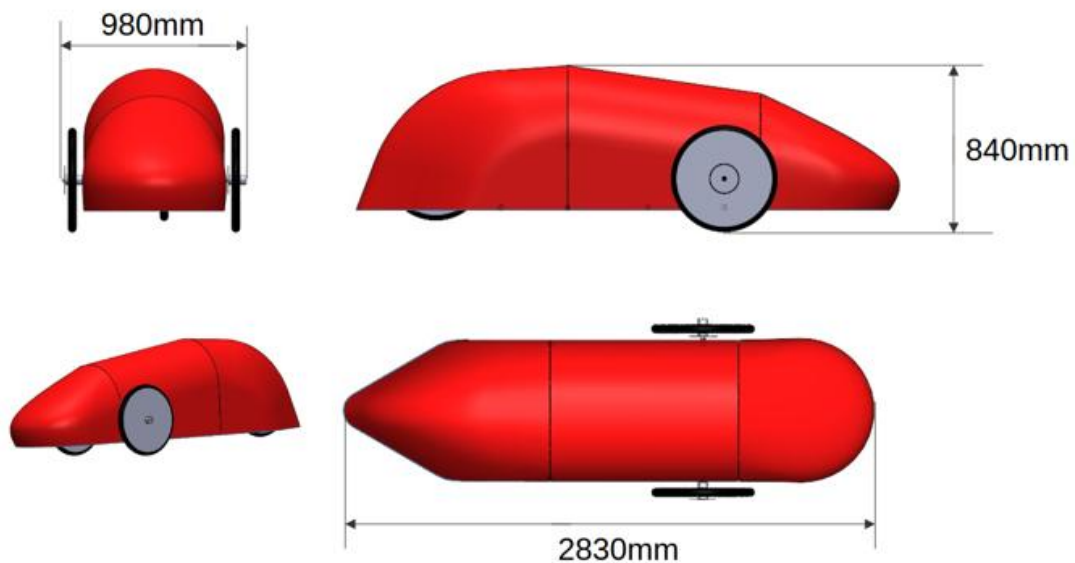
**Fonte: Autoria própria (2022).**

Nas próximas seções serão apresentadas as geometrias projetadas com auxílio do *software SolidWorks*.

### 3.1.2 Geometria 1 - Curi 1

A primeira geometria proposta para a análise em CFD será o modelo utilizado atualmente pela equipe, o Curi 1, que foi fabricado para a competição de 2022 e pode ser visto na Figura 24.

**Figura 24 – Dimensões gerais e geometria do modelo atual utilizado pela equipe Relampinhão, Curi 1**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

A Geometria 1 foi modelada sem maiores estudos aerodinâmicos, uma vez que ela foi feita para o carro-piloto da equipe. Sua geometria foi proposta depois do chassi da equipe pronto, e não foi possível levar a aerodinâmica em consideração no projeto da carenagem.

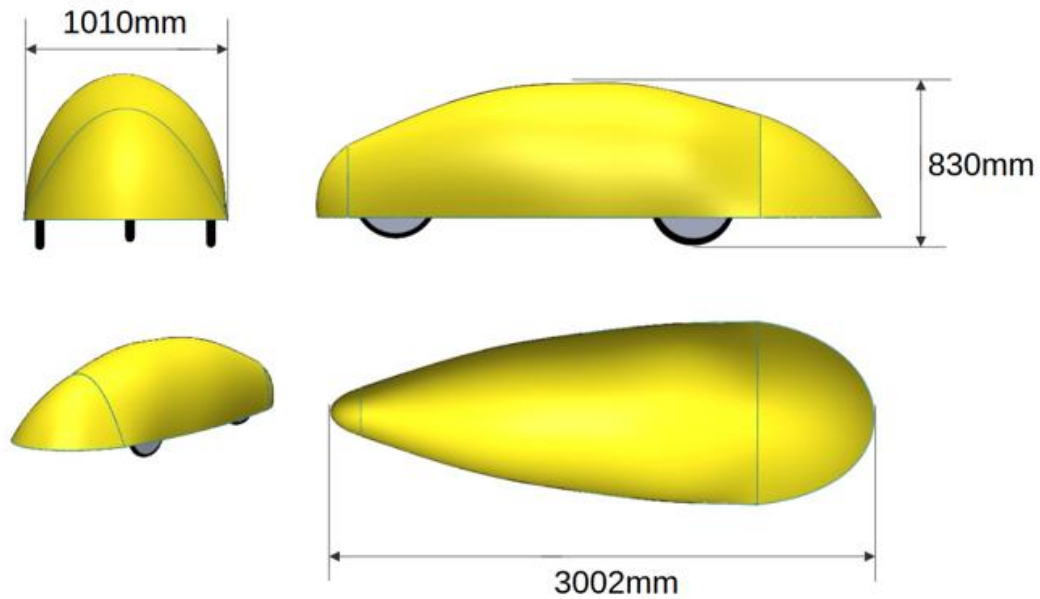
Com 2830 mm de comprimento total, 980 mm de largura, considerando a largura mais externa, e 840 mm de altura, o projeto do Curi 1 cumpre todos os requisitos da competição.

### 3.1.3 Geometria 2

A segunda geometria proposta para estudo, foi modelada utilizando os conceitos de aerodinâmica e de corpos carenados. Seu design pode ser observado na Figura 25.

Com 3002 mm de comprimento total, 1010 mm de largura e 830 mm de altura, a Geometria 2 cumpre todos os requisitos da competição. Como principais diferenças em relação à Geometria 1, a Geometria 2 possui rodas para dentro da carenagem, um comprimento maior,

**Figura 25 – Geometria 2 - Dimensões gerais**

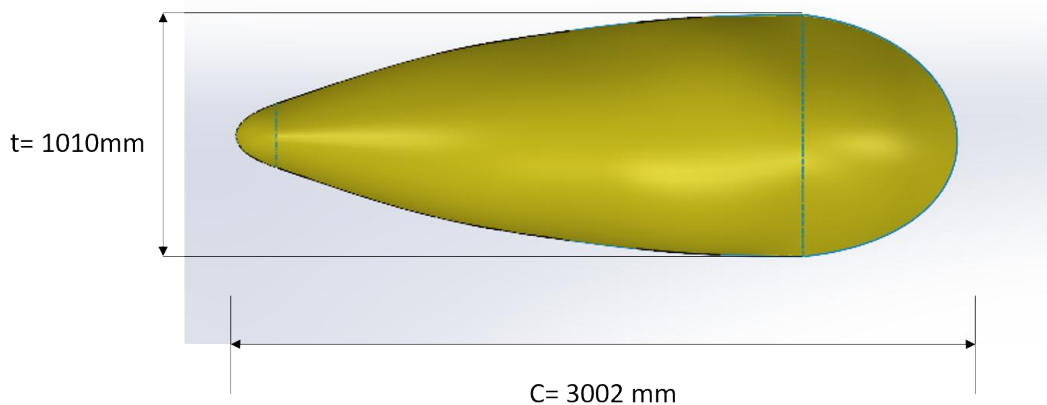


**Fonte: Autoria própria (2022).**

visando que sua condução seja com o piloto deitado e, principalmente, a utilização do conceito de corpos carenados, com o formato de gota na vista superior.

A aplicação do formato de gota na parte lateral da carenagem é um pouco mais difícil devido à altura do protótipo que não pode sofrer um afunilamento tão grande, pois é necessário acoplar em sua parte traseira o sistema de *powertrain*.

**Figura 26 – Detalhe do formato de gota e dos tamanhos de comprimento de corda e espessura.**



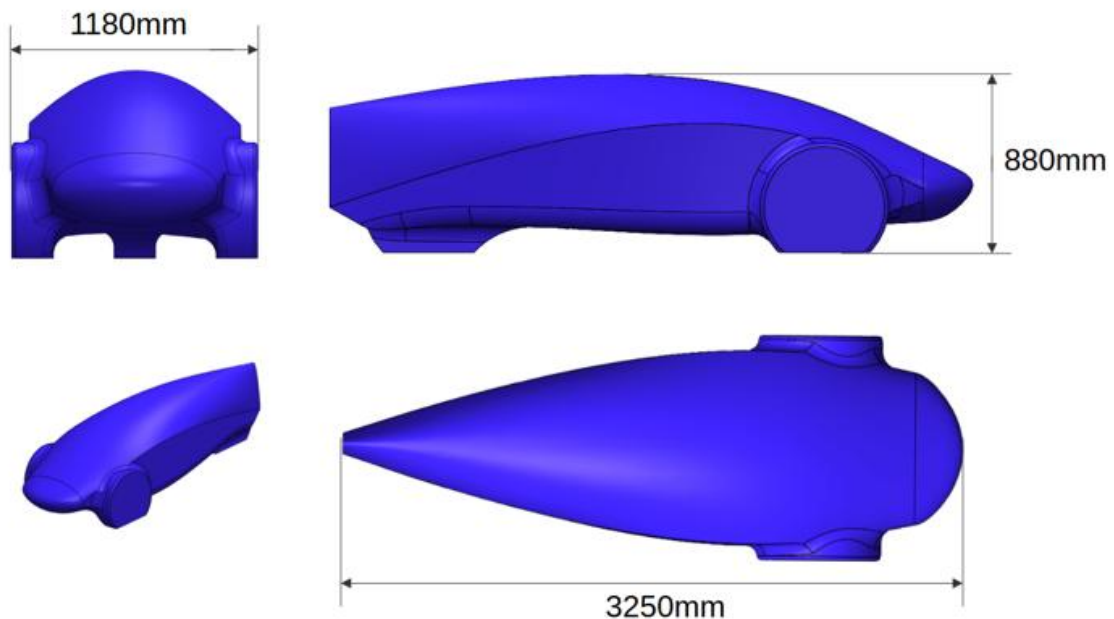
**Fonte: Autoria própria (2022).**

A Figura 26 representa o comprimento da corda ( $c$ ) do corpo carenado e a espessura ( $t$ ), a razão entre a espessura e o comprimento é de 0,336, um número adimensional que pode indicar, conforme a Figura 12 apresentada no capítulo 2 deste trabalho, um bom coeficiente de arrasto total.

### 3.1.4 Geometria 3

O terceiro modelo projetado para o estudo comparativo foi feito com inspiração nos modelos de outras equipes. Ele conta com uma geometria que também se assemelha a uma gota quando vista de cima, assim como a Geometria 2, porém as rodas não estão totalmente no interior da carenagem principal, a carenagem se adapta na região das rodas dianteiras. As dimensões principais e a geometria do modelo podem ser vistas na Figura 27.

**Figura 27 – Geometria 3 - Dimensões gerais**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

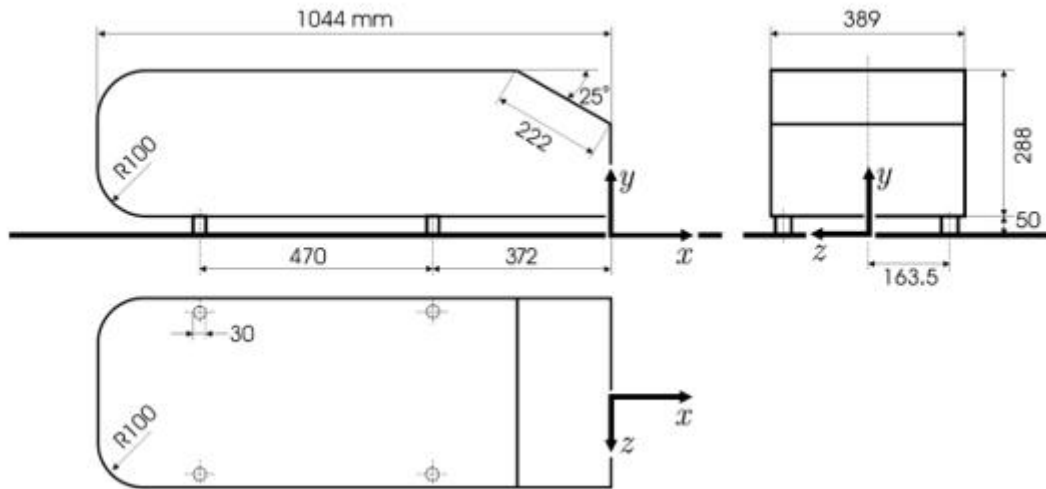
A Geometria 3 foi projetada para ter carenagens sobre as rodas e deixar apenas uma pequena faixa delas à mostra com uma abertura próxima ao solo, sendo que as proteções de roda tem transições suaves com a geometria do veículo. Este modelo também conta com uma distância maior entre o solo e o veículo.

As dimensões totais foram projetadas para o piloto em posição deitada, ao contrário do que acontece no veículo atual, em que o piloto dirige em uma posição inclinada.

## 3.2 Validação do Modelo Numérico

Para validação do modelo numérico, será utilizado o modelo descrito originalmente por Ahmed, Ramm e Faltin (1984), que ficou conhecido como corpo de Ahmed. O corpo de Ahmed passou a ser um importante método de validação para calibração de túneis de vento e modelos de turbulência em *softwares* CFD. As medidas padrões do Corpo de Ahmed encontram-se na Figura 28 e, para a simulação de validação do modelo, será utilizado um ângulo de saída de 25°.

**Figura 28 – Dimensões do corpo de Ahmed**



**Fonte: ZAMOLO Riccardo; NOBILE (2017).**

O corpo de Ahmed tem 1044 mm de comprimento, 288 mm de altura e 389 mm de largura. A inclinação tem 222 mm de comprimento, qualquer que seja o ângulo. A superfície inferior do corpo Ahmed está localizada a 50 mm acima do solo.

O objetivo desta etapa é comparar os resultados de coeficiente de arrasto obtidos experimentalmente por diversos autores com o resultado que foi obtido pelo *software*. Para que a simulação possa representar um resultado real obtido em túnel de vento, com o nível de segurança suficiente, a validação do modelo numérico é necessária.

A Tabela 1 apresenta o resultado obtido experimentalmente por diversos autores para o corpo de Ahmed com um ângulo de saída de 25°.

**Tabela 1 – Resultados experimentais de coeficiente de arrasto obtidos por diferentes autores**

<b>Autor</b>	<b>Coefficiente de Arrasto</b>
Ahmed, Ramm e Faltin (1984)	0,285
Meile <i>et al.</i> (2011)	0,299
Bayraktar, Landman e Baysal (2001)	0,294
Dobrev e Massouh (2014)	0,320

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Portanto, foi realizada a simulação bidimensional em *Ansys Fluent®* do corpo de Ahmed para comparação com os resultados obtidos em túnel de vento. Caso o erro representado na Equação 8 seja menor do que 10% em relação ao resultado original obtido por Ahmed, Ramm e Faltin (1984), o modelo poderá ser utilizado para simulação dos protótipos.

$$Erro = \frac{C_d Sim - C_d Exp}{C_d Exp} \quad (8)$$

Onde  $C_d Sim$  é o coeficiente de arrasto obtido na simulação numérica e  $C_d Exp$  o coeficiente de arrasto obtido experimentalmente.



### 3.3 Malhas

O tamanho do domínio computacional e a quantidade de elementos de malha utilizados para o cálculo têm grande influência nos resultados obtidos na simulação.

Para encontrar o tamanho ideal de domínio ao redor do veículo foi feita uma comparação entre domínios utilizados pelos trabalhos citados na revisão bibliográfica, para avaliar os tamanhos utilizados usualmente em problemas similares. Os domínios variam de 1 a 5 comprimentos a frente do protótipo e de 8 a 20 comprimentos atrás do protótipo. As medidas utilizadas por cada autor são apresentadas na Tabela 2, na qual L representa o comprimento, H a altura e W a largura dos protótipos.

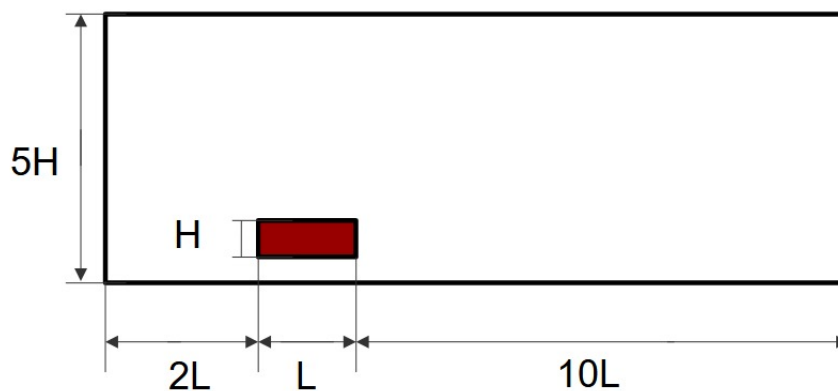
**Tabela 2 – Medidas de domínio utilizadas por diferentes autores**

Autor	Comprimento a frente	Comprimento atrás	Altura	Largura
Ambarita, Siregar e Kawai (2018)	2L	10L	2L	2L
Zhang <i>et al.</i> (2019)	5L	20L	5L	10L
Mansour, Afify e Kassem (2020)	L	16L	3.5H	3W
Cieśliński <i>et al.</i> (2016)	3L	10L	10H	10W

Fonte: Autoria própria (2022).

Observando a tendência dos outros trabalhos, o domínio computacional utilizado para as simulações deste projeto foi de 2 comprimentos a frente e 10 comprimentos atrás dos nossos modelos e a altura utilizada é 5 vezes a altura dos nossos protótipos. Esses valores também foram pensados a fim de economizar a memória computacional e diminuir o tempo de cálculo do *software*. A altura da parte de baixo do veículo com relação ao solo foi calculada em relação à posição da roda, resultando na distância real entre o veículo e o solo. Um esquema representativo do domínio utilizado pode ser visto na Figura 29.

**Figura 29 – Tamanho do domínio a ser utilizado nas simulações**



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.3.1 Qualidade da Malha

Para que se obtenha uma boa confiabilidade no resultado, é necessário que se faça um estudo de malhas, comparando malhas mais grossas, com uma menor quantidade de elementos, com malhas mais refinadas, para que seja possível escolher uma malha que resulte em um resultado confiável, com o menor tempo computacional possível.

Nesta etapa foi adotado o mesmo procedimento utilizado por Murad *et al.* (2004) e por Mansour, Afify e Kassem (2020), desta forma, quando o coeficiente de arrasto apresenta valores com diferença inferior à 5% para 2 simulações de malhas diferentes, a malha menos refinada é escolhida para a simulação a fim de evitar gastos computacionais desnecessários.

Nesta mesma etapa, o critério de convergência adotado para o coeficiente de arrasto dentro de uma mesma simulação foi o de que o coeficiente de arrasto não tenha variado mais de 0,001 por no mínimo 1000 iterações.

### 3.4 Condições de Contorno

As condições de contorno são os dados que serão utilizados como *setup* no *software* para a simulação. O modelo de turbulência escolhido será o  $k-\epsilon$  que, conforme descrito na fundamentação teórica, modela diferentes tipos de escoamento satisfatoriamente.

Para as propriedades do ar, foram levados em conta os dados da cidade do Rio de Janeiro, onde ocorre a competição no Brasil. A velocidade média do protótipo considerada foi de 30 Km/h e uma temperatura de 25°C, os demais dados apresentados na Tabela 3 são retirados das propriedades do ar a nível do mar, considerando a cidade do Rio de Janeiro.

**Tabela 3 – Condições de contorno para ambos os modelos**

Parâmetro	Valor
Velocidade (m/s)	8,33
Pressão (Pa)	101325
Temperatura (K)	303,16
Viscosidade cinemática (m <sup>2</sup> /s)	$1,872 \times 10^{-5}$
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	1,164

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Cada geometria também possui particularidades de área frontal e comprimento total, que são representadas na Tabela 4.

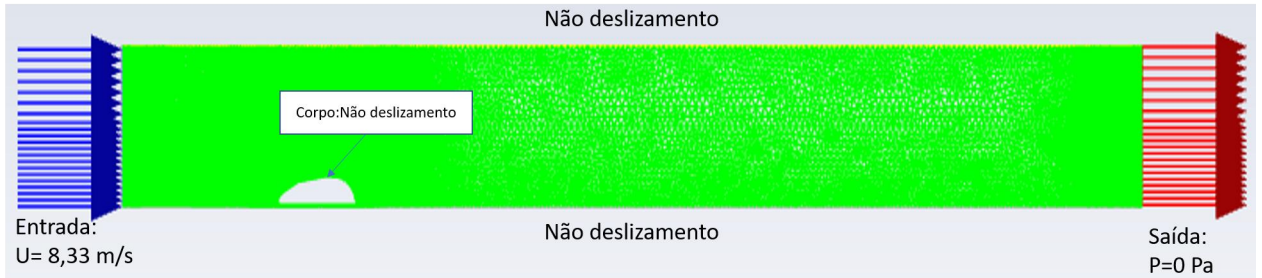
**Tabela 4 – Condições de contorno singulares de cada Geometria**

Parâmetro	Geometria 1	Geometria 2	Geometria 3
Área frontal (m <sup>2</sup> )	0,56	0,57	0,86
Comprimento (m)	2,8	3,02	3,25

**Fonte: Autoria própria (2022).**

A Figura 30, apresenta as condições de contorno que foram utilizadas. Na superfície da entrada é aplicada a velocidade prescrita de  $U = 8,33\text{m/s}$ . As componentes de velocidade nas outras direções são nulas. Nas superfícies de parede e dos protótipos são aplicadas condições de não escorregamento. Na saída é aplicado a condição de pressão relativa nula.

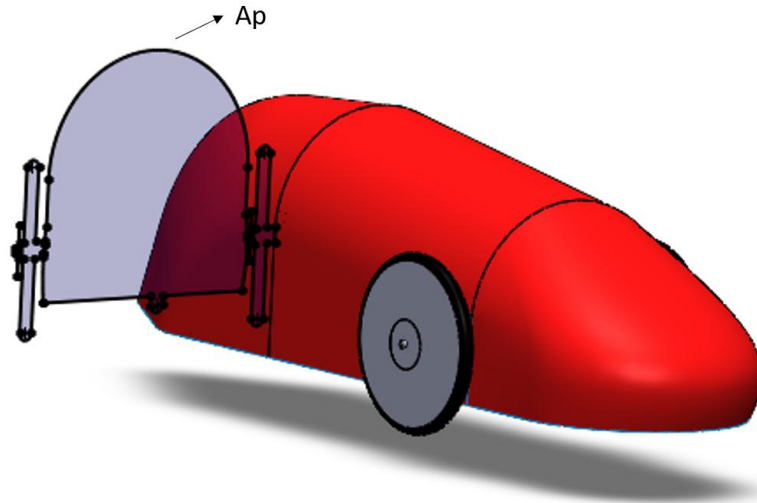
**Figura 30 – Condições de contorno**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

É importante salientar, também, que para simulações bidimensionais as rodas dos protótipos são retiradas, porém elas são contabilizadas na área projetada, um dos *setups* do *software*, conforme apresentado na Figura 31.

**Figura 31 – Área frontal projetada ( $A_p$ ), utilizada como *setup* no *software***



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Como fechamento deste capítulo destaca-se a apresentação dos três modelos geométricos que serão estudados, bem como o modelo geométrico que será utilizado para validação do modelo numérico. Além disso, foram apresentados o domínio, os critérios para escolha de malhas e as condições de contorno que serão utilizadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo será dedicado a análise da qualidade das malhas para cada uma das geometrias, apresentação da validação do modelo numérico e análise dos resultados das simulações para as Geometrias 1, 2 e 3. Além disso, também será feita a comparação entre os coeficientes de arrasto das 3 geometrias e a escolha do próximo modelo a ser fabricado pela equipe.

### 4.1 Análise da qualidade de malha

Para que se obtenha uma boa confiabilidade no resultado, é necessário que se faça um estudo de malhas, visando a escolha da malha em que se obtenha um resultado confiável, com o menor tempo computacional possível. Para isso, foi feito um estudo de malhas para a geometria do Corpo de Ahmed e para cada uma das geometrias que serão avaliadas neste trabalho. O parâmetro de referência usado foi o coeficiente de arrasto, sendo que o critério de escolha foi quando Cd apresentou diferença inferior à 5% entre duas simulações de malhas consecutivas, a malha menos refinada foi escolhida como base para as simulações, uma vez que a malha mais refinada teria um resultado próximo e gastos computacionais desnecessários.

As Tabelas 5, 6, 7 e 8 apresentam a quantidade de elementos de malha, o resultado do coeficiente de arrasto, e a diferença percentual entre os três coeficientes, obtidos para malhas diferentes, em cada uma das geometrias e para o corpo de Ahmed.

**Tabela 5 – Resultados para malhas 1, 2 e 3 do Corpo de Ahmed e diferença percentual entre os resultados obtidos por cada malha**

	<b>Malha 1</b>	<b>%</b>	<b>Malha 2</b>	<b>%</b>	<b>Malha 3</b>
Elementos	12803		25441		59308
Coeficiente de arrasto	0,3238	11,31%	0,2909	4,38%	0,2787

**Fonte: Autoria própria (2022).**

**Tabela 6 – Resultados para malhas 1, 2 e 3 da Geometria 1 e diferença percentual entre os resultados obtidos por cada malha**

	<b>Malha 1</b>	<b>%</b>	<b>Malha 2</b>	<b>%</b>	<b>Malha 3</b>
Elementos	17936		25272		58333
Coeficiente de arrasto	0,3628	16,62%	0,3111	0,007%	0,3111

**Fonte: Autoria própria (2022).**

**Tabela 7 – Resultados para malhas 1, 2 e 3 da Geometria 2 e diferença percentual entre os resultados obtidos por cada malha**

	Malha 1	%	Malha 2	%	Malha 3
Elementos	12979		23290		36452
Coefficiente de arrasto	0,1272	7,22%	0,1371	4,65%	0,1310

Fonte: Autoria própria (2022).

**Tabela 8 – Resultados para malhas 1, 2 e 3 da Geometria 3 e diferença percentual entre os resultados obtidos por cada malha**

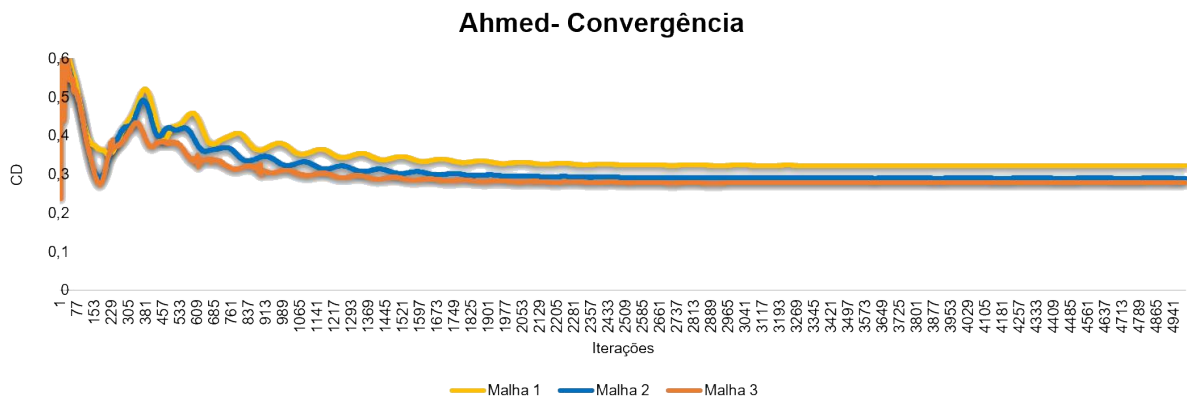
	Malha 1	%	Malha 2	%	Malha 3
Elementos	18426		40917		54349
Coefficiente de arrasto	0,2579	5,30%	0,2447	1,23%	0,2417

Fonte: Autoria própria (2022).

Em todos os casos a malha 2 foi adotada para simulação final de cada geometria. É importante ressaltar que as malhas adotadas atendem ao critério de convergência descrito na metodologia, a fim de garantir a confiabilidade do resultado.

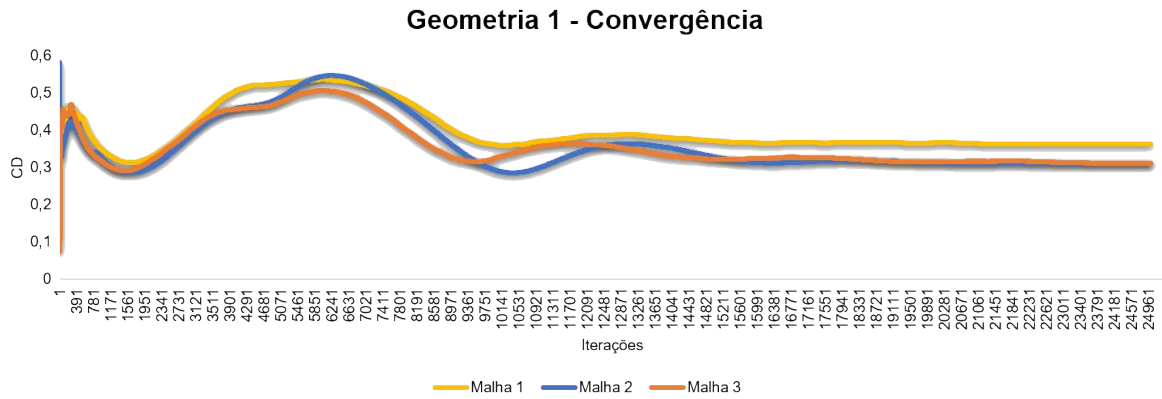
Os gráficos apresentados nas Figuras 32, 33, 34 e 35 apresentam a convergência das malhas 1, 2 e 3 para cada caso. É importante salientar que o critério adotado para convergência da malha é de que o coeficiente de arrasto não tenha variado por mais de 0,001 por no mínimo 1000 iterações. Os gráficos de resíduos para verificar a convergência das equações de continuidade, velocidade,  $\kappa$  e  $\epsilon$  encontram-se no Apêndice A.

**Figura 32 – Convergência do resultado do coeficiente de arrasto vs o número de iterações para as malhas 1, 2 e 3 testadas para o Corpo de Ahmed**



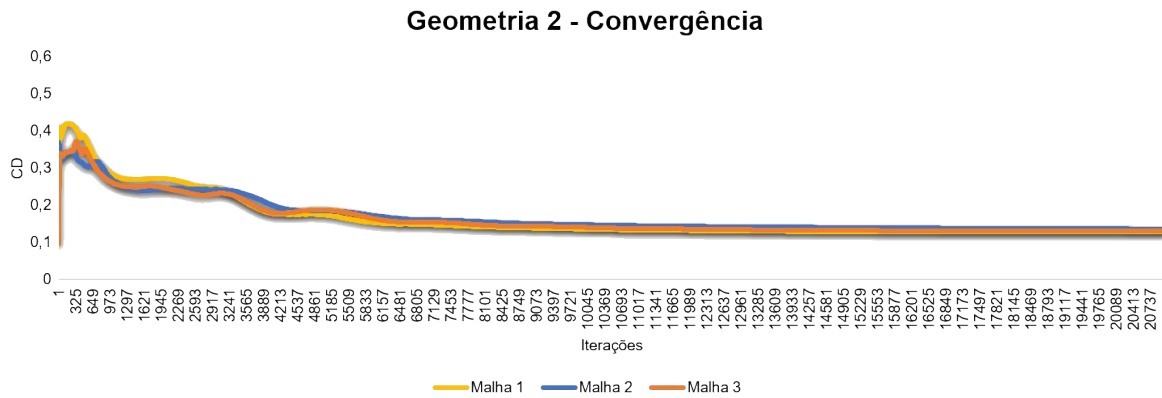
Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 33 – Convergência do coeficiente de arrasto vs o número de iterações para as malhas 1, 2 e 3 testadas para a Geometria 1.**



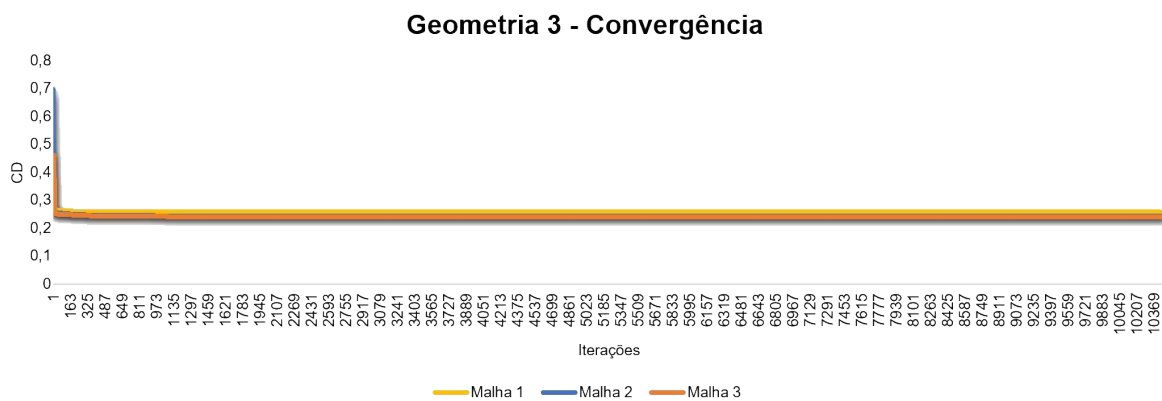
Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 34 – Convergência do coeficiente de arrasto vs o número de iterações para as malhas 1, 2 e 3 testadas para a Geometria 2.**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 35 – Convergência do coeficiente de arrasto vs o número de iterações para as malhas 1, 2 e 3 testadas para a Geometria 3.**



Fonte: Autoria própria (2022).

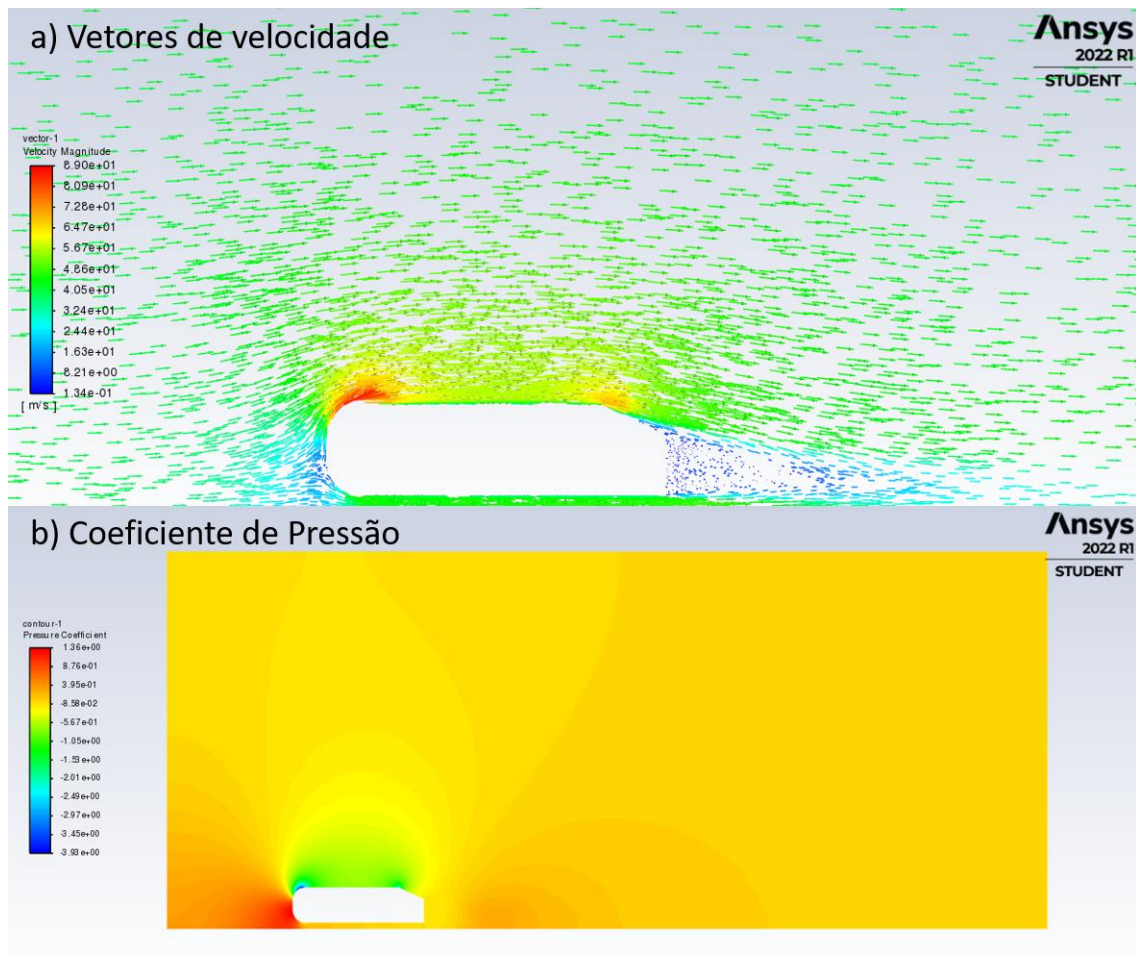
## 4.2 Validação do Modelo Numérico

O modelo numérico foi validado utilizando o *Ansys Fluent @ versão student*, conforme apresentado na metodologia. O modelo de turbulência utilizado foi o  $k-\epsilon$ . A velocidade de entrada no domínio (*inlet*) foi ajustada para 40m/s, conforme o experimento de Ahmed, Ramm e Faltin (1984) e a pressão relativa na saída do volume de controle (*outlet*), foi considerada nula.

A fim de avaliar se o número de elementos de malha está condizente com a simulação a ser realizada, foi feito um estudo de malha, com simulações de quantidades diferentes de elementos de malha, conforme apresentado no subcapítulo 4.1.

Os resultados gráficos para os vetores de velocidade (a) e o coeficiente de pressão (b) para o corpo de Ahmed, podem ser observados na Figura 36.

**Figura 36 – Resultados gráficos para validação do modelo utilizando o corpo de Ahmed. Em (a) Vetores de velocidade e (b) Coeficiente de pressão.**



Fonte: Autoria própria (2022).

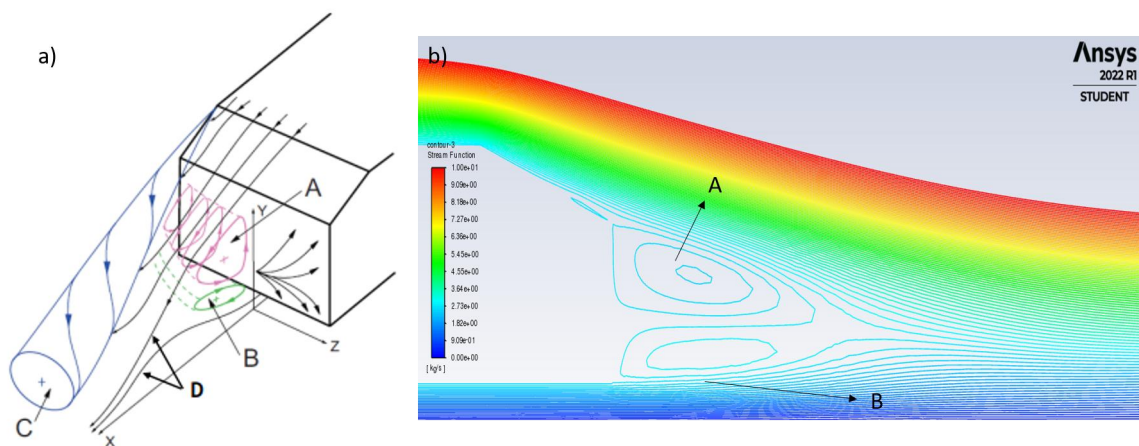
A Figura 36 (a) apresenta os vetores de velocidade ao redor do corpo de Ahmed e mostra que há uma circulação na parte posterior do corpo, e que a velocidade é mais alta no topo e região frontal dele. A Figura 36 (b) apresenta o campo de valores do coeficiente de pressão, que ajuda na compreensão da desaceleração repentina do escoamento. A cor mais



avermelhada, indica que a pressão aumenta na metade inferior da seção do “nariz”. No topo do "nariz", o escoamento é acelerado e cria-se uma zona de baixa pressão, assim a velocidade diminui gradualmente na superfície superior do corpo.

A Figura 37 apresenta as linhas de corrente da simulação. Observa-se que é capturada a separação do fluido atrás da borda inclinada do corpo e que pode-se comparar o perfil dos vórtices (A e B) formados, com os encontrados no experimento de Ahmed, Ramm e Faltin (1984).

**Figura 37 – Comparação qualitativa entre as linhas de corrente encontradas experimentalmente por Ahmed, Ramm e Faltin (1984) (a) e pela presente simulação (b). É possível observar nas duas figuras a formação dos Vórtices de padrão A e B**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Para o resultado de coeficiente de arrasto, a simulação encontrou um valor de 0,2909, o que corresponde à um erro de 2,07% com relação ao experimento de Ahmed, Ramm e Faltin (1984). Como este erro é inferior aos 10% convencionados para a validação do modelo, considera-se o modelo validado.

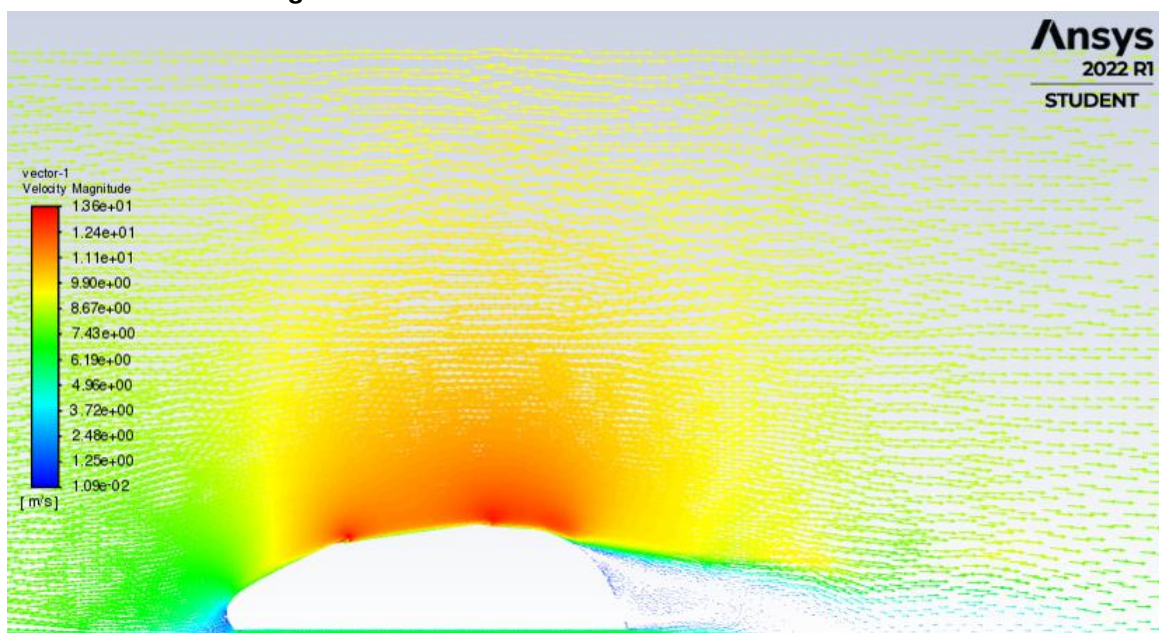
Com o modelo validado, as próximas seções se dedicam a analisar os resultados obtidos para cada uma das geometrias, a fim de que se escolha a geometria adequada para o próximo protótipo da equipe.



### 4.3 Resultados da Geometria 1

A Geometria 1, que consiste na geometria de carenagem atual, utilizada pela equipe na competição de 2022, apresentou um coeficiente de arrasto de 0,3111. A Figura 38 mostra os vetores de velocidade ao longo do perfil e o comportamento da velocidade próximo à superfície do protótipo ao longo do escoamento. É possível notar pontos de estagnação na ponta frontal do veículo e na traseira. Também é aparente o aumento da velocidade nas regiões mais curvadas da geometria, como é de se esperar em escoamentos sobre superfícies não planas, a pressão diminui devido à inclinação da superfície e, por isso, a velocidade do escoamento aumenta.

**Figura 38 – Contorno de velocidade na Geometria 1.**

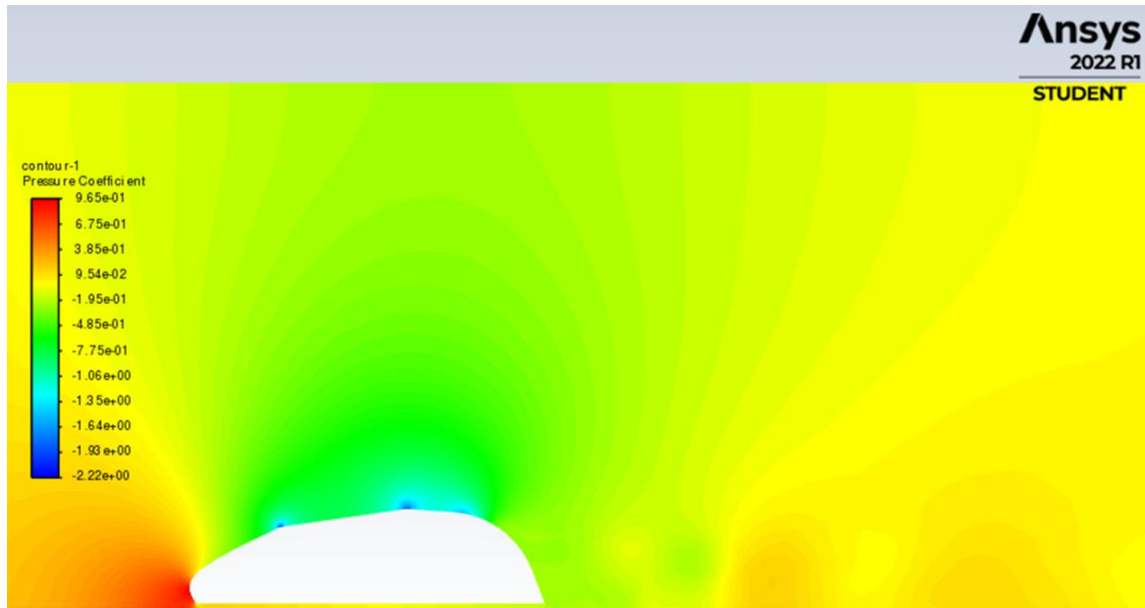


**Fonte: Autoria própria (2022).**

Já na Figura 39 é possível observar o coeficiente de pressão e as regiões de maior pressão na superfície do protótipo, esse comportamento é inverso ao que ocorre na Figura 38 com os vetores de velocidade. Como a pressão vai diminuindo devido a inclinação da superfície do protótipo, a velocidade na mesma região aumenta, assim o aumento na velocidade do fluido ocorre simultaneamente com uma diminuição na pressão na mesma região. A diminuição da pressão na parte superior, é decorrente do gradiente adverso de pressão e pode contribuir para o aumento do arrasto de pressão.

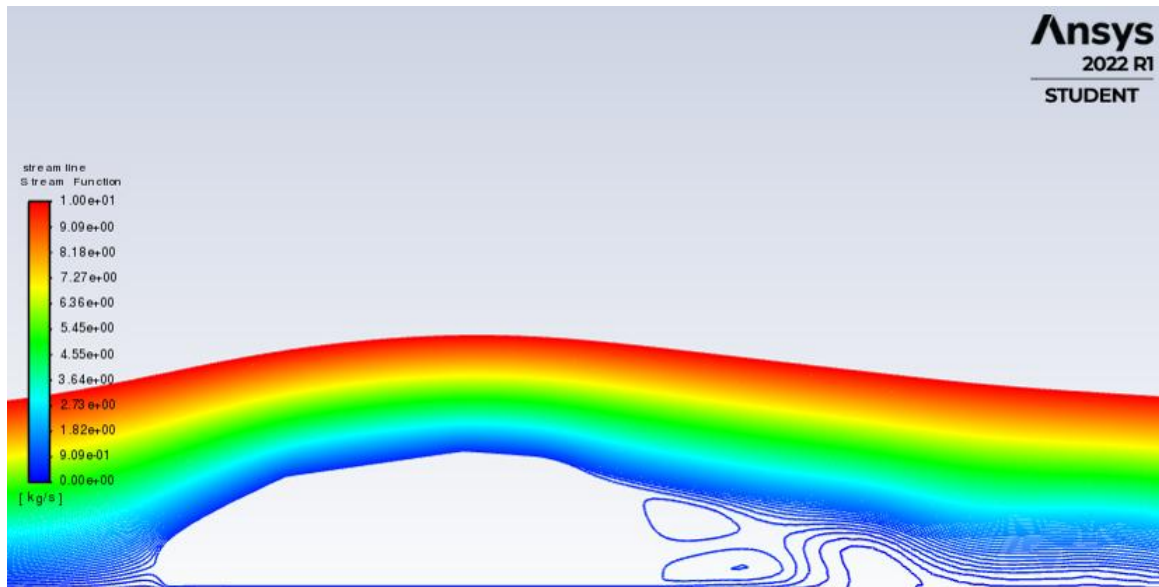
Também observam-se na Figura 39, dois pontos mínimos de pressão, esses pontos são descontinuidades presentes no modelo geométrico. Essa região é onde a carenagem se abre para possibilitar a entrada e saída do piloto do veículo, o que gera essa descontinuidade na superfície superior.

Figura 39 – Coeficiente de pressão na Geometria 1.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 40 – *Streamline* na Geometria 1, com a presença da formação de vórtices na parte posterior.



Fonte: Autoria própria (2022).

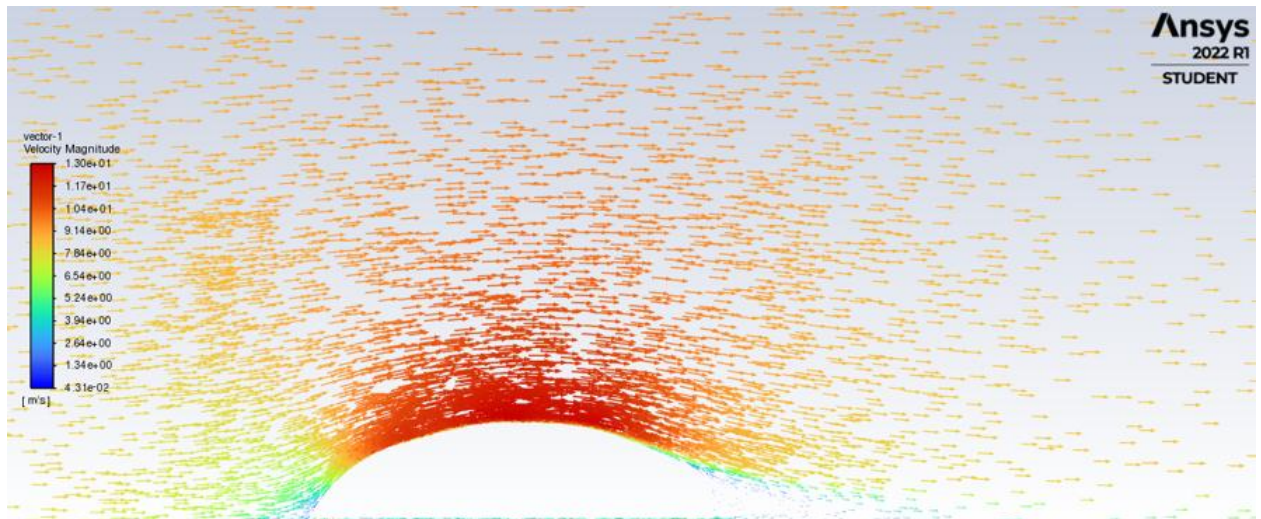
A Figura 40 mostra a *Streamline* ao longo da superfície do corpo, através dela é possível notar a formação de vórtices na parte posterior do corpo, após o descolamento da camada limite.

#### 4.4 Resultados da Geometria 2

A Geometria 2 foi a primeira geometria proposta para a nova carenagem da equipe Relampinhão. A sua forma, inspirada em corpos carenados, surtiu o efeito desejado e alcançou um coeficiente de arrasto de 0,1356, valor 56,42% menor do que o coeficiente de arrasto da Geometria 1.

A Figura 41 mostra os vetores de velocidade ao longo do perfil, evidenciando o comportamento da velocidade próximo à superfície do protótipo, ao longo do escoamento. Assim como na Geometria 1, é possível notar pontos de estagnação na ponta frontal do veículo e na traseira. Além de ocorrer o aumento da velocidade nas regiões mais curvadas da geometria.

**Figura 41 – Contorno de velocidade na Geometria 2.**



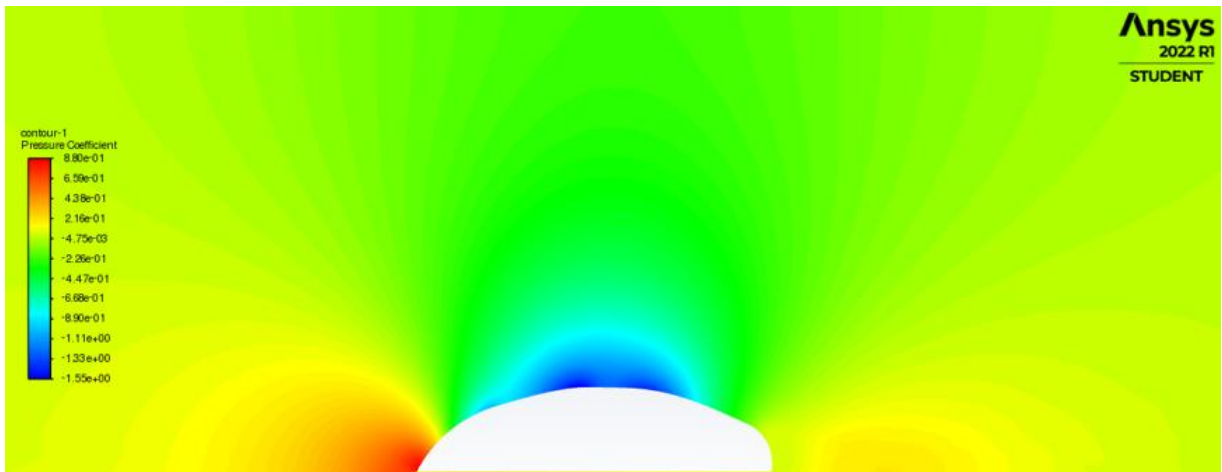
**Fonte: Autoria própria (2022).**

Já na Figura 42 é possível ver as regiões de maior pressão na superfície do modelo, esse comportamento é inverso ao que ocorre na Figura 41 com os vetores de velocidade. E possui o mesmo padrão observado na Geometria 1, como a pressão vai diminuindo devido a inclinação da superfície do protótipo, a velocidade na mesma região aumenta.

Já quanto a *Streamline*, apresentada na Figura 43, observa-se um comportamento diferente do encontrado na Geometria 1. A geometria de corpo carenado permitiu que o escoamento se mantivesse “colado” à superfície do corpo, o que torna o gradiente de pressão adverso mais suave na parte posterior do corpo, reduzindo o arrasto de pressão e, conseqüentemente, o coeficiente de arrasto. Por esse motivo a esteira turbulenta resultante foi bem menor do que a encontrada na Geometria 1.

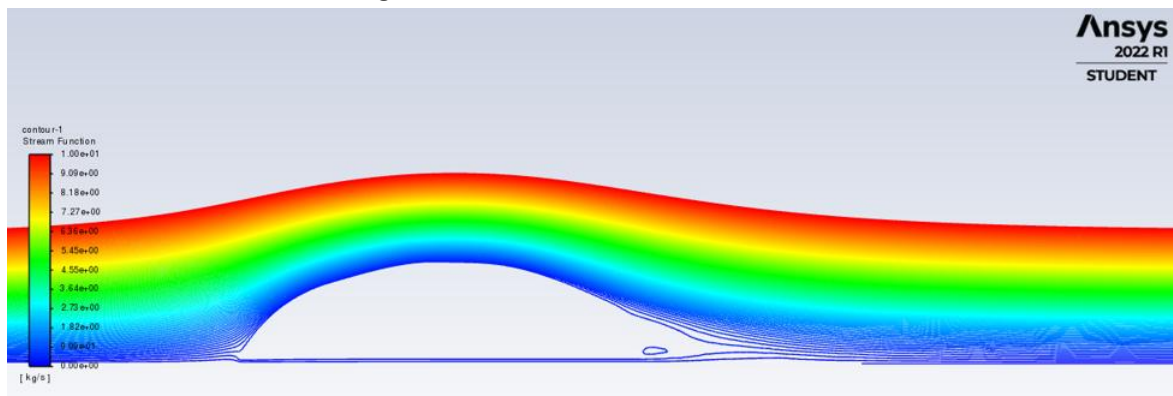
Desta forma, na Geometria 2 foi possível diminuir o coeficiente de arrasto e, conseqüentemente, a formação de vórtices na parte posterior do corpo.

Figura 42 – Coeficiente de pressão na Geometria 2.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 43 – *Streamline* na Geometria 2.



Fonte: Autoria própria (2022).

#### 4.5 Resultados da Geometria 3

A Geometria 3 também foi modelada utilizando o conceito de corpos carenados, bem como as práticas consagradas por outras equipes da Shell Eco-Marathon. A geometria apresentou uma área frontal maior que as outras, por contornar as rodas do veículo e considerar um maior espaço interno. O coeficiente de arrasto obtido para essa geometria foi de 0,2447.

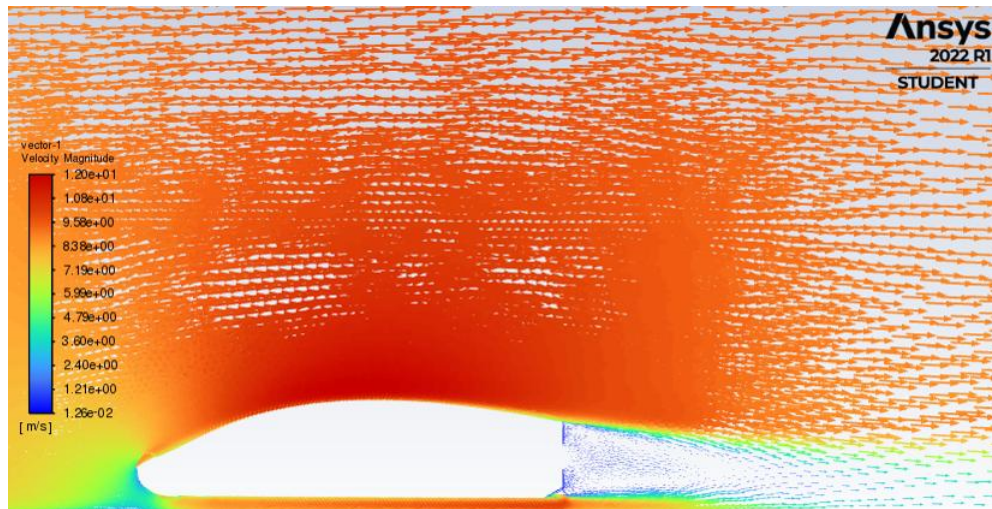
Para avaliação desta Geometria a nível de comparação com as outras, foi necessário retirar da projeção 2D, o espaço de contorno das rodas, porém esse espaço foi contabilizado na projeção para o cálculo da área frontal.

Os vetores de velocidade para a Geometria 3 podem ser vistos na Figura 44.

A velocidade máxima é evidenciada pelos vetores em vermelho na parte superior do veículo. É interessante observar os vórtices formados na região posterior do veículo, que podem ser vistos com mais detalhes na Figura 45.

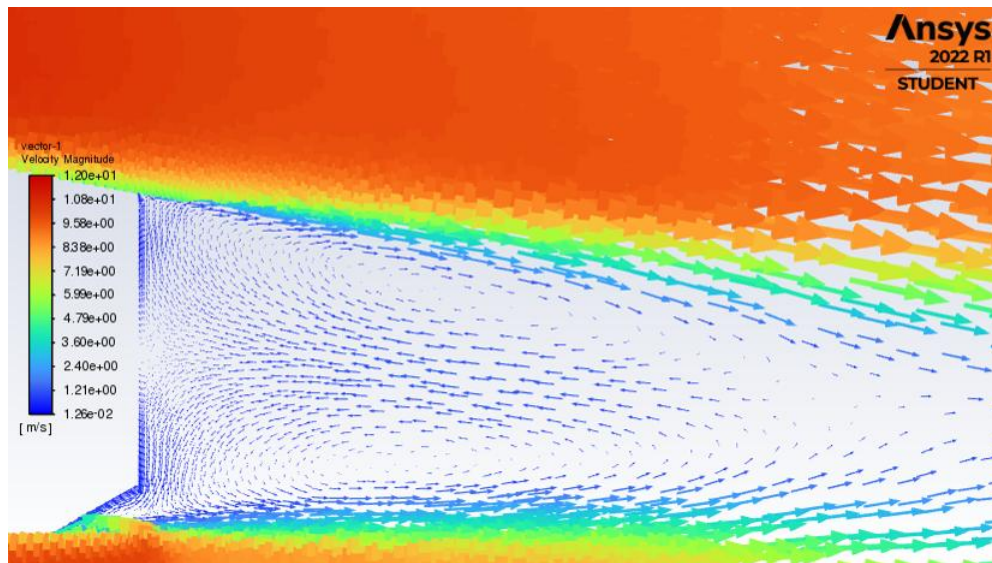


Figura 44 – Contorno de velocidade na Geometria 3.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 45 – Detalhe do contorno de velocidade na região traseira do veículo para a Geometria 3, com a formação de vórtices.

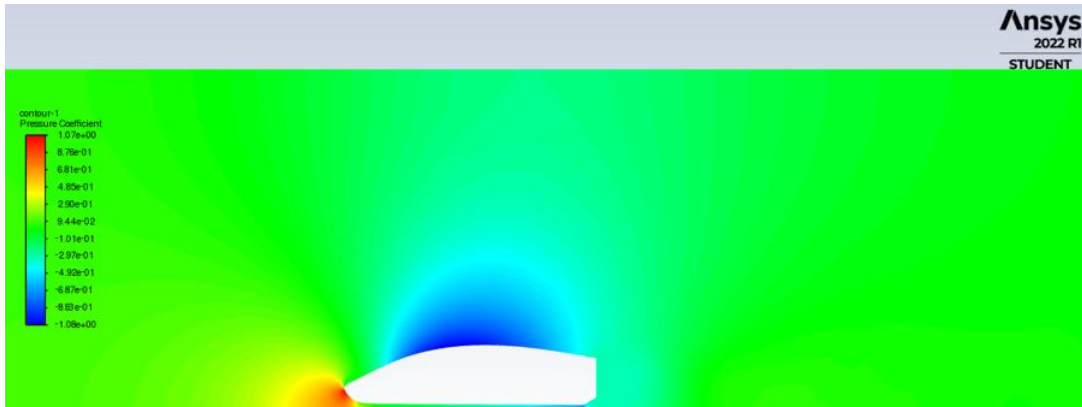


Fonte: Autoria própria (2022).

Esses vórtices são frutos do descolamento da camada limite e geram uma bolha de separação permanente, eles podem ser observados também na *Streamline* mostrada na Figura 47.

O coeficiente de pressão para a Geometria avaliada neste subcapítulo pode ser visto na Figura 46. Assim como foi observado nas outras geometrias, temos um ponto de maior pressão no nariz do veículo e, conforme o escoamento evolui ao longo da superfície, tem-se uma diminuição da pressão em locais onde a velocidade aumenta.

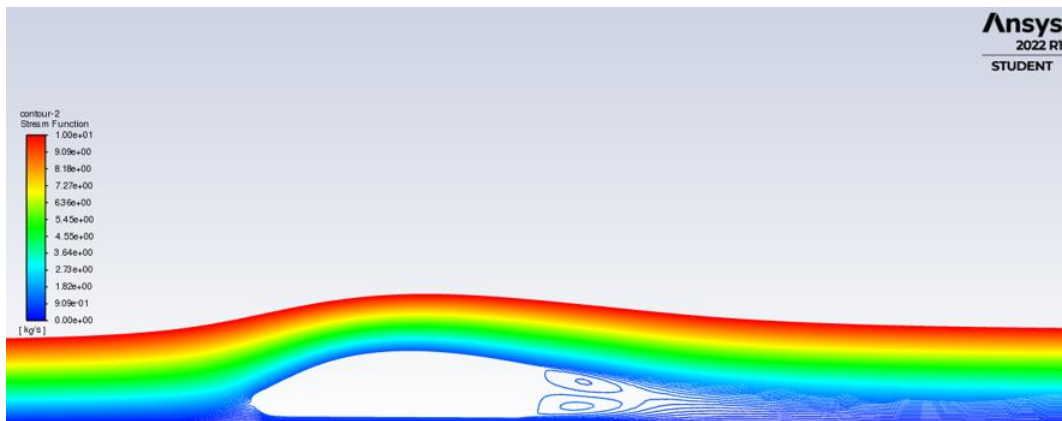
**Figura 46 – Coeficiente de pressão na Geometria 3.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

As linhas de corrente (*Streamlines*) também foram avaliadas para a Geometria 3 e é possível observá-las na Figura 47. Como foi observado nos vetores de velocidade, aqui também é possível perceber os vórtices formados na parte posterior do veículo.

**Figura 47 – Streamline na Geometria 3.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

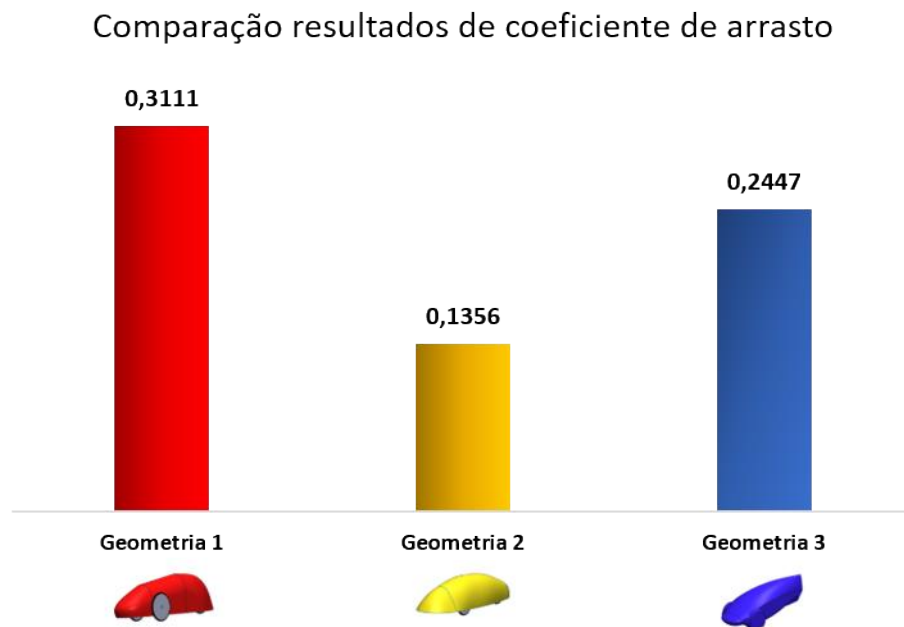
Para a Geometria 3 é importante considerar que talvez a simulação bidimensional não seja tão representativa quanto seria a tridimensional, uma vez que foi considerada a projeção lateral do veículo, que apresenta um corte abrupto na região posterior, nesta vista. A forma de gota, condizente com a teoria dos corpos carenados, é mais evidente na vista superior desta geometria. Além disso, as proteções das capas das rodas tiveram que ser desconsideradas. Outro aspecto importante é que as rodas em si também não foram consideradas nas simulações de nenhuma geometria, o que também poderia influenciar no resultado se fosse feita uma avaliação tridimensional.

Com relação ao projeto desta geometria também foi possível perceber que a parte posterior poderia ser remodelada, a fim de dar uma continuidade maior a geometria, evitando o final abrupto da carenagem na vista lateral. Isso poderia gerar uma diminuição nos vórtices e, conseqüentemente, do coeficiente de arrasto.

#### 4.6 Comparação de resultados e definição da próxima geometria

Este subcapítulo se dedicará em comparar os resultados de coeficiente de arrasto obtidos em cada geometria e a escolha da próxima carenagem. O gráfico apresentado na Figura 48 faz uma comparação entre os coeficientes de arrasto para cada geometria.

**Figura 48 – Comparação entre os coeficientes de arrasto obtidos nas Geometrias 1, 2 e 3.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Os dados obtidos refletem que o modelo apresentado pela Geometria 2 é aquele com menor coeficiente de arrasto, o que favorece o deslocamento do veículo, diminuindo assim o seu consumo de combustível. Conforme a proposta feita nos objetivos deste trabalho, este estudo foi realizado para a definição do modelo que será construído pela equipe Relampinhão para a próxima competição da Shell Eco-Marathon, tomando como base para a escolha o coeficiente de arrasto.

Portanto, o modelo que mais se adequa aos objetivos, e que será escolhido como a próxima geometria a ser fabricada pela equipe, é a Geometria 2.

Além disso é interessante observar que a Geometria 2 apresenta formas mais simples que a Geometria 3 o que facilitaria também o processo de fabricação do novo protótipo.

## 5 CONCLUSÃO

Os principais objetivos deste trabalho foram: modelar duas novas geometrias para carenagens; validar o modelo numérico de acordo com os dados obtidos experimentalmente no artigo “*Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake*” (AHMED; RAMM; FAL-TIN, 1984); e comparar o coeficiente de arrasto das duas novas propostas com o da geometria utilizada na carenagem atual da equipe Relampinhão.

No presente trabalho foi possível analisar esses três pontos apresentados através de simulações no *software Ansys Fluent*®, com a validação do modelo numérico, que apresentou um erro de apenas 2,07% em relação ao resultado experimental. Também foi possível obter o coeficiente de arrasto para a geometria atual da equipe, que teve a seu projeto executado sem atenção a esse fator, e avaliar os coeficientes de arrasto de duas novas geometrias, através das simulações em CFD.

Dessa forma, pôde-se realizar uma análise do arrasto em todas as variações de modelos para determinar o protótipo com melhor eficiência aerodinâmica para o próximo projeto. Esse processo resultou na escolha da Geometria 2, que apresentou um coeficiente de arrasto de 0,1356, valor 56,42% menor que o apresentado pela geometria atual, o Curi 1.

Os estudos e resultados obtidos nesse trabalho serão de grande importância para o desenvolvimento do novo protótipo a ser construído pela equipe Relampinhão, auxiliando na consolidação e expansão do projeto realizado na UTFPR campus Curitiba, bem como nos estudos de novos membros da equipe.

Como recomendação de trabalhos futuros, podem ser feitas análises comparando os resultados obtidos em simulações 2D com resultados obtidos por simulações em 3D. Uma vez que, as geometrias propostas apresentam seções bidimensionais variadas, e o corte lateral realizado para a avaliação bidimensional pode apresentar erros em relação ao resultado que seria obtido em uma avaliação tridimensional, principalmente para a Geometria 3, que apresenta um formato mais irregular e um final abrupto na vista lateral, que foi a vista utilizada nas simulações deste trabalho.

Podem ainda ser feitas alterações nas geometrias propostas a fim de aperfeiçoar as geometrias e reduzir ainda mais o coeficiente de arrasto desses modelos.



## REFERÊNCIAS

- AHMAD, N. E.; ABO-SERIE, E.; GAYLARD, A. Mesh optimization for ground vehicle aerodynamics. **CFD Letters**, v. 2, n. 1, p. 54–65, 2010.
- AHMED, S. R.; RAMM, G.; FALTIN, G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. **SAE Transactions**, JSTOR, p. 473–503, 1984.
- ALTOÉ, L. *et al.* Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. **Estudos Avançados**, SciELO Brasil, v. 31, p. 285–297, 2017.
- AMBARITA, H.; SIREGAR, M.; KAWAI, H. Study on aerodynamics characteristics an urban concept car for energy-efficient race. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2018. v. 343, n. 1, p. 012025.
- ARPINO, F. *et al.* Numerical and experimental investigation of the flow over a car prototype for the shell eco marathon. 2019.
- BARDINA, J.; HUANG, P.; COAKLEY, T. Turbulence modeling validation, testing, and development. **NASA Technical Memorandum**, 05 1997.
- BAYRAKTAR, I.; LANDMAN, D.; BAYSAL, O. Experimental and computational investigation of ahmed body for ground vehicle aerodynamics. **SAE transactions**, JSTOR, p. 321–331, 2001.
- ÇENGEL Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações**. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2015. ISBN 9788580550665.
- CIEŚLIŃSKI, A. *et al.* Investigation on aerodynamics of super-effective car for drag reduction. Lodz University of Technology. Faculty of Mechanical Engineering. Department . . . , 2016.
- COUNCIL, N. R. *et al.* **Effectiveness and impact of corporate average fuel economy (CAFE) standards**. [S.l.]: National Academies Press, 2002.
- CZYŻ, Z.; KARPIŃSKI, P.; KOÇAK, S. Numerical analysis of the influence of particular parts of the high efficient electric vehicle on the aerodynamic forces. **Advances in Science and Technology. Research Journal**, v. 13, n. 4, 2019.
- DOBREV, I.; MASSOUH, F. Investigation of relationship between drag and lift coefficients for a generic car model. BULTRANS-2014 Proceedings, 2014.
- DOSIL, D. F. **Aerodynamic Analysis and Desing of a aCar for the Shell Eco Marathon**. jun. 2016. 114 p. Dissertação (Mestrado) — Aalborg University, jun. 2016.
- EINSTEIN, A. **What Life Means to Einstein: An Interview by George Sylvester Viereck**. 1929. Disponível em: [http://www.saturdayeveningpost.com/wp-content/uploads/satevepost/what\\_life\\_means\\_to\\_einstein.pdf](http://www.saturdayeveningpost.com/wp-content/uploads/satevepost/what_life_means_to_einstein.pdf). Acesso em: 06 nov. 2022.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M.; STREET, R. L. **Computational methods for fluid dynamics**. [S.l.]: Springer, 2002. v. 3.
- FOX, R. W. *et al.* **Introdução à Mecânica Dos Fluidos, 8ª**. [S.l.]: LTC Rio de Janeiro, 2014.
- GALMARINI, G. *et al.* Solar prototype for shell-eco marathon race. In: SAE INTERNATIONAL. **SAE CONGRESS 2017**. [S.l.], 2017. p. 1–10.

GRUNDITZ, E.; JANSSON, E. **Modelling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart**. 2009. Dissertação (Mestrado), 2009.

JOLIVERIE, L. **Shell Eco-Marathon : microjoule invaincu pour la 14ème année consécutive**. 2019. Disponível em: <https://www.la-joliverie.com/actualites/1605-shell-eco-marathon-microjoule-invaincu-pour-la-14eme-annee-consecutive.html>. Acesso em: 27 abr. 2022.

LAUNDER, B.; SPALDING, D. The numerical computation of turbulent flow computer methods. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 3, p. 269–289, 03 1974.

LEITÃO, J. M. G. **Optimização Aerodinâmica da forma da carroçaria de um veículo automóvel protótipo de elevada eficiência energética**. 2014. Tese (Doutorado) — Universidade de Coimbra, 2014.

LUCENA, L. d. S. *et al.* Simulação de fluxo de fluidos em meios porosos desordenados uma análise de efeito de escala na estimativa da permeabilidade e do coeficiente de arrasto. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

MANSOUR, H.; AFIFY, R.; KASSEM, O. Three-dimensional simulation of new car profile. **Fluids**, MDPI, v. 6, n. 1, p. 8, 2020.

MEGAWHAT. **Barril Equivalente de Petróleo (boe)**. 2022. Disponível em: <https://megawhat.energy/verbetes/35943/barril-equivalente-de-petroleo-boe>. Acesso em: 27 abr. 2022.

MEILE, W. *et al.* Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the ahmed body. **CFD Letters**, v. 3, 03 2011.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. [S.l.]: Editora Blucher, 2004.

MURAD, N. M. *et al.* **Simulation of vehicle A-pillar aerodynamics using various turbulence models**. [S.l.], 2004.

OLIVEIRA, M. G. N. d.; CRUZ, M. A. L.; FERREIRA, T. Impactos causados pelo uso dos combustíveis fósseis e o uso do biocombustível como solução viável. 042, 2021.

ONU. **Adoção do Acordo de Paris**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/node/88191>. Acesso em: 16 abr. 2022.

ONU. **Objetivos de desenvolvimento sustentável - ODS 13**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/13>. Acesso em: 16 abr. 2022.

ROVERE, E. L. O brasil ea cop-21. **Mudanças climáticas: o desafio do século**, p. 11–24, 2016.

SANTIN, J. J. **The World's Most Fuel Efficient Vehicle: Design and Development of Pac Car II**. [S.l.]: vdf Hochschulverlag AG, 2007.

SHELL. **SHELL ECO-MARATHON BRASIL**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.shell.com.br/energia-e-inovacao/ecomarathon/shell-eco-marathon-brasil.html>. Acesso em: 27 abr. 2022.

SHELL ECO-MARATHON. **Official rules**. [S.l.], 2022.

SIMON, W. Análise numérica dos contornos de velocidade e distribuições de pressão do escoamento bidimensional sobre perfis veiculares utilizando cfd. 2021.

SMITH, C. B. **Análise da difusão de novas tecnologias automotivas em prol da eficiência energética na frota de novos veículos leves no Brasil**. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

SOARES, R. **UEstudo Fluidodinâmico Computacional (CFD) Aplicado à Aerodinâmica do Esporte Automobilístico**. 09 2013. Tese (Doutorado), 09 2013.

SOUSA BRUNO SILVA DE; GONÇALVES, H. H. A. Análise da aerodinâmica de carros populares. **Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Minas Gerais**, 2013.

STUDY, N. R. C. U. T. R. B. C. for the N. T. E. **Tires and passenger vehicle fuel economy: informing consumers, improving performance**. [S.l.]: Transportation Research Board, 2006. v. 286.

TEAM, T. F. E. **TU FAST**. 2022. Disponível em: <https://tufast-eco.de/>. Acesso em: 27 abr. 2022.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Pearson education, 2007.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**, 6ª. [S.l.]: Rio de Janeiro: McGraw Hill Brasil, 2010.

WILCOX, D. C. *et al.* **Turbulence modeling for CFD**. [S.l.]: DCW industries La Canada, CA, 1998. v. 2.

WINDLIN, F. L. *et al.* Aerodinâmica veicular. **Motores de Combustão Interna Edição**, v. 1, p. 251–311, 2012.

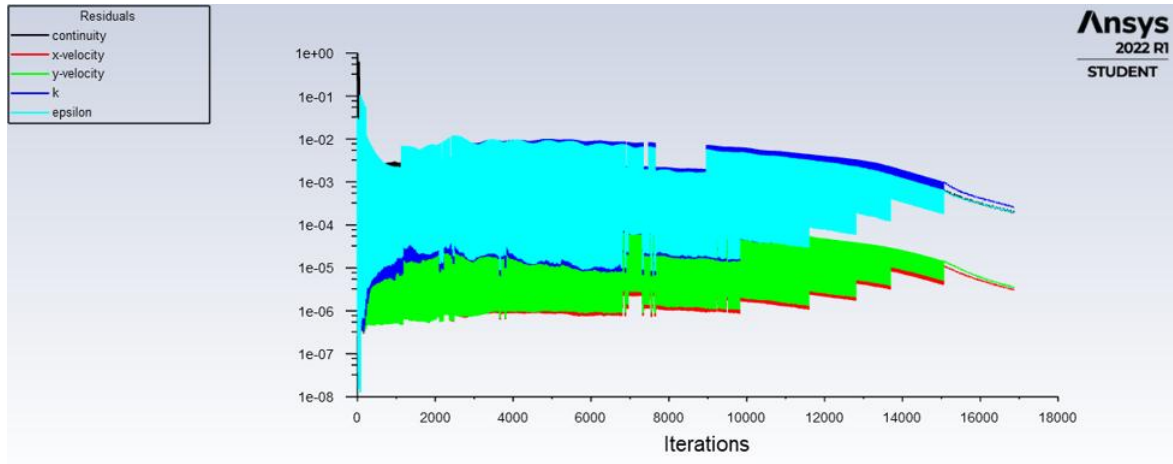
ZAMOLO RICCARDO; NOBILE, E. External aerodynamics over ahmed's body with ansys fluent. **DIA - Dipartimento di Ingegneria e Architettura Università degli Studi di Trieste**, 2017.

ZHANG, C. *et al.* Turbulence modeling effects on the cfd predictions of flow over a detailed full-scale sedan vehicle. **Fluids**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 4, n. 3, p. 148, 2019.

## **APÊNDICE A – Gráficos residuais do *Software Ansys***

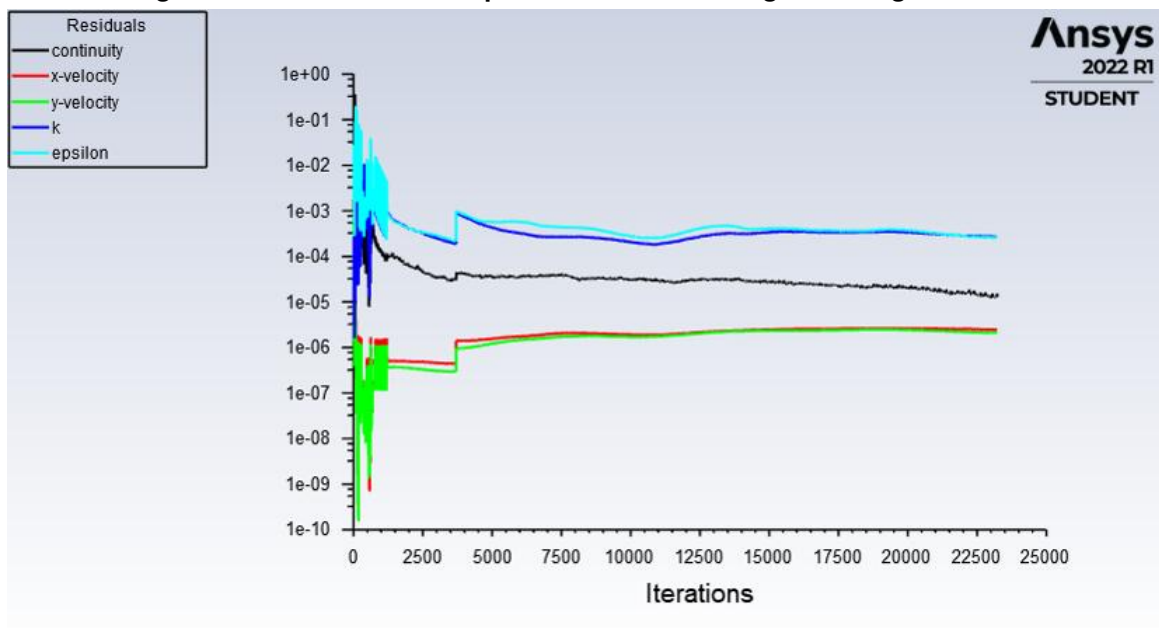
O critério adotado dentro do *Software* para convergência, foi de um resíduo inferior à  $10^{-3}$  para as equações de continuidade, velocidade,  $\kappa$  e  $\epsilon$ . Os gráficos 49, 50, 51, 52 abaixo, apresentam o residual ao fim das iterações, conforme critério adotado.

**Figura 49 – Gráfico residual para verificar a convergência do corpo de Ahmed.**

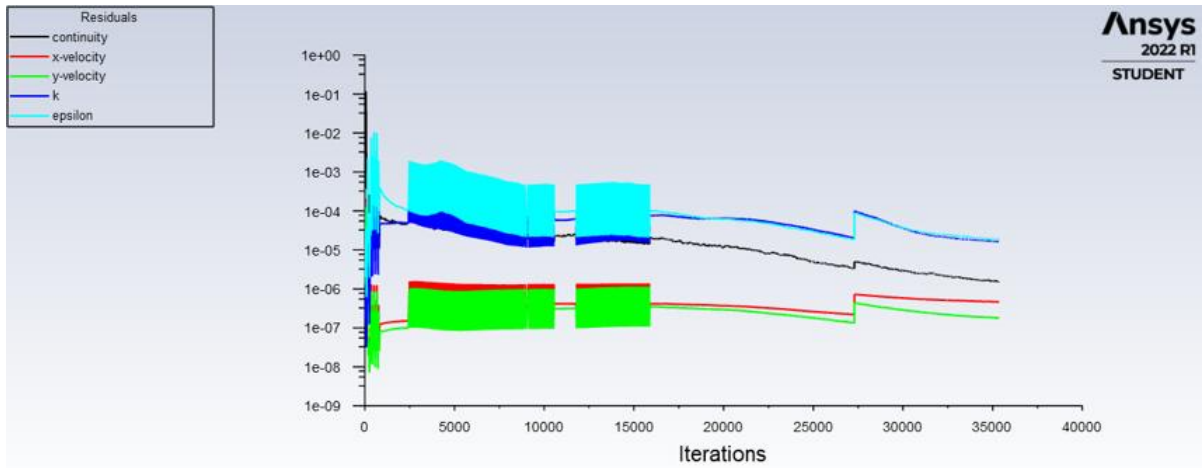


Fonte: Autoria própria (2022).

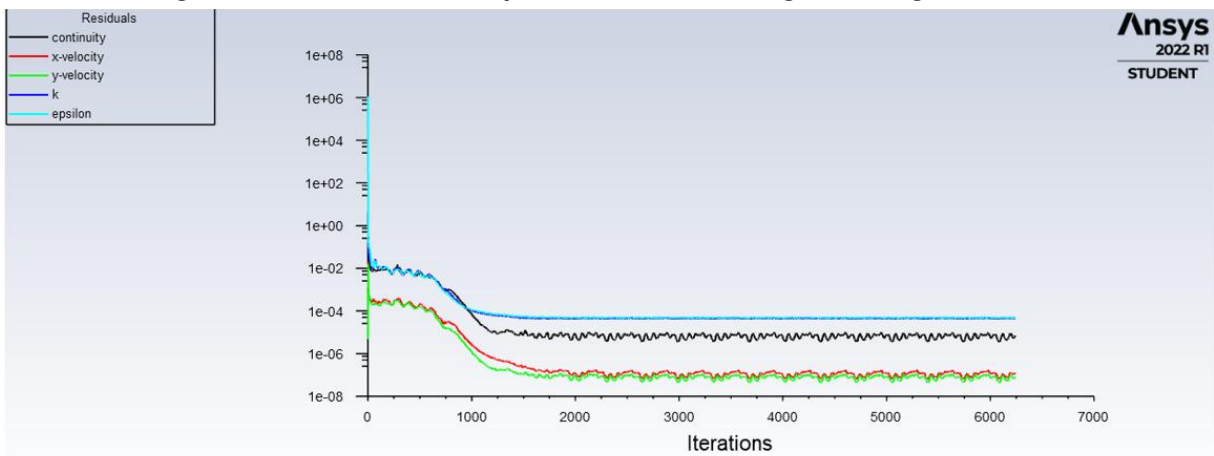
**Figura 50 – Gráfico residual para verificar a convergência da geometria 1.**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 51 – Gráfico residual para verificar a convergência da geometria 2.**

Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 52 – Gráfico residual para verificar a convergência da geometria 3.**

Fonte: Autoria própria (2022).

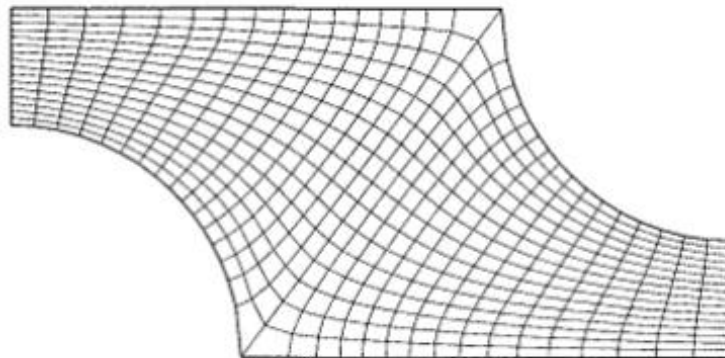
## **APÊNDICE B – Tipos de malhas**

As malhas dividem o domínio da solução em números finitos de divisões, ou subdomínios, e podem ser classificadas como estruturada, bloco estruturada e não estruturada. Para este trabalho foi utilizado malhas do tipo bloco estruturada.

### B.1 Malha Estruturada

As malhas estruturadas são malhas que estão divididas em uma estrutura de linhas e colunas, análogo às coordenadas cartesianas, onde cada linha possui apenas um ponto de cruzamento com outras linhas (SOARES, 2013). A Figura 53 apresenta um exemplo de malha estruturada.

**Figura 53 – Exemplo de malha estruturada, bidimensional**

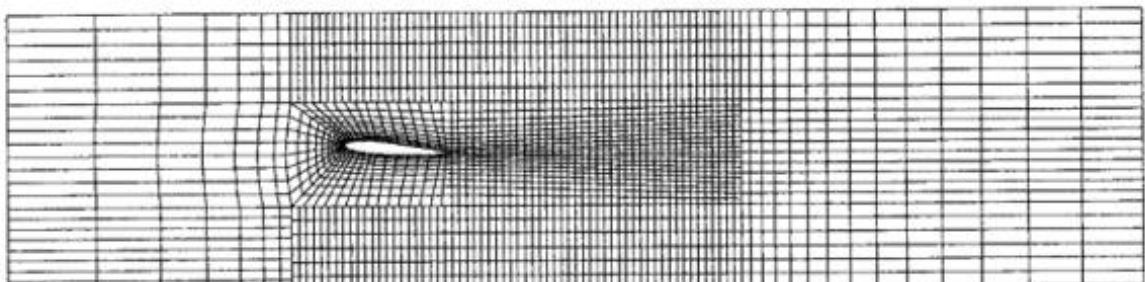


Fonte: Ferziger, Perić e Street (2002).

### B.2 Malha Bloco Estruturada

Já as malhas de bloco estruturada, existem pelo menos duas subdivisões do domínio. Geralmente uma malha mais grosseira possui elementos maiores e é feito um tratamento especial na malha mais próxima à interface do corpo (SOARES, 2013). A Figura 54 apresenta um exemplo de bloco estruturada bidimensional.

**Figura 54 – Exemplo de malha de bloco estruturada, bidimensional, aplicada a um perfil NACA.**



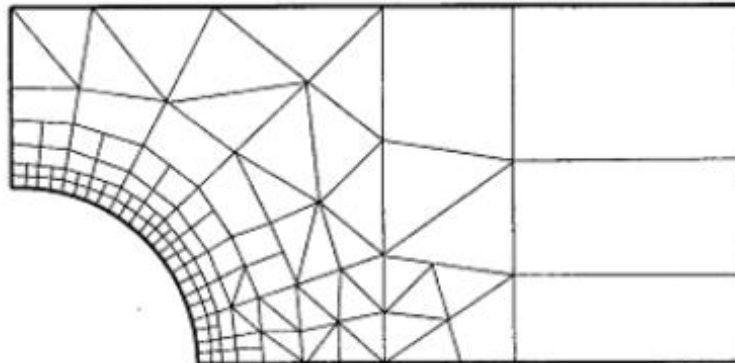
Fonte: Ferziger, Perić e Street (2002).



### B.3 Malha não Estruturada

Este tipo de malha costuma ser utilizado para geometrias muito complexas, neste caso a malha preenche arbitrariamente todo o domínio e os elementos podem ter diversos formatos, pois não há restrições quanto ao número de nós. Geralmente esses elementos possuem formatos triangulares ou de quadriláteros para aplicações bidimensionais (SOARES, 2013). A Figura 18 apresenta um exemplo de malha não estruturada.

**Figura 55 – Exemplo de malha não estruturada**



**Fonte: Ferziger, Perić e Street (2002).**