

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA - CAMPUS LAGES
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

VINICIUS GUIMARÃES JUTEL

**DESENVOLVIMENTO DE CARROCERIA E ANÁLISE CFD PARA UM
VEÍCULO DE COMPETIÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

VINICIUS GUIMARÃES JUTEL, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA – CAMPUS LAGES
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

VINICIUS GUIMARÃES JUTEL

**DESENVOLVIMENTO DE CARROCERIA E ANÁLISE CFD PARA UM
VEÍCULO DE COMPETIÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para aprovação e obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Me. Fernando Osório.

LAGES, 2023.

Vinicius Guimarães Jutel

**DESENVOLVIMENTO DE CARROCERIA E ANÁLISE CFD PARA UM VEÍCULO
DE COMPETIÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica.

Lages, 18 de dezembro de 2023.

Prof(a).Me. Natalia Madalena Boelter,
Coordenador(a) do Curso

Banca Examinadora:

Prof.Me. Fernando Da Silva Osório,
Orientador
IFSC Campus Lages

Prof.Me. Ariton Araldi
Avaliador
IFSC Campus Lages

Prof.Me. Ricardo Teran Muhl
Avaliador
IFSC Campus Lages

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores e colegas que participaram dessa jornada comigo. Sem eles, minha evolução não seria a mesma. À minha família, amigos e minha namorada, expresso todo o meu amor e agradecimento pelo apoio que me foi dado. No entanto, quero dedicar um agradecimento especial a meu pai, a pessoa que sempre foi minha inspiração pela sua força de vontade e dedicação a família. Ele me incentivou e forneceu o suporte necessário para que eu pudesse trilhar este caminho e concluir esta importante fase da minha vida.

RESUMO

A indústria automotiva enfrenta o desafio de reduzir as emissões de gases poluentes, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias, sendo os carros elétricos algo promissor. A Shell Eco-marathon visa a eficiência energética e o desenvolvimento de veículos mais eficientes, abrangendo todas as partes, que inclui a eficiência aerodinâmica. Este estudo concentra-se no desafio do arrasto aerodinâmico em carrocerias de veículos para a competição, utilizando simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para projetar e testar virtualmente. Com base nessas simulações, foram desenvolvidos três modelos de carrocerias, e identificado o Modelo 2 como um intermediário eficaz entre simplicidade e eficiência aerodinâmica. O SCz de 0,0417 m², resultado do coeficiente de arrasto multiplicado pela área frontal, evidenciando o Modelo 2 como uma opção viável para construção e aplicação em competições de eficiência energética.

Palavras-chave: CFD, Veículos elétricos, carroceria, eficiência energética, Shell Eco-Marathon.

ABSTRACT

The automotive industry faces the challenge of reducing pollutant emissions, driving the development of technologies, with electric cars being a promising avenue. The Shell Eco-Marathon aims for energy efficiency and the creation of more efficient vehicles, encompassing all aspects, including aerodynamic efficiency. This study focuses on the challenge of aerodynamic drag in vehicle bodies for the competition, utilizing Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations for virtual design and testing. Based on these simulations, three body models were developed, with Model 2 identified as an effective intermediate between simplicity and aerodynamic efficiency. With an SCz of 0.0417 m^2 , a result of the drag coefficient multiplied by the frontal area, Model 2 emerges as a viable option for construction and application in energy efficiency competitions.

Keywords: CFD, Electric Vehicles, Body Design, Energy Efficiency, Shell Eco-Marathon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coeficientes de arrasto C_x para diferentes geometrias [5].....	13
Figura 2 - Veículo de alta eficiência da universidade de Quebec, Canadá [7].....	14
Figura 3 - Túnel de vento Ferrari [9].....	14
Figura 4 - Simulação CFD no software ANSYS do veículo Oreca 05 [21].....	15
Figura 5 - Proporção da força de arrasto em um veículo transitando em uma estrada plana a velocidade constante [2].....	17
Figura 6 - Shell Eco Marathon Americas 2023 [15].....	18
Figura 7 - Shell Eco Marathon, França 1985 [17].....	18
Figura 8 - Shell Eco Marathon Brasil 2023 [18].....	19
Figura 9 - a) veículo do tipo protótipo [19], b) veículo do tipo urban concept [20].....	19
Figura 10 - Tensão de cisalhamento (τ) tangencial a superfície do objeto [2].....	20
Figura 11 - Camada limite de um corpo [6].....	21
Figura 12 - Perfil de velocidades, laminar e turbulento em uma superfície plana [2].	21
Figura 13 - Camada limite para uma placa plana, onde U é a velocidade do fluido, x é a distância do bordo de ataque e $\delta(x)$ é a espessura da camada limite em função de x [2].....	22
Figura 14 - Forças e momentos sobre um corpo imerso em um escoamento uniforme [3].....	23
Figura 15 - Esquema de separação da camada limite [10].....	24
Figura 16 - Separação da camada limite em um veículo rombudo e um aerofólio [2]... 24	
Figura 17 - Forças atuantes em um aerofólio [11].....	25
Figura 18 - Malha gerada sob a superfície de um veículo [22].....	27
Figura 19 - Regiões de análise do veículo a) Saída do escoamento, b) Região central e c) Bico frontal. Adaptado de [2]	31
Figura 20 - Fluxograma do desenvolvimento do projeto da carroceria.....	32
Figura 21 - Posição de pilotagem comum [13].....	35
Figura 22 - Dimensionamento do Cockpit.....	35
Figura 23 - Dimensionamento Traseiro.....	36
Figura 24 - Dimensionamento Lateral.....	36
Figura 25 - Malha automática generalizada do volume de controle.....	38
Figura 26 - Malha refinada automaticamente no volume em verde.....	38
Figura 27 - Vista em corte da malha gerada.....	39
Figura 28 - Solo e sentido de giro das rodas.....	40
Figura 29 - Área frontal do veículo.....	40
Figura 30 - Modelo Versão 1.....	41
Figura 31 - Linhas de escoamento com gradiente de velocidade modelo 1.....	41
Figura 32 - Corte transversal do campo de pressões do modelo 1.....	42
Figura 33 - Linhas de escoamento da parte traseira modelo 1.....	42

Figura 34 - Corte transversal do campo de velocidades de escoamento modelo 1..	43
Figura 35 - Modelo Versão 2.....	44
Figura 36 - Vista superior e lateral Pac-Car 2. Adaptado de [2].....	44
Figura 37 - Linhas de escoamento parte traseira modelo 2.....	45
Figura 38 - Corte transversal do campo de pressões do modelo 2.....	45
Figura 39 - Corte transversal do campo de velocidades de escoamento modelo 2..	46
Figura 40 - Linhas de escoamento com gradiente de velocidade modelo 2.....	46
Figura 41 - Modelo Versão 3.....	47
Figura 42 - Corte transversal do campo de pressões do modelo 3.....	48
Figura 43 - Corte transversal do campo de velocidades do modelo 3.....	48
Figura 44 - Linhas de escoamento com gradiente de velocidade modelo 3.....	49
Figura 45 - Bico frontal modelo 3.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados aerodinâmicos de veículos projetados para maratonas de eficiência energética.....	22
Tabela 2 - Dados SCx de veículos projetados para maratonas de eficiência energética.....	23
Tabela 3 - Condições de contorno usadas nas simulações.....	30
Tabela 4 - Resultados obtidos com as simulações.....	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados antropométricos para uma população feminina, trabalhadora de escritório de Curitiba-SC. [28]. (Adaptado).....	27
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Definição do Problema.....	13
1.2 Objetivo Geral.....	15
1.3 Objetivos Específicos.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Breve histórico da competição de eficiência energética Shell Eco-marathon.....	17
2.2 Arrasto Aerodinâmico.....	20
2.2.1 Arrasto por Fricção.....	20
2.2.1.1 Camada Limite.....	20
2.2.1.2 Número de Reynolds.....	22
2.2.2 Arrasto de Forma.....	23
2.2.2.1 Separação da Camada Limite.....	23
2.2.2.2 Arrasto Induzido.....	24
2.2.2.3 Arrasto de Interferência.....	25
2.3 Coeficiente de Arrasto.....	26
2.4 Análise CFD.....	26
2.4.1 Modelo Numérico.....	27
2.4.2 Simulação da Camada Limite.....	28
2.5 Dados Aerodinâmicos de Projetos Anteriores.....	29
3 METODOLOGIA.....	30
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	33
4.1 Requisitos de Projeto.....	33
4.1.1 Regulamento Shell Eco Marathon.....	33
4.1.2 Antropometria.....	34
4.1.3 Dimensionamento Base.....	35
4.2 Dados para Simulação.....	37
4.3 Modelo 3D e Análise CFD.....	41
4.3.1 Modelo Versão 1.....	41
4.3.2 Modelo Versão 2.....	44
4.3.3 Modelo Versão 3.....	47
4.4 Modelo Final Proposto.....	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva enfrenta o desafio de reduzir a emissão de gases poluentes e mitigar os impactos das mudanças climáticas globais. Nesse contexto, a busca por soluções de mobilidade mais sustentáveis e eficientes tem ganhado destaque. Uma das abordagens promissoras é o desenvolvimento de veículos elétricos, que oferecem uma alternativa livre de emissões diretas de gases poluentes [1].

Também visando aprimorar a eficiência energética, há o desenvolvimento de veículos com menor resistência ao movimento. A redução do arrasto torna-se crucial para maximizar a autonomia dos veículos e aumentar sua eficiência. Essa resistência abrange toda a força que se opõe ao movimento, como a resistência ao rolamento gerada no contato dos pneus com o solo e o arrasto do pneu durante curvas. Em veículos de competição, o arrasto aerodinâmico pode representar até 40% do total. Dentro desse contexto, este estudo se concentra exclusivamente nos efeitos da resistência aerodinâmica, considerando que a redução do arrasto desempenha um papel crucial na maximização da autonomia dos veículos e no aumento de sua eficiência [2].

A complexidade da análise aerodinâmica reside na necessidade de considerar diversos fatores, como a forma da carroceria, geometria, fluxo de ar ao redor do veículo e interações com componentes específicos. Além disso, a obtenção de dados aerodinâmicos confiáveis requer o uso de técnicas avançadas, como a simulação computacional por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês Computational Fluid Dynamics) ou a simulação em túnel de vento [3].

1.1 Definição do Problema

Em competições de eficiência energética, o objetivo é percorrer a maior distância possível com a mesma carga. Muitos fatores influenciam na distância percorrida do veículo, e um dos principais é o arrasto aerodinâmico. O arrasto aerodinâmico é a força contrária ao movimento, sofrida por corpos que se deslocam através do ar. A força de arrasto aerodinâmico é aplicada sob a superfície do elemento, com isso, sua área de contato e seu formato são fatores que influenciam na quantidade de força sofrida [4]. A Figura 1 apresenta diferentes geometrias e seus respectivos coeficientes de arrasto representado por C_x .

Formato	Descrição	C_x	Formato	Descrição	C_x
	Formato mais aerodinâmico	0,08		Caminhão	0,90
	Carro esporte	0,25		Ciclista em competição	0,90
	Semi-esfera face plana atrás	0,38		Cubo	1,05
	Carros de passeio	0,40		Placa quadrada	1,2
	Esfera	0,47		Semi-esfera face plana frontal	1,42
	Ônibus	0,70		Motociclista	1,8
	Cilindro vertical	0,90		Secção em C	2,3

Figura 1 - Coeficientes de arrasto C_x para diferentes geometrias [5].

Baixos coeficientes de arrasto em veículos, implicam em geometrias mais alongadas e arredondadas, que se aproximam do formato de gota [6]. A construção deste tipo de geometria demanda processos de fabricação mais sofisticados e a utilização de materiais especializados, aumentando seu custo de fabricação. A Figura 2 apresenta o veículo da universidade de Quebec, Canadá, que competiu no ano de 2011 que utilizou processos de moldagem de fibra de carbono [7].



Figura 2 - Veículo de alta eficiência da universidade de Quebec, Canadá [7].

A análise de mecânica dos fluidos é no geral complexa, e demanda experimentos práticos para determinação de seu comportamento físico. Na aerodinâmica são comumente usados os túneis de vento, que são ambientes controlados utilizados para simular o fluxo de ar que passa sobre objetos de teste, apresentando medições de força de arrasto e sustentação, e descrevendo o comportamento do fluxo de ar. Esta tecnologia tem uma boa precisão, e é utilizada em muitas áreas da engenharia, mas apresenta um custo elevado dependendo da aplicação, demandando grande infraestrutura, e consumindo muito tempo para realizar as simulações [8]. A Figura 3 apresenta um túnel de vento utilizado pela Ferrari, fabricante de carros esportivos e equipe de Fórmula 1.



Figura 3 - Túnel de vento Ferrari [9].

Mas também existem métodos computacionais para analisar a dinâmica dos fluidos, sendo possível modelar objetos e simular de várias formas o escoamento e determinar seu comportamento. O CFD (Computational Fluid Dynamics) como é chamado, trata-se da simulação numérica do escoamento, que pode apresentar resultados muito próximos da realidade [4]. A Figura 4 apresenta a simulação do veículo Oreca 05, no software ANSYS, mostrando o gradiente de pressão ao longo de sua superfície, e linhas de escoamento.

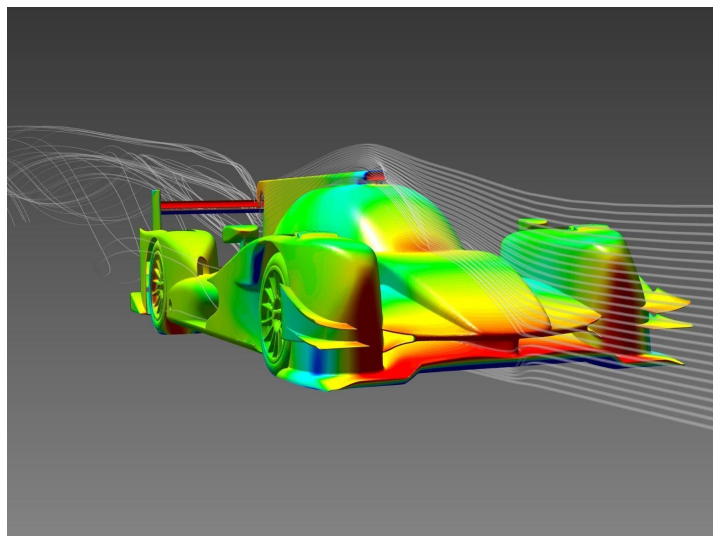


Figura 4 - Simulação CFD no software ANSYS do veículo Oreca 05 [21].

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um design de carroceria que tenha um coeficiente de arrasto razoável, que proporcione um desempenho aerodinâmico moderado, resultando num valor de SC_x abaixo de $0,0475 \text{ m}^2$, buscando uma geometria simples, mas ainda assim competitiva.

1.3 Objetivos Específicos

Para criação desta carroceria de um veículo de competição de eficiência energética, é necessário obter os dados de eficiência aerodinâmica de veículos que participaram anteriormente desta competição, para que assim os dados da carroceria criada possam ser comparados. Sendo assim, os objetivos específicos são:

1. Modelagem 3D da carroceria.
2. Determinação do coeficiente de arrasto da carroceria proposta, através da simulação CFD.
3. Comparação dos resultados obtidos da simulação CFD, com os dados obtidos na revisão bibliográfica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo do arrasto em veículos compreende diversas formas de resistência que influenciam o desempenho e a eficiência do movimento, sendo cinco tipos principais citados abaixo:

- **Arrasto do pneu:** Também chamado de resistência ao rolamento, é gerado no contato do pneu com o solo.
- **Arrasto do pneu em curvas:** Surge quando o veículo está realizando uma curva.
- **Resistência de subida:** Resulta da força gerada quando o veículo está se movendo em aclive.
- **Resistência de aceleração:** Gerada durante o início do movimento. Esse efeito é desconsiderado quando o veículo está em velocidade constante.
- **Arrasto aerodinâmico:** É gerado a partir da interação do ar sobre a superfície do veículo em movimento.

A proporção que estes tipos de arrasto afetam o veículo varia de acordo com o estado de movimento em que ele se encontra, onde a contribuição do arrasto aerodinâmico pode representar até 40% do arrasto total do veículo como evidenciado na Figura 5, destacando a significativa importância de um design aerodinâmico eficiente [2].

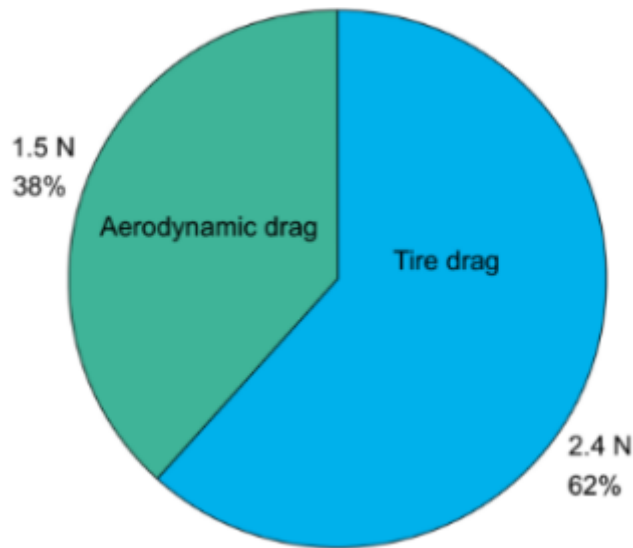


Figura 5 - Proporção da força de arrasto em um veículo transitando em uma estrada plana a velocidade constante [2].

A aerodinâmica estuda o movimento relativo entre um sólido e um fluido gasoso, determinando forças e pressões geradas no processo. Essa interação entre o sólido e o fluido, se diferencia fortemente dependendo da magnitude da velocidade. A faixa de velocidade de estudo de veículos no geral se encontra no regime subsônico baixo, ou seja, número de Mach menor que 0,3 [4].

2.1 Breve histórico da competição de eficiência energética Shell Eco-marathon.

Atualmente, a Shell Eco-Marathon é a principal competição global de eficiência energética, atraindo mais de cinco mil alunos de 52 países a cada ano. A Figura 6 mostra a competição realizada nos Estados Unidos neste ano. Destinada a estudantes do ensino médio e universitários, a competição tem o propósito de

estimular os participantes a superarem limites técnicos, promovendo o desenvolvimento de habilidades e inspirando pessoas ao longo do processo [14].



Figura 6 - Shell Eco Marathon Americas 2023 [15].

A competição foi criada em 1939 por Bob Greenshields, diretor de pesquisa da Shell, nos Estados Unidos, que desafiou seus colegas cientistas para determinar quem conseguiria percorrer a maior distância com a mesma quantidade de combustível. Mas foi somente em 1985 que a competição foi oficializada, e lançada na França, dando início a competição apresentada na Figura 7 [14].

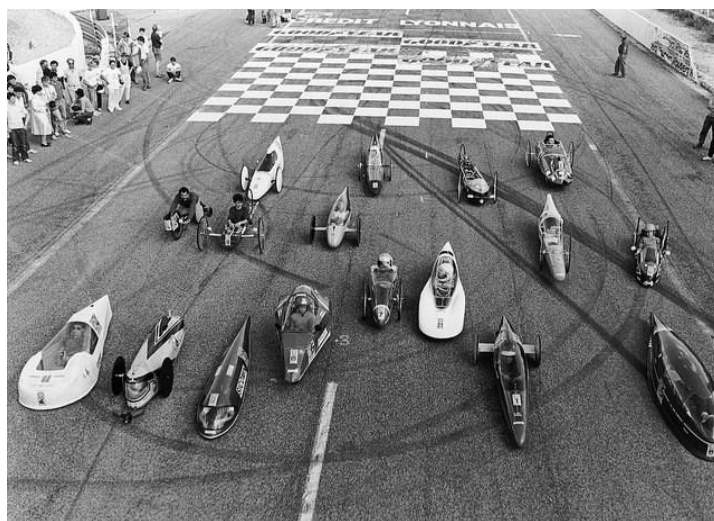


Figura 7 - Shell Eco Marathon, França 1985 [17].

No Brasil, a competição é realizada desde 2016, que reúne todos os anos inúmeras equipes das principais universidades do país [16]. A Figura 8 mostra a competição realizada neste ano.



Figura 8 - Shell Eco Marathon Brasil 2023 [18].

A competição possui diferentes categorias, distinguindo-se entre protótipos, que têm três rodas, e urban concept, com quatro rodas, com design mais próximo dos carros atuais. Além disso, há variação nos tipos de energia empregados, que incluem gasolina, álcool, hidrogênio e elétrico. A Figura 9 apresenta os dois tipos de veículos da competição, sendo o do tipo protótipo a Figura 9a e o urban concept a Figura 9b.

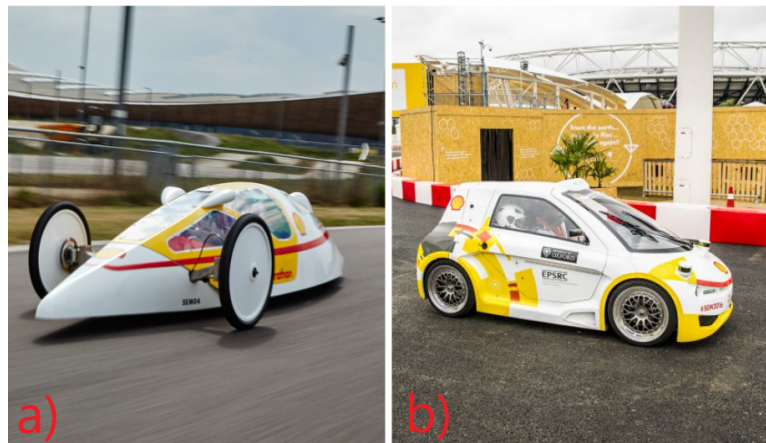


Figura 9 - a) veículo do tipo protótipo [19], b) veículo do tipo urban concept [20].

2.2 Arrasto Aerodinâmico

O arrasto aerodinâmico é a soma de dois tipos de forças contrárias ao movimento, o arrasto de forma e de fricção. O arrasto de forma é causado pela distribuição de pressão ao longo do objeto, já o arrasto de fricção é causado devido ao atrito entre o objeto e o fluido. A proporção desses efeitos varia de acordo com o formato do objeto [2]. A equação 1 apresenta as forças de arrasto aerodinâmico.

$$F_{\text{Arrasto Aerodinâmico}} = F_{\text{Fricção}} + F_{\text{Forma}} \quad (1)$$

2.2.1 Arrasto por Fricção

O escoamento externo de fluidos sobre corpos imersos, tem a característica de não rolamento, ou seja, esse fluido acaba criando tensões de cisalhamento ao longo de toda a carroceria, resultando no arrasto por atrito [3]. A tensão de cisalhamento é tangencial na superfície do corpo, e é apresentada na Figura 10.

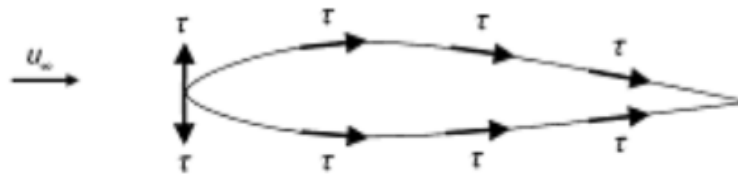


Figura 10 - Tensão de cisalhamento (τ) tangencial a superfície do objeto [2].

2.2.1.1 Camada Limite

A camada limite é a idealização de uma camada fina do fluido que se move em contato direto com a superfície do objeto [6]. A Figura 11 apresenta este conceito.

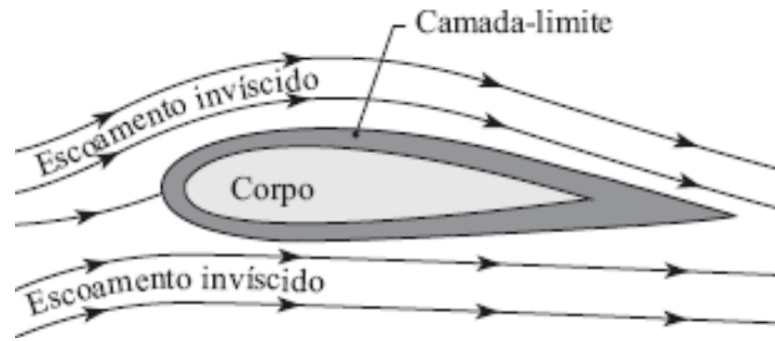


Figura 11 - Camada limite de um corpo [6].

Nessa região, a velocidade do fluido é zero na superfície e aumenta gradualmente à medida que nos aproximamos do fluxo livre do fluido. A altura da camada limite é definida quando o escoamento a partir da superfície atinge 99% da velocidade do escoamento livre [3].

O comportamento desta camada pode ser laminar ou turbulento, sendo laminar quando a camada é fina, e as partículas de fluido se movem em camadas paralelas, com fluxo suave e ordenado. Já no escoamento turbulento o fluxo é desordenado, resultando numa camada limite mais espessa. A Figura 12 apresenta a diferença do perfil de velocidade do fluido laminar e turbulento sobre uma placa plana [6].

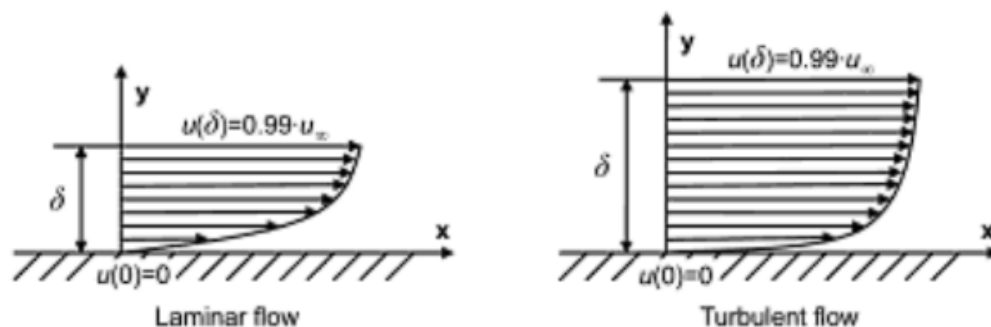


Figura 12 - Perfil de velocidades, laminar e turbulento em uma superfície plana [2].

O tipo de escoamento irá depender das propriedades do fluido, e da geometria que o mesmo está incidindo, onde o fluxo laminar costuma produzir menos arrasto que o turbulento [2].

2.2.1.2 Número de Reynolds

É um número adimensional, utilizado para caracterizar o tipo de escoamento em uma determinada região. O número é obtido através da divisão de forças cinéticas pelas forças viscosas, que é apresentada na equação 2 [6].

$$Re_x = \frac{Ux}{\nu} \quad (2)$$

Onde:

ν = Viscosidade cinemática do fluido (N.s/m²)

x = Medida a partir do bordo de ataque (m)

U = Velocidade do fluido (m/s)

O fluxo também pode apresentar o comportamento de transição, onde o escoamento passa do estágio laminar para o turbulento. A Figura 13 mostra essa transição.

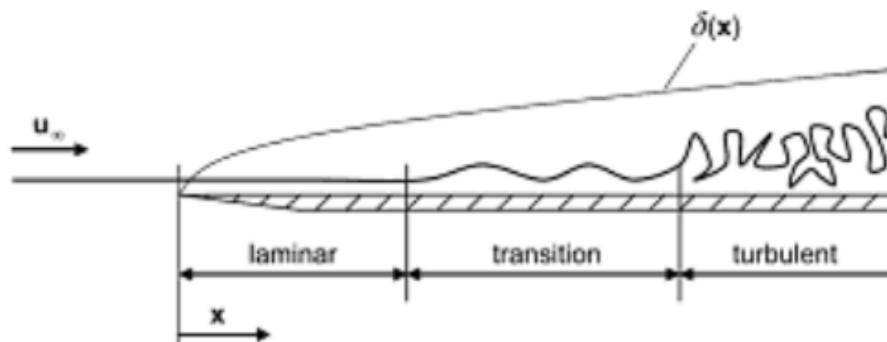


Figura 13 - Camada limite para uma placa plana, onde U é a velocidade do fluido, x é a distância do bordo de ataque e $\delta(x)$ é a espessura da camada limite em função de x [2].

Nesta região de transição, para o caso de uma placa plana, o número de Reynolds fica entre 3×10^5 a 3×10^6 . Esta faixa de valores também é chamada de número de Reynolds crítico [6].

O arrasto por fricção é proporcional à área de interação do ar com a carroceria. Para minimizá-lo, é necessário diminuir ao máximo a superfície de contato da carroceria [2].

2.2.2 Arrasto de Forma

Qualquer objeto movendo-se em meio fluido irá apresentar pressões perpendiculares aplicadas em toda superfície, resultando em forças e momentos nos três eixos, onde apenas o eixo x é responsável pelo arrasto [2]. A Figura 14 apresenta todas as forças e momentos atuantes em um corpo imerso.

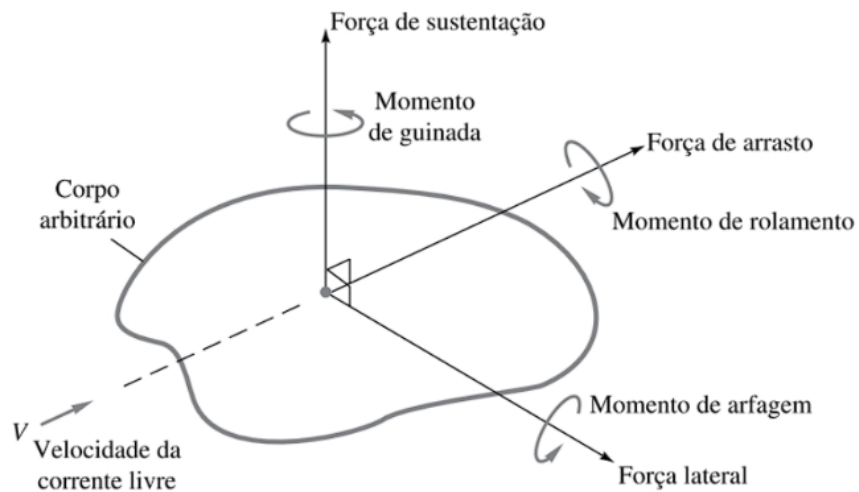


Figura 14 - Forças e momentos sobre um corpo imerso em um escoamento uniforme [3].

Em corpos que se movem diretamente contra uma corrente de escoamento, que é o caso de automóveis, a força lateral, guinada e rolamento são desprezíveis, sendo o problema resumido em: Forças de arrasto e sustentação, e um momento de arfagem [3].

2.2.2.1 Separação da Camada Limite

Durante o escoamento, o objeto apresenta um gradiente de pressão ao longo de toda sua superfície. Quando estas forças de pressão são maiores que as forças cinéticas, ocorre o descolamento da camada limite. Com o descolamento, o perfil de

velocidade acaba mudando para o sentido contrário, devido à alta turbulência no local, causando uma zona de baixa pressão [3]. A Figura 15 mostra a separação da camada limite.



Figura 15 - Esquema de separação da camada limite [10].

Como a parte frontal do objeto está em uma pressão superior, este efeito acaba criando arrasto. Este efeito ocorre facilmente em veículos rombudos, ou em aerofólios com altos ângulos de ataque [2]. A Figura 16 apresenta estes dois casos.



Figura 16 - Separação da camada limite em um veículo rombudo e um aerofólio [2].

2.2.2.2 Arrasto Induzido

Para a produção da força de sustentação é necessário a indução de diferença de velocidade do fluido sobre um objeto, onde em um aerofólio a velocidade acima é maior. Essa indução causa além da força de sustentação uma força contrária ao

movimento, sendo a força de arrasto [6]. A Figura 17 apresenta as forças atuando em um aerofólio .

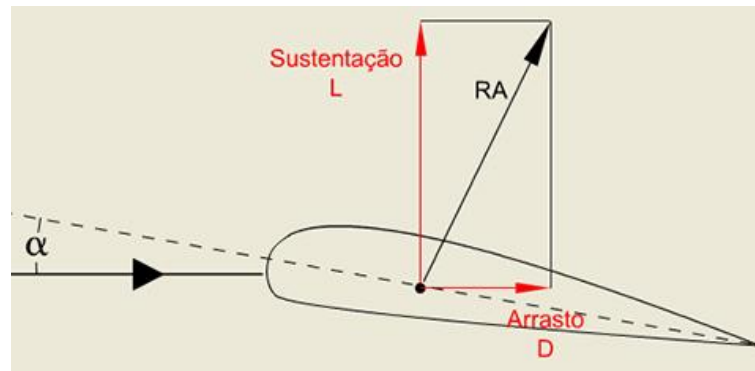


Figura 17 - Forças atuantes em um aerofólio [11].

Esta diferença de velocidade pode ser induzida de forma contrária, causando o chamado “downforce”, presente em muitos automóveis para aumentar a aderência das rodas do veículo com o solo [3]. Porém para veículos de eficiência energética, tal efeito deve ser evitado, pois o downforce aumenta a resistência à rolagem do veículo, e a força de sustentação também não o diminui [12].

2.2.2.3 Arrasto de Interferência

Como citado anteriormente, objetos se deslocando em meio fluido apresentam um gradiente de pressão em sua superfície, isto forma um campo de pressões que pode interagir com campos de outros objetos. Estes campos são sobrepostos mudando as propriedades do escoamento aumentando o arrasto aerodinâmico. Estes efeitos podem ser atenuados dependendo do design de carroceria adotado, e da qualidade das juntas do veículo [2].

2.3 Coeficiente de Arrasto

O coeficiente de arrasto é um parâmetro adimensional, que caracteriza a força de arrasto com uma determinada forma. Com o coeficiente de arrasto, é possível determinar a eficiência aerodinâmica de diferentes formas. Seu resultado está relacionado com os seguintes aspectos: forma do objeto, tamanho, densidade do fluido e sua velocidade. A equação 3 apresenta o coeficiente de arrasto aerodinâmico [6].

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S} \quad (3)$$

Onde:

C_x = Coeficiente de arrasto.

F_x = Força de arrasto (N).

ρ = Densidade do ar (kg/m³)

V = Velocidade do ar (m/s)

S = Superfície frontal de referência (m²)

Para comparação de eficiência aerodinâmica de diferentes formas é realizado o produto $C_x \times S$, que levará em conta não só o perfil analisado, mas também seu tamanho [4].

2.4 Análise CFD

O CFD (Computational Fluid Dynamics) é realizada pelo método de elementos finitos (MEF), que divide um corpo em pequenos elementos adjacentes entre si, onde juntos formam o corpo original. O tamanho e a quantidade de elementos alteram a precisão do modelo criado. Este método permite o estudo de

situações que são impossíveis de calcular devido à sua complexidade [8]. A Figura 18 mostra a malha criada sob a superfície de um veículo.

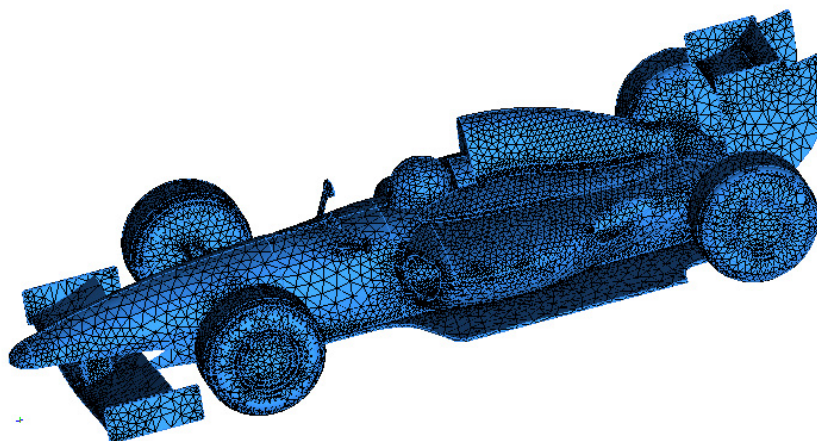


Figura 18 - Malha gerada sob a superfície de um veículo [22].

Atualmente, não existe uma teoria satisfatória que descreva as forças atuando em um corpo submerso, em um escoamento externo com um determinado número de Reynolds. Isso torna a necessidade de realizar experimentos para determinar tais forças [3].

Na aerodinâmica é utilizado o túnel de vento para realizar estes experimentos, porém são comumente caros de se operar. Assim, o CFD é uma ferramenta que é usada em conjunto para realização destes experimentos, especialmente em fases iniciais de projeto, sendo o túnel de vento utilizado apenas para validação dos resultados obtidos nos programas CFD [8].

2.4.1 Modelo Numérico

O software empregado neste estudo é o SolidWorks Flow Simulation, o qual utiliza as equações de Navier-Stokes para analisar a dinâmica dos fluidos. Essas equações representam formulações das leis de conservação de massa, momento e energia [26].

Para otimizar a eficiência computacional em simulações de escoamentos turbulentos, o software adota as equações da média de Favre nas equações de Navier-Stokes. Essas equações separaram as flutuações turbulentas do fluxo médio, reduzindo a complexidade computacional. Com esta simplificação, é necessário complementar o modelo com as tensões de Reynolds, e para isso é aplicado também um modelo k - ϵ modificado, proposto por Lam e Bremhorst [23].

O modelo k - ϵ modificado em questão descreve o escoamento laminar, turbulento e de transição para um fluido homogêneo. Ele utiliza as equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e sua taxa de dissipação (ϵ) [24].

2.4.2 Simulação da Camada Limite



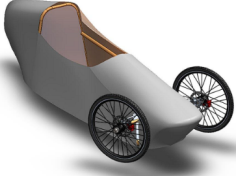
No contexto de corpos imersos em fluido, a definição da camada limite para simulação CFD em modelos mais complexos apresenta um desafio significativo. Isso ocorre especialmente em situações em que não é possível aplicar diretamente as equações de Navier-Stokes devido à resolução da malha gerada. Nesse cenário, a abordagem de Prandtl para camadas limite é empregada no cálculo do atrito na parede e do fluxo de calor. Em muitos softwares de CFD, a resolução desse problema é geralmente abordada por meio da aplicação da similaridade das equações da camada limite [26].


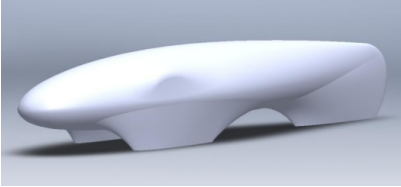
O SolidWorks Flow Simulation adota uma abordagem distinta para lidar com essa questão. Utilizando seu método próprio denominado Two-Scale Wall Function (2SWF), o software emprega dois métodos distintos para solução: um destinado a camadas limite finas e outro para camadas limite espessas. Em casos intermediários, o software compila os resultados dos dois métodos na região, promovendo uma transição suave. Isso resulta na criação de uma malha refinada na região de interesse. Essa abordagem inovadora do SolidWorks Flow Simulation contribui para uma modelagem mais precisa e eficiente de escoamentos em torno de corpos imersos [26].

2.5 Dados Aerodinâmicos de Projetos Anteriores

Como dito anteriormente, a comparação de eficiência aerodinâmica é feita pelo coeficiente de arrasto apresentado pela geometria, junto com a área da superfície frontal. A tabela 1 é apresentada como um ponto de referência para este projeto.

Tabela 1 - Dados aerodinâmicos de veículos projetados para maratonas de eficiência energética.

Nome	PAC-Car II [2]	IDF [8]	Tropidurus 1 [13]
Imagem do veículo			
Cx	0,075	0,25	0,105*
S (m ²)	0,254	0,304	0,3
SCx (m ²)	0,019	0,076	0,032
Modelo Turbulento	k-ε	k-ε	k-ε

Nome	E3 [25]	E3 modelo 2 [25]	OBJETIVO
Imagem do veículo			
Cx	0,2228	0,093	-
S (m ²)	0,3241	0,2455	-
SCx (m ²)	0,0722	0,0228	0,0475
Modelo Turbulento	k-ε	k-ε	-

*O coeficiente de arrasto (Cx) foi calculado sem considerar as rodas do veículo.

3 METODOLOGIA

A concepção de projetos de carrocerias é um processo que envolve a concepção de um design, testes e alterações de projeto para se adequar aos objetivos determinados. Neste trabalho, o objetivo principal é criação de uma carroceria simples com eficiência aerodinâmica moderada. Com os dados obtidos anteriormente, sendo reunidos na tabela 2, é possível traçar um objetivo quantitativo claro, buscando trazer uma carroceria com valor de SC_x de no máximo $0,0475 \text{ m}^2$.

Tabela 2 - Dados SC_x de veículos projetados para maratonas de eficiência energética.

Nome	SC_x
PAC-Car II [2]	0,019
IDF [8]	0,076
Tropidurus 1 [13]	0,032*
E3 [25]	0,0722
E3 modelo 2 [25]	0,0228
Objetivo	0,0475

*O coeficiente de arrasto (C_x) foi calculado sem considerar as rodas do veículo.

O levantamento dos requisitos é o conjunto de regras da maratona de eficiência, que para a carroceria determina pontos importantes, como: Posição de pilotagem e visibilidade do piloto. As condições de contorno é o estado do fluido que a carroceria será analisada, dados como: velocidade do fluido, viscosidade, tipo de partícula serão determinados nessa etapa.

O fluxograma apresenta de forma clara e organizada as etapas para o desenvolvimento de uma carroceria com os objetivos propostos. Inicia-se com a definição dos requisitos do projeto. Em seguida, são realizadas simulações computacionais para analisar o comportamento aerodinâmico do veículo em determinadas condições. Com base nos resultados obtidos, são feitas modificações e refinamentos no design da carroceria, visando reduzir a resistência do ar e melhorar a eficiência. Essas modificações podem envolver alterações nas formas,

ângulos e superfícies da carroceria, com base nos designs anteriormente citados. Como resultado das simulações, são determinadas a força de arrasto (o vetor contrário ao movimento) e a força perpendicular, que, neste contexto, representa o downforce. É importante observar que, como discutido anteriormente, o downforce é algo a ser evitado para este tipo específico de veículo.

O processo de ajuste do veículo é feito de forma detalhada, dividindo-o em três partes principais: o bico frontal (Figura 19 C), a região central de maior área de secção transversal (Figura 19 B) e a saída do escoamento (Figura 19 A). Essa divisão ajuda a entender como cada mudança afeta cada parte, tornando mais fácil fazer melhorias precisas no design da carroceria. É relevante observar que a área frontal projetada do veículo, permanecerá constante em todas as alterações, possibilitando uma comparação mais eficiente das modificações efetuadas.

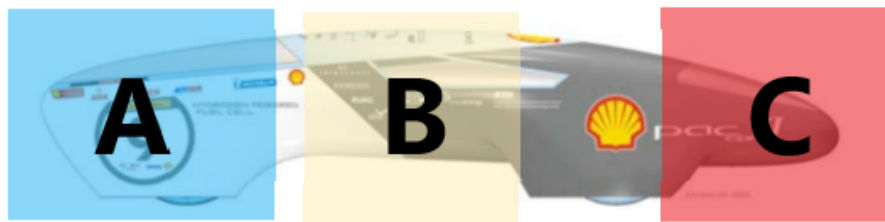


Figura 19 - Regiões de análise do veículo a) Saída do escoamento, b) Região central e c) Bico frontal. Adaptado de [2] .

Após a implementação das mudanças, são realizadas novas simulações para avaliar o desempenho aerodinâmico do veículo. Esse processo iterativo continua até que um design otimizado seja alcançado, atendendo aos objetivos propostos de eficiência e aerodinâmica. A Figura 20 apresenta o fluxograma de atividades a serem realizadas para concepção desta carroceria.

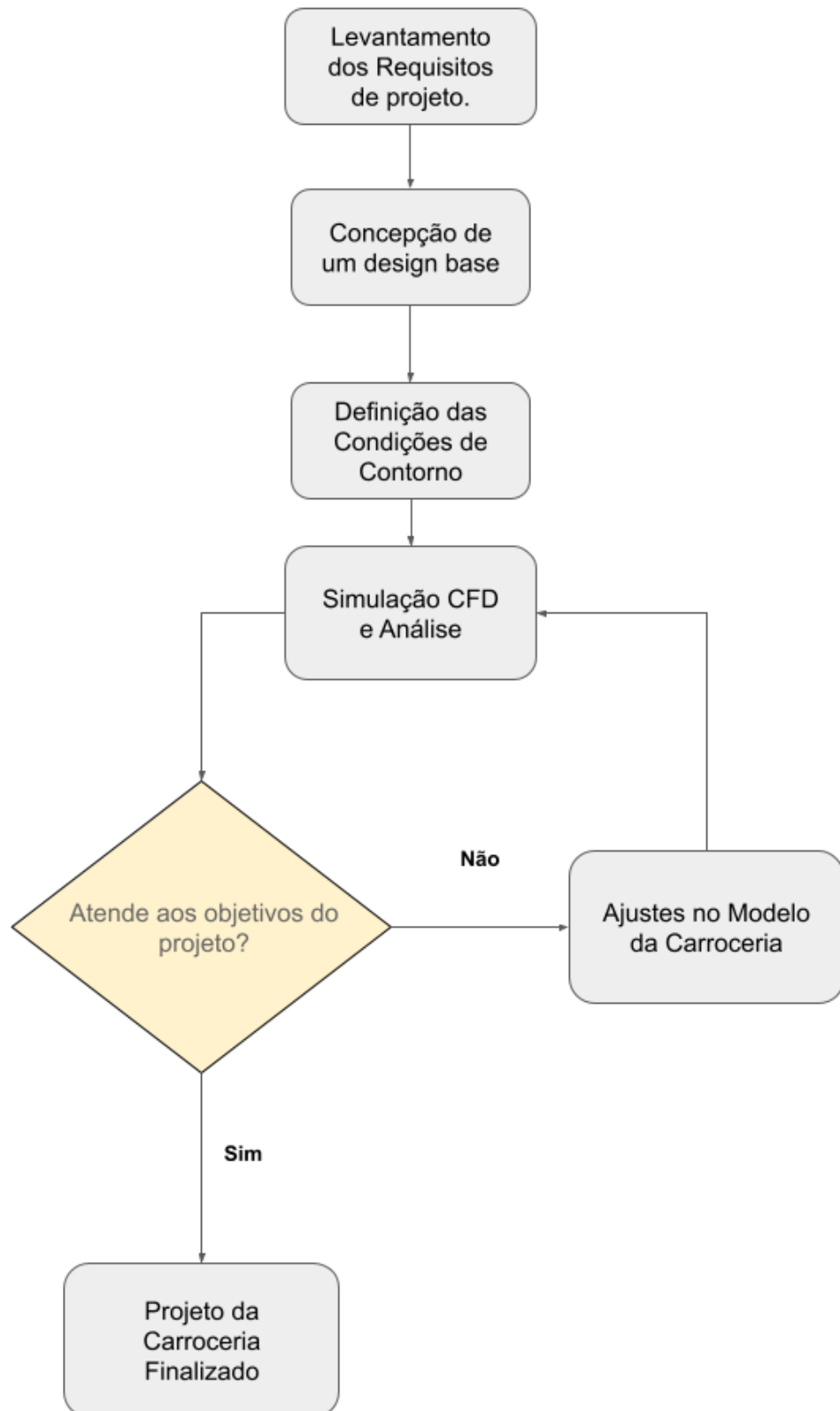


Figura 20 - Fluxograma do desenvolvimento do projeto da carroceria.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Nesta fase, todas as etapas do desenvolvimento da carroceria são abordadas com o objetivo de alcançar um design de construção simples e um bom desempenho aerodinâmico. Para a modelagem da carroceria base, são cruciais a coleta de informações, como regulamentos da competição, dimensões do piloto e de outros componentes que impactam o formato da carroceria. A partir desse modelo base, é possível conduzir simulações CFD, determinar o coeficiente de arrasto e o SC_x , e analisar o fluxo com recursos visuais do software. Essas análises são fundamentais para orientar as decisões sobre as alterações a serem realizadas na carroceria.

4.1 Requisitos de Projeto

Os requisitos de projeto englobam todos os dados cruciais a serem considerados durante a modelagem da carroceria, uma vez que estabelecem os parâmetros que orientam o desenvolvimento do projeto.

4.1.1 Regulamento Shell Eco Marathon

A competição de eficiência energética Shell Eco Marathon, determina um conjunto de regras no seu regulamento para a criação da carroceria do veículo. Estas regras no geral são focadas na segurança do piloto, e limites dimensionais do veículo. Logo, no momento da criação do modelo da carroceria, deve-se considerar as seguintes diretrizes:

- A altura máxima do veículo deve ser de 1000 mm.
- A bitola, que é a distância entre as rodas no mesmo eixo, deve ser de no mínimo 500 mm, medido a partir do ponto médio das rodas.
- A relação entre a altura e a bitola deve ser menor que 1,25.
- A distância entre eixos deve ser de pelo menos 1000 mm.
- A largura total máxima do veículo não deve exceder 1300 mm.
- O comprimento total máximo não deve exceder 3500 mm.
- Peso mínimo do piloto 50kg.

4.1.2 Antropometria

A antropometria é a ciência que estuda as dimensões e proporções do corpo humano, incluindo características como altura, peso, comprimento dos membros, circunferência e outras medidas físicas. Esses dados são coletados em amostras representativas de uma população específica e, a partir deles, é possível calcular percentis [26].

Neste projeto, a importância deste estudo reside na adequação do tamanho do veículo aos dados antropométricos, visando minimizar o volume ocupado pelo piloto. Em geral, veículos menores tendem a ter uma menor resistência aerodinâmica. Ao considerar o peso mínimo estabelecido pela competição e utilizar os dados do quadro 1, optou-se por focar no percentil 20%, facilitando a identificação de pilotos com características ideais para a competição. O quadro foi adaptado de acordo com as medidas relevantes para o caso.

Quadro 1 - Dados antropométricos para uma população feminina, trabalhadora de escritório de Curitiba-SC. Adaptado de [26].

	Medida	5% (cm)	20% (cm)
De pé, corpo na vertical.	Altura	153,6	158,6
	Ombros	129,2	132,7
Altura até o piso	Pubis	80,0	84,0
Larguras	Ombros	36,0	38,0
	Quadril	37	39

4.1.3 Dimensionamento Base

O dimensionamento inicial servirá como diretriz, e qualquer modificação não deve exceder seu volume estabelecido. O cockpit, onde o piloto é acomodado no veículo, foi projetado com base nos dados antropométricos mencionados anteriormente, resultando em uma dimensão mínima para o piloto. A posição de pilotagem adotada é a da figura 21, comum entre os designs pesquisados, favorecendo a construção de veículos com uma menor área de contato frontal, o que contribui para a redução do arrasto.

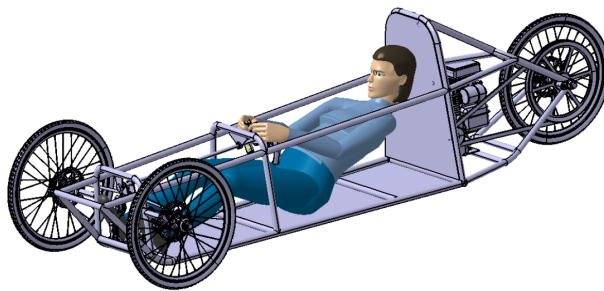


Figura 21 - Posição de pilotagem comum [13].

As dimensões do cockpit da figura 22 também foram consideradas para um possível chassi, incluindo uma folga para a movimentação e o conforto do piloto.

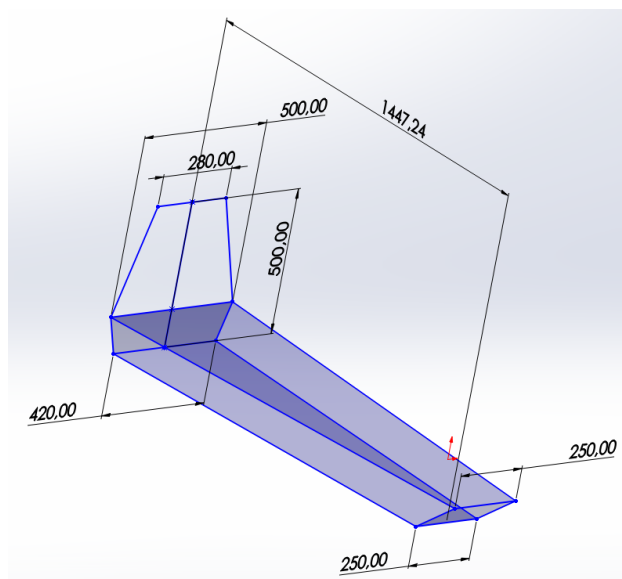


Figura 22 - Dimensionamento do Cockpit.

A parte traseira geralmente se encontra o conjunto de propulsão do veículo, com estas dimensões mostradas na figura 23, é possível acomodar o conjunto de baterias e motor elétrico por exemplo.

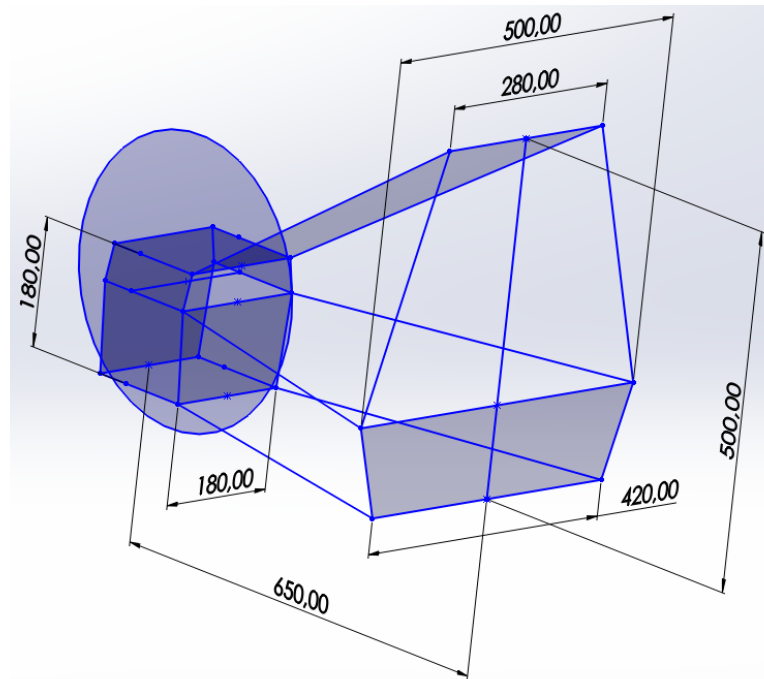


Figura 23 - Dimensionamento Traseiro.

Para o conjunto completo, a figura 24 apresenta algumas cotas importantes, como o entre eixos, e o comprimento total.

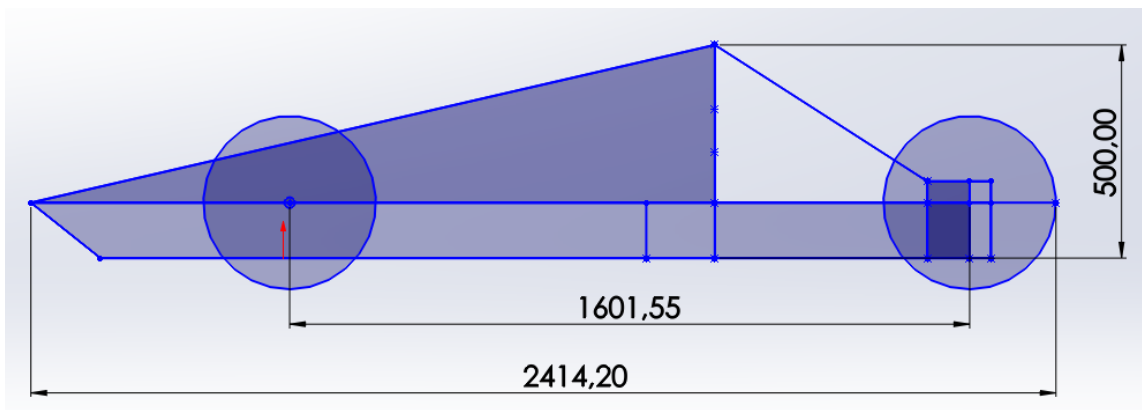


Figura 24 - Dimensionamento Lateral.

4.2 Dados para Simulação

No software SolidWorks Flow Simulation as condições de contorno podem ser adicionadas de forma mais intuitiva com a ferramenta “Wizard”, onde apresenta uma janela com o passo a passo e informações necessárias para a simulação. A tabela 3 apresenta os dados utilizados para todas as simulações.

Tabela 3 - Condições de contorno usadas nas simulações.

Unidades de Medida	SI (m,kg,s)
Tipo de Escoamento	Externo, laminar e turbulento.
Fluido	Ar
Temperatura	293,2 K
Pressão	101325 Pa
Velocidade do Escoamento	8,5 m/s
Direção e sentido do escoamento	-z
Densidade do Ar	1,202 kg/m ³
Modelo de Escoamento Turbulento	k-ε

Conforme mencionado anteriormente, o método de elementos finitos envolve a subdivisão do objeto 3D analisado em pequenas geometrias conhecidas. Isso permite calcular a interação entre essas geometrias e o fluido de forma individual. Essas geometrias, por sua vez, são dispostas adjacentes umas às outras, formando o que é denominado de malha. A precisão da malha, e conseqüentemente da simulação, aumenta à medida que as geometrias tornam-se menores. O software oferece opções de construção automática da malha, onde apenas a precisão é especificada. A figura 25 ilustra a definição da precisão global da malha do volume de controle, onde a malha é mais precisa próximo ao objeto analisado.

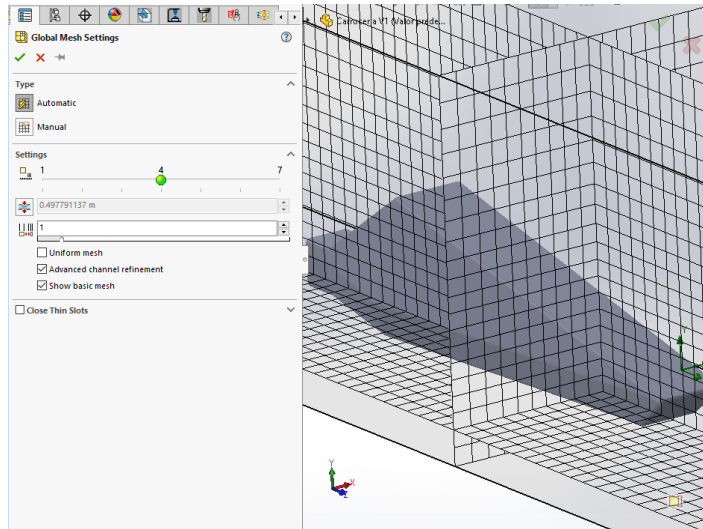


Figura 25 - Malha automática generalizada do volume de controle.

O nível de refinamento da malha irá depender do poder computacional disponível, e para diminuir o tempo de cada simulação é possível criar malhas mais precisas apenas em regiões críticas. Para este trabalho, como apresentado na figura 26, foi criado um volume de malha refinada no bico do veículo, e na saída do escoamento na parte traseira, além de um refinamento em toda a superfície.

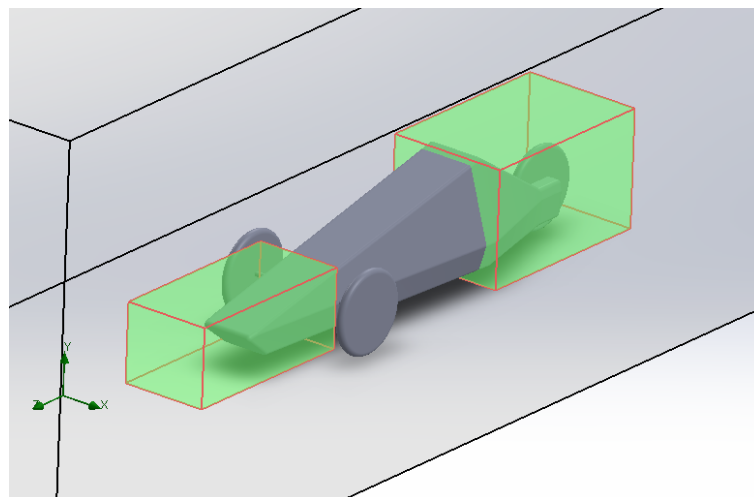


Figura 26 - Malha refinada automaticamente no volume em verde.

Desta forma, é criado vários níveis de precisão de malha, figura 27 apresenta uma vista em corte lateral da malha criada no volume de controle.

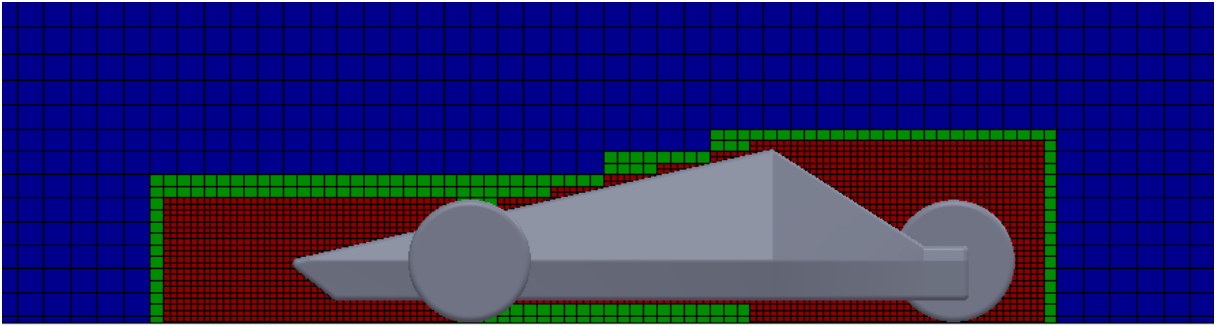


Figura 27 - Vista em corte da malha gerada.

Além disso há dois pontos cruciais nestas simulações, que é a necessidade da criação de um piso, onde o fluido também irá interagir, e devido a escolha de design com as rodas expostas, elas devem ser simuladas em rotação. A velocidade angular das rodas foi calculada com base na equação 4.

$$v = \omega * r \quad (4)$$

Onde:

ω = Velocidade angular (*rad/s*).

v = Velocidade em (*m/s*).

r = Raio da roda (*m*).

Foram consideradas rodas de 16" de bicicleta, comum entre os projetos anteriormente citados. Elas possuem um raio de 203 mm, e como a velocidade já foi determinada em 8,5 m/s, é possível calcular a velocidade angular. A Figura 28 apresenta o solo citado anteriormente, o sentido de rotação e velocidade angular das rodas calculadas na equação 4.1.

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{8,5 \text{ m/s}}{0,203} = 41,87 \text{ rad/s} \quad (4.1)$$

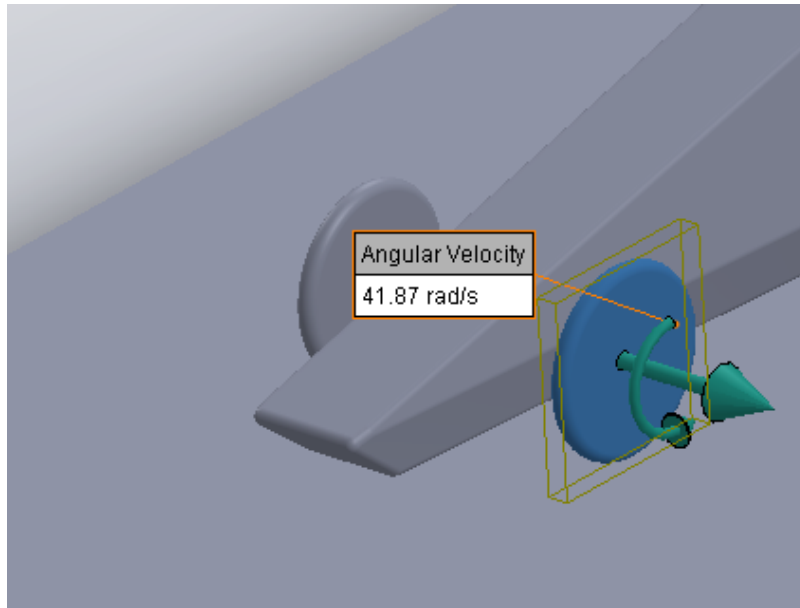


Figura 28 - Solo e sentido de giro das rodas.

Para determinar os valores do coeficiente de arrasto (C_x) e, em seguida, calcular o valor de SC_x , foi necessário realizar o cálculo da área frontal projetada do veículo. Essa medição foi realizada no Solidworks para desenharmos o perímetro do veículo em vista frontal, e a área foi medida conforme mostrado na Figura 29, resultando numa área de $0,244 \text{ m}^2$.

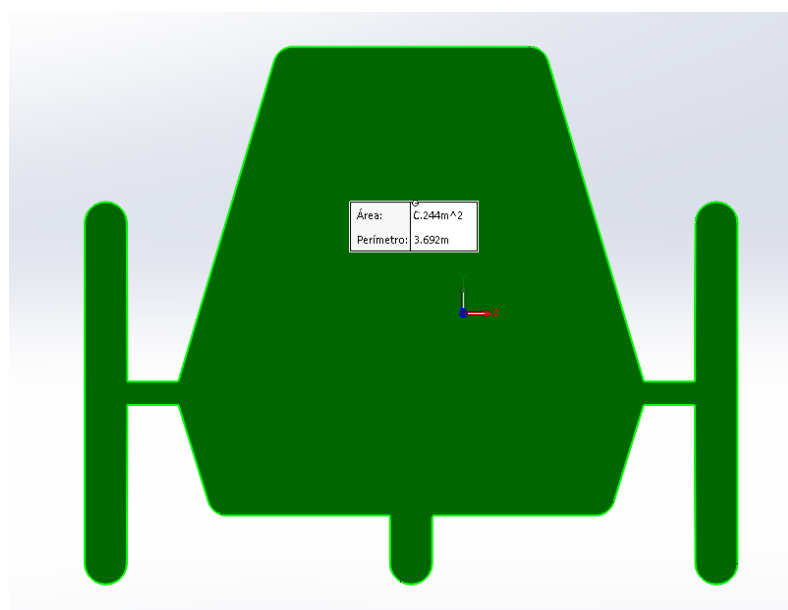


Figura 29 - Área frontal do veículo.

4.3 Modelo 3D e Análise CFD

Nesta etapa serão criados os modelos e analisado seu comportamento na simulação CFD. As alterações feitas para melhoria seguirão os design anteriormente estudados.

4.3.1 Modelo Versão 1

O primeiro modelo desenvolvido representa, fundamentalmente, um desenho base moldado com arestas suavizadas, projetado para ser o mais simples possível. Essa geometria mais "quadrada" é escolhida pela facilidade de construção, graças à predominância de perfis retos, conforme ilustrado na Figura 30.

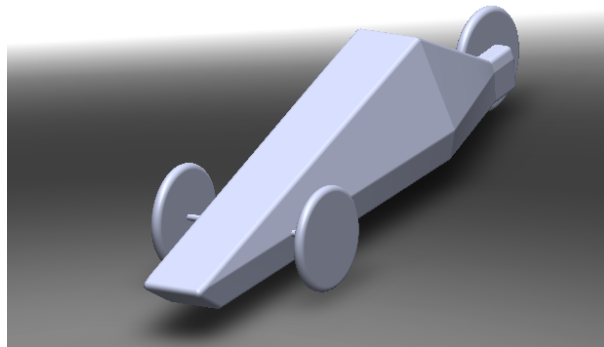


Figura 30 - Modelo Versão 1.

A Figura 31 exibe linhas de fluxo, destacando as variações de velocidade do veículo com cores distintas.

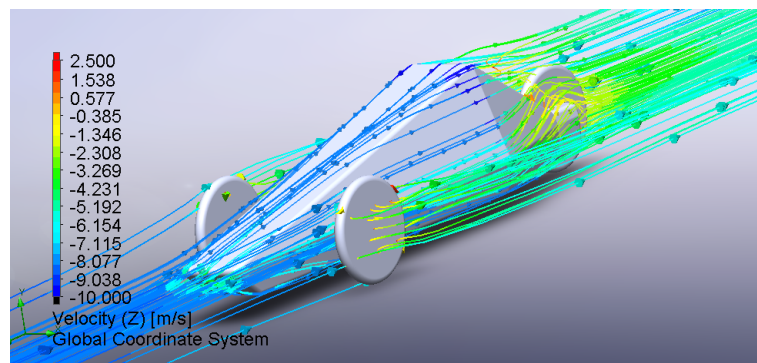


Figura 31 - Linhas de escoamento com gradiente de velocidade modelo 1.

Durante a análise, foram identificados desafios significativos. O bico frontal, devido à sua geometria obtusa, gerou uma pressão elevada, perturbando o campo de pressões na área frontal, como mostrado na Figura 32.

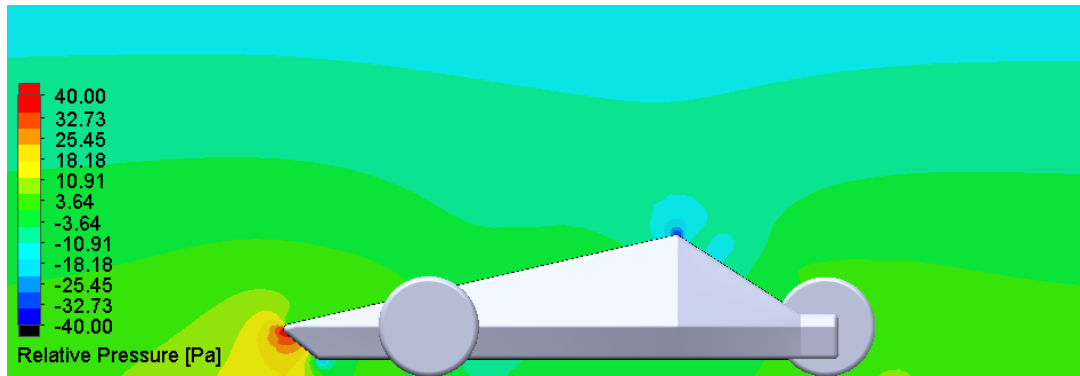


Figura 32 - Corte transversal do campo de pressões do modelo 1.

No entanto, o problema mais notável foi observado na saída do fluxo na parte traseira superior do veículo, conforme evidenciado na Figura 33. Nessa região, perceptível o descolamento da camada limite e a formação de vórtices, indicados pelos valores de velocidade positiva, contrários ao sentido do fluxo, evidenciado na figura 34. E como mencionado anteriormente, isso resulta na criação de uma zona de baixa pressão, o que contribui para o aumento do arrasto aerodinâmico devido à alta pressão no bico frontal.

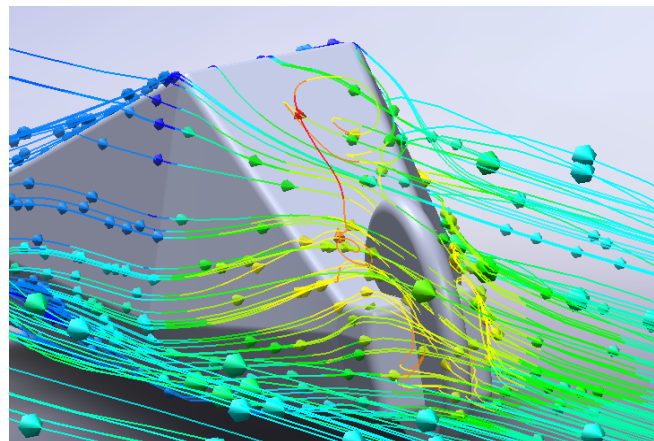


Figura 33 - Linhas de escoamento da parte traseira modelo 1.

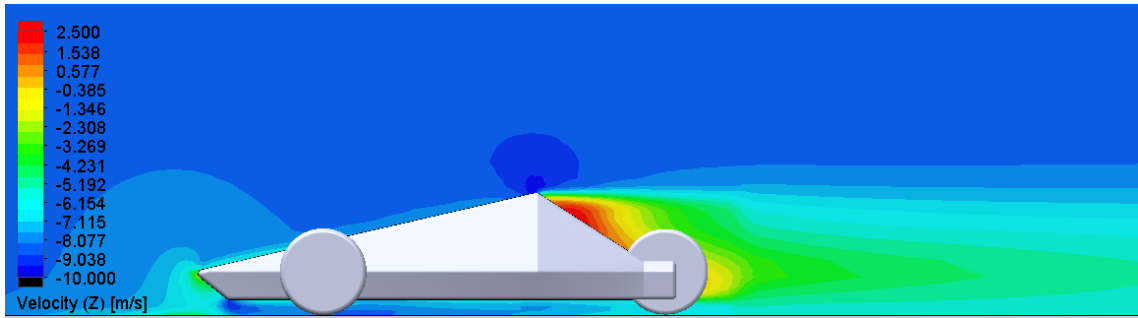


Figura 34 - Corte transversal do campo de velocidades de escoamento modelo 1.

O software apresentou uma força de arrasto (F_z) de 2,143 N, sendo possível realizar o cálculo C_z e do SC_z pela equação 3.1.

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S} = \frac{2,143}{\frac{1}{2} (1,202) \times (8,5)^2 \times (0,244)} = 0,202 \quad (3.1)$$

$$SC_z = C_z * S = 0,202 * 0,244 = 0,0494 \text{ m}^2$$

Esses resultados destacam a necessidade de ajustes na geometria, especialmente na região do bico frontal e na saída do fluxo, para melhorar o desempenho aerodinâmico do veículo.

4.3.2 Modelo Versão 2

No modelo 2 destacado na Figura 35, a escolha foi realizar modificações na parte traseira do veículo para eliminar o vórtice formado na parte superior traseira e, assim, eliminar a região de baixa pressão.

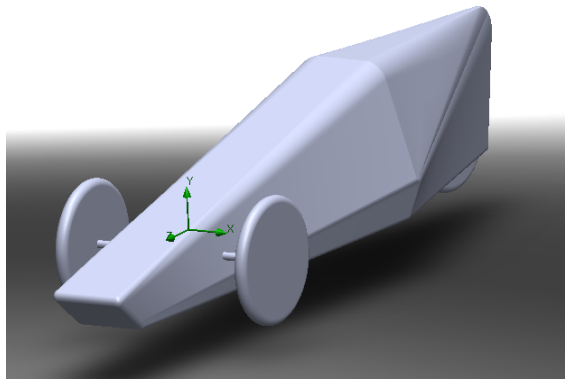


Figura 35 - Modelo Versão 2.

Ao observar os modelos mais eficientes previamente mencionados, nota-se uma forma básica em que o perfil de saída é quase tão alto quanto o ponto mais elevado do veículo, e afunilando até formar uma espécie de cone, conforme representado na Figura 36.



Figura 36 - Vista superior e lateral Pac-Car 2. Adaptado de [2].

Essas modificações resultaram na geometria apresentada anteriormente, onde foi implementada uma carenagem traseira, seguindo as características da Figura 36. É evidente na Figura 37, que mostra as linhas de escoamento na parte traseira, que o vórtice que se formava, criando uma zona de baixa pressão, foi eliminado. Com isso, a baixa pressão na região foi consideravelmente reduzida,

como indicado na Figura 38, que exibe o corte transversal do campo de pressões do veículo. Porém é possível observar também que o ponto de alta pressão no bico frontal do veículo permanece praticamente o mesmo, tendo apenas solucionado um dos problemas.

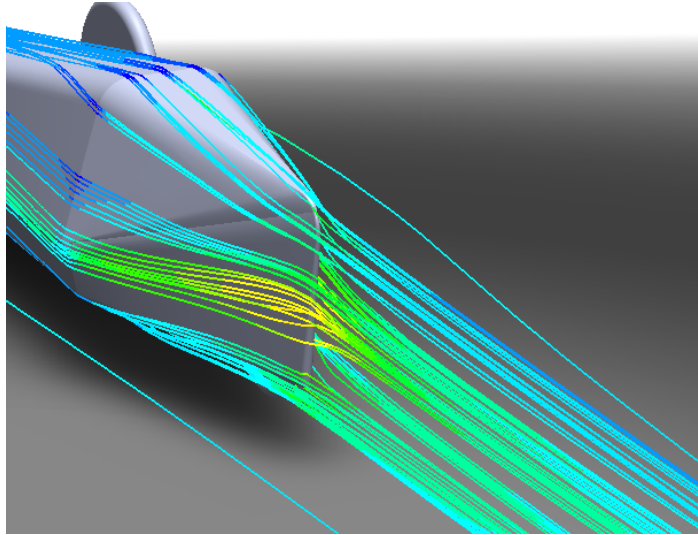


Figura 37 - Linhas de escoamento parte traseira modelo 2.

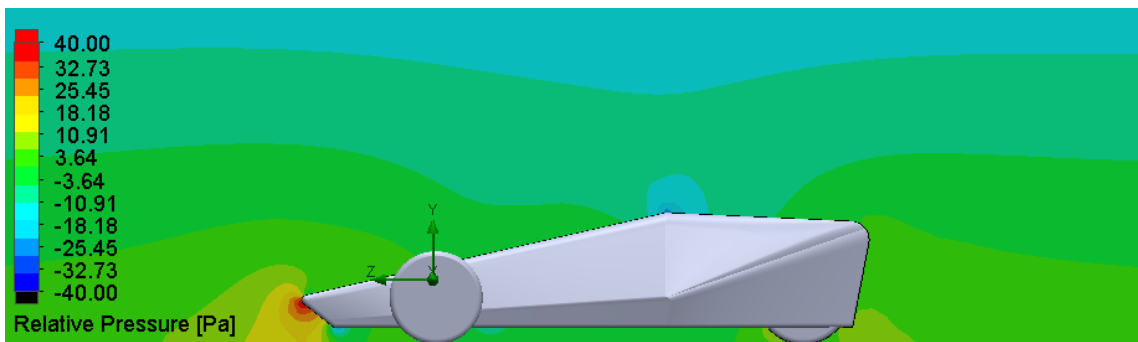


Figura 38 - Corte transversal do campo de pressões do modelo 2.

Também é notável que não há mais fluxo contrário ao sentido do escoamento, como evidenciado na Figura 39, que exibe o corte transversal do campo de velocidades. Não há observação de regiões em tons de laranja ou vermelho, que indicariam este fluxo contrário. A figura 40 mostra as linhas de escoamento com gradiente de velocidade do modelo.

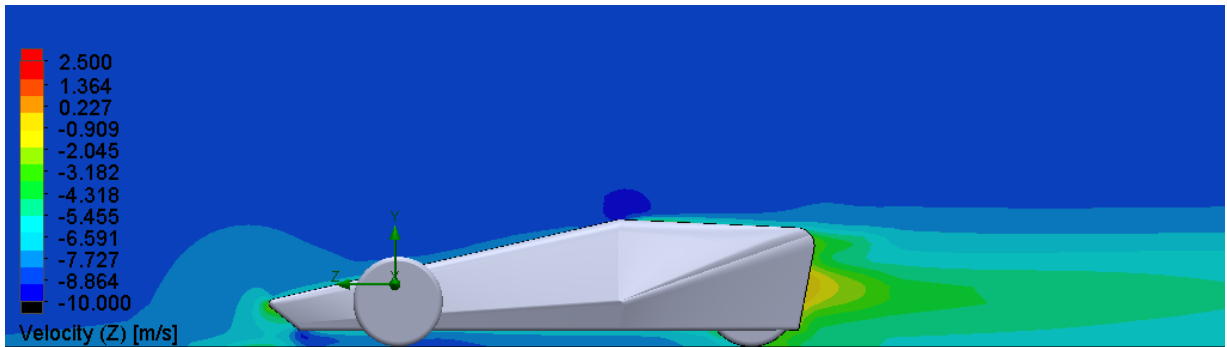


Figura 39 - Corte transversal do campo de velocidades de escoamento modelo 2.

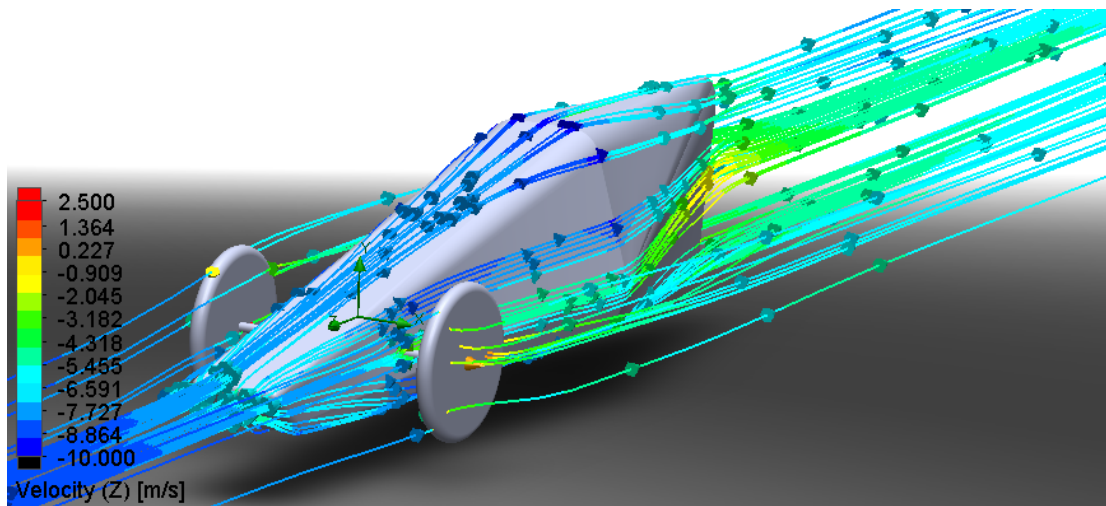


Figura 40 - Linhas de escoamento com gradiente de velocidade modelo 2.

Com as simulações, foi constatado uma força de arrasto (F_z) de 1,812 N, e como sua área frontal permanece a mesma é possível calcular o C_z e o SC_z com a equação 3.2.

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S} = \frac{1,812}{\frac{1}{2} (1,202) \times (8,5)^2 \times (0,244)} = 0,171 \quad (3.2)$$

$$SC_z = C_z * S = 0,171 * 0,244 = 0,0417 \text{ m}^2$$

Dessa forma, ocorreu uma melhora no coeficiente de arrasto, resultando em uma redução aproximada de 15% no SC_z , situando-se abaixo do objetivo inicial. Contudo, devido à ineficiência persistente do bico frontal, será proposta uma nova alteração.

4.3.3 Modelo Versão 3

Na versão 3 apresentada na Figura 41, foi efetuada uma modificação no bico frontal com o objetivo de distribuir uniformemente o fluxo de escoamento por todo o veículo, resultando em um campo de pressão mais suave.

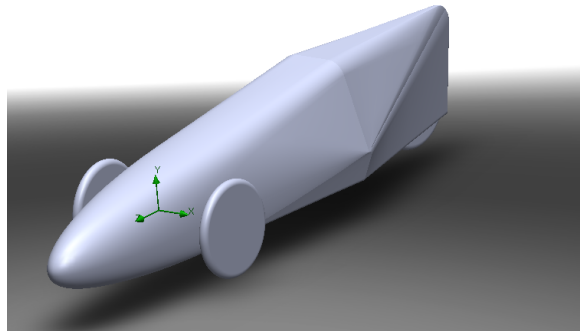


Figura 41 - Modelo Versão 3.

Conforme evidenciado na Figura 42, que exibe o corte transversal do campo de pressões do Modelo 3, observa-se uma redução significativa na escala de pressão no bico frontal. Além disso, a área de baixa pressão acima do veículo diminuiu, resultando em uma diferença de pressão menor entre a parte inferior e superior do veículo.

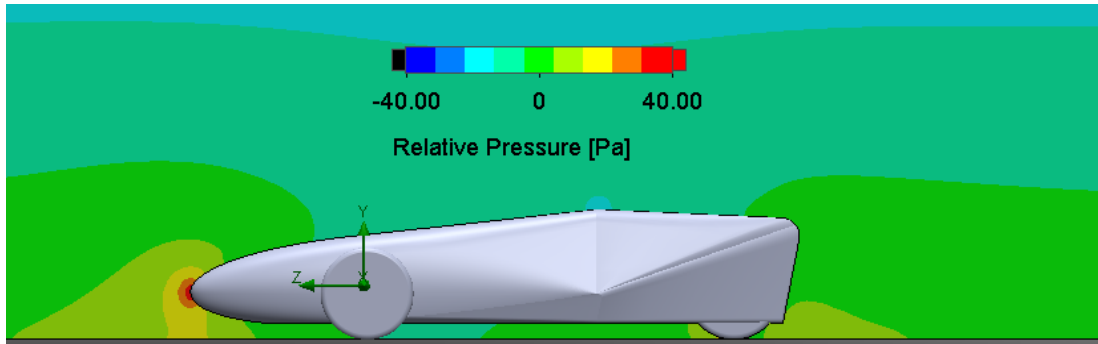


Figura 42 - Corte transversal do campo de pressões do modelo 3.

Além disso, observou-se uma diminuição na variação da velocidade do escoamento na parte superior do veículo, conforme ilustrado na Figura 43. Essa redução sugere um fluxo mais uniforme que passa sobre o veículo. A Figura 44 apresenta as linhas de corrente aplicadas ao modelo, indicando que os pontos de estagnação mais pronunciados estão nas rodas frontais expostas.

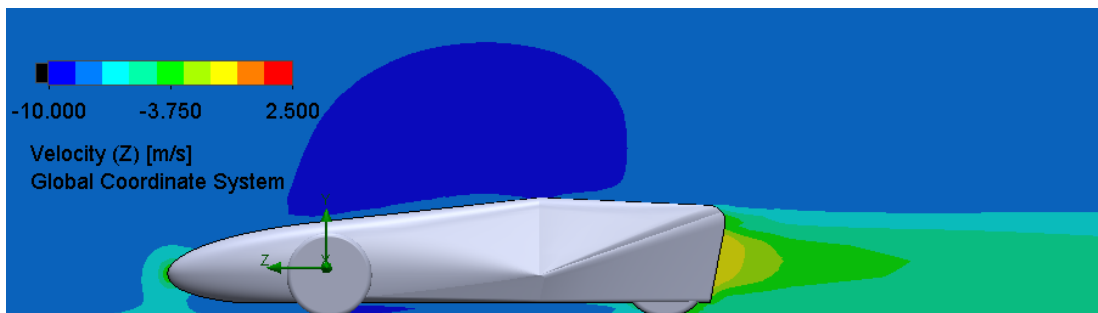


Figura 43 - Corte transversal do campo de velocidades do modelo 3.

Com as simulações, o software resultou numa força de arrasto (F_z) igual a 1,697 N. Com a área frontal igual temos os seguintes cálculos de C_z e SC_z :

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S} = \frac{1,697}{\frac{1}{2} (1,202) * (8,5)^2 * (0,244)} = 0,160 \quad (3.3)$$

$$SC_z = C_z * S = 0,160 * 0,244 = 0,0391 \text{ m}^2$$

Comparado ao modelo 2, houve uma redução do coeficiente de arrasto C_z e do SC_z de aproximadamente 6%.

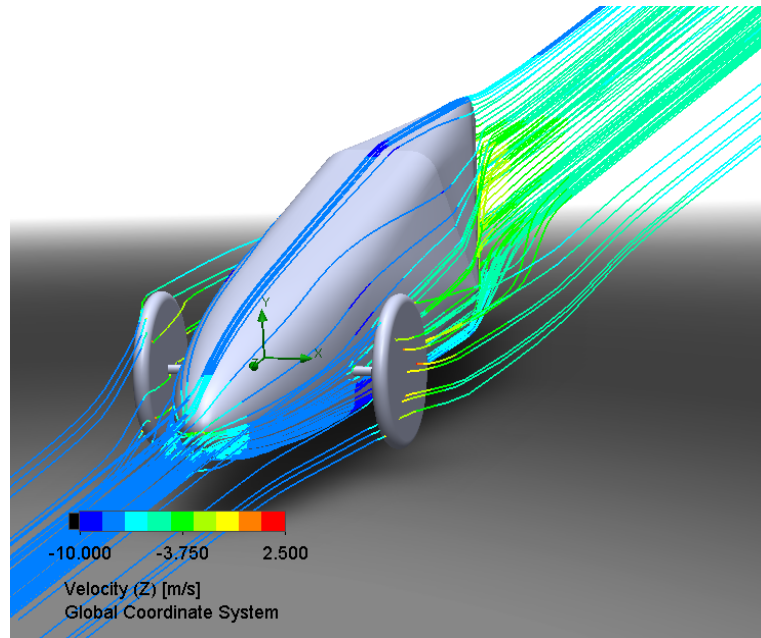


Figura 44 - Linhas de escoamento com gradiente de velocidade modelo 3.

4.4 Modelo Final Proposto

Um dos objetivos do estudo é estabelecer um design simples e eficiente. Nesse contexto, o Modelo 2 destacou-se como a escolha mais vantajosa, exibindo uma melhoria significativa de 15% em comparação com o Modelo 1, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos com as simulações.

	Área Frontal (m ²)	F (N)	C_z	SC_z (m ²)	Melhoria (%)
V1	0,244	2,143	0,202	0,0494	-
V2	0,244	1,812	0,171	0,0417	15
V3	0,244	1,697	0,160	0,0391	6

Embora o Modelo 3 tenha apresentado os melhores resultados em termos de redução de arrasto, sua geometria mais complexa em comparação com o Modelo 2, como evidenciado na Figura 45, que destaca sua geometria similar a um elipsóide, onde resultou em uma diminuição razoável de 6% no coeficiente de arrasto.

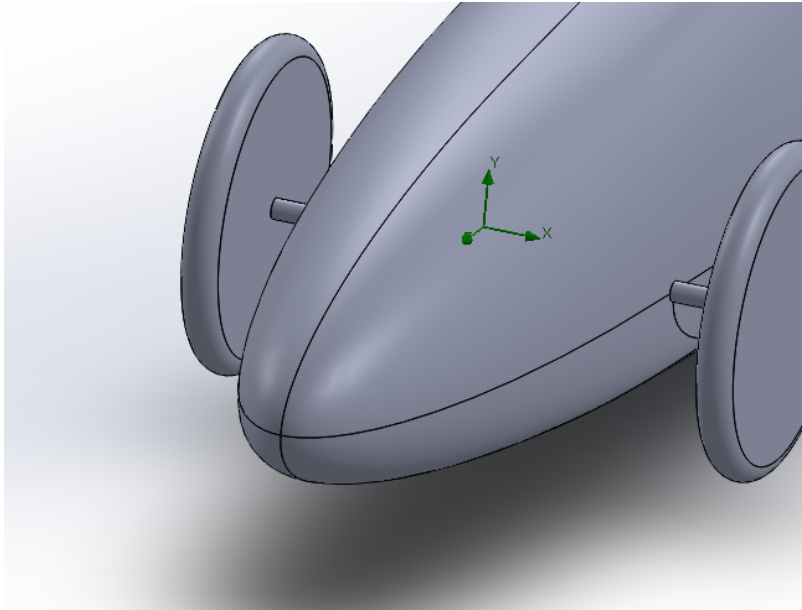


Figura 45 - Bico frontal modelo 3.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Ferramentas de simulação CFD são fundamentais na concepção de novos projetos, proporcionando uma significativa redução nos custos e tempo de criação de projetos conceituais inovadores. Sua flexibilidade para realizar alterações e simulações de forma ágil destaca-se como um benefício crucial. Entretanto, é importante reconhecer que a precisão dos resultados está diretamente ligada à capacidade computacional disponível, influenciando na criação de malhas mais precisas e na realização de mais iterações dos fluidos com o objeto.

O presente estudo destaca o uso específico do Solidworks Flow Simulation, enfatizando sua facilidade na construção do ambiente virtual de simulação. Este trabalho pode servir como guia para futuras simulações de veículos em geral, abrangendo condições de contorno, geração de malha e parâmetros específicos para a dinâmica computacional de fluidos em veículos.

Além de contribuir para a eficiência do design, o trabalho também contribui com a compreensão da física envolvida nos veículos, especialmente em contextos de alta eficiência, como na Shell Eco-Marathon. O Modelo V2 pode ser adotado como um projeto inicial viável, apresentando um design simples, enquanto o Modelo V3, embora mais eficiente, obteve apenas 6% de melhoria em seu coeficiente de arrasto, sendo um modelo mais complexo devido a sua geometria do bico frontal. O SCz do Modelo V3 é de 0,0391 m², enquanto o do Modelo V2 já atinge 0,0417 m², abaixo da meta estabelecida de 0,0475 m².

É importante ressaltar que, mesmo com recursos computacionais robustos, toda simulação CFD possui uma margem de erro considerável. Portanto, propõe-se como trabalho futuro a validação dos resultados por meio de testes em túneis de vento, uma etapa crucial antes do desenvolvimento físico do veículo. Isso demandaria um estudo aprofundado sobre os materiais de construção do veículo, destacando a necessidade de formar uma equipe para participação na competição Shell Eco-marathon como um objetivo promissor.

REFERÊNCIAS

- [1] CHAN, C. C. **The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles.** Proceedings of the IEEE, Vol.90, No 2, p. 247-275, Feb-2002.
- [2] SANTIN, Jean-Jacques *et al.* **The World's Most Fuel Efficient Vehicle:** design and development of pac car ii. Zurich: Vdf Hochschulverlag Ag, 2022. 340 p.
- [3] WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos.** Grupo A, 2018. *E-book.* ISBN 9788580556070. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580556070/>. Acesso em: 18 jun. 2023.
- [4] PEÑA, J.A. Francisco. **"En el túnel de viento. Importancia de la aerodinámica en el diseño de carrocerías."** CESVIMAP, vol. 59, 2007, pp. 12-15.
- [5] PORTAL SÃO FRANCISCO. **Resistência do Ar.** Disponível em: <https://www.portalsaofrancisco.com.br/fisica/resistencia-do-ar>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- [6] ELGER, Donald F. **Mecânica dos Fluidos para Engenharia, 11ª edição.** [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2019. *E-book.* ISBN 9788521636168. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636168/>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- [7] AUTOBLOG. **Shell Eco-marathon rises to the challenge.** Disponível em: <https://www.autoblog.com/2011/04/19/shell-eco-marathon-students-2564-mpg/>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- [8] DAZAROLA, J.; HERNÁN, R. **Establecimiento de metodologías para la realización de CFD mediante NX y planteamiento de propuestas de re-diseño en la carrocería del vehículo para la competición "Shell eco-maratón 2010".** 2010. Universitat Politècnica de València. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10251/38074>.
- [9] INSTITUTO DE ENGENHARIA. **Túnel de Vento Ferrari.** Disponível em: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2010/04/30/tunel-de-vento-ferrari/>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- [10] OLIVEIRA, Pedro Magalhães. **Sustentação aerodinâmica. Mecanismo Físico,2008** Disponível em: <dited.bn.pt/31619/2606/3184.pdf>.

[11] HANGAR 33. **Os princípios da aerodinâmica do voo**. Disponível em: <http://blog.hangar33.com.br/os-principios-da-aerodinamica-do-voo/>. Acesso em: 19 jun. 2023.

[12] Tamai, G., *The Leading Edge - Aerodynamic Design of Ultra-streamlined Land Vehicles*. 1999: Robert Bentley, Inc.

[13] CANTARELLI, João; SILVA, Arthur. **PROJETO PRELIMINAR DE UM VEÍCULO DE ALTA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**. 2016. Projeto de graduação - Curso de Engenharia Mecânica - Universidade de Brasília.

[14] **About Shell Eco-marathon | Shell Eco-marathon**. Disponível em: <https://www.shellecomarathon.com/about.html>.

[15] **Shell Eco-marathon Americas 2023 highlights | Shell Eco-marathon**. Disponível em: <https://www.shellecomarathon.com/stories/shell-eco-marathon-americas-2023-highlights.html>.

[16] **ECOFET**. Disponível em: <https://www.ecofet.com.br/>. Acesso em: 9 dez. 2023.

[17] BERGEROLLE, E. **Les lycéens donnent le meilleur d'eux-mêmes dans le Shell Eco-Marathon**. Disponível em: https://www.challenges.fr/automobile/dossiers/les-lyceens-trouvent-leur-mesure-dans-le-shell-eco-marathon_101115. Acesso em: 9 dez. 2023.

[18] INFORMACAO NEGÓCIOS. **Shell Eco-marathon Brasil vai premiar protótipos automotivos ultra eficientes**. Disponível em: <https://informacaoenegocios.com.br/2023/08/28/shell-eco-marathon-brasil-vai-premiar-prototipos-automotivos-ultra-eficientes/>. Acesso em: 9 dez. 2023.

[19] CARMAGAZINE. **Shell Eco-Marathon Prototype SEM 03 (2017) review**. Disponível em: <https://www.carmagazine.co.uk/car-reviews/other/shell-eco-marathon-prototype-sem-03-2017-review/>. Acesso em: 9 dez. 2023.

[20] **Oxford's autonomous vehicle technology showcased at Shell Eco-marathon | University of Oxford**. Disponível em: <https://www.ox.ac.uk/news/2016-07-04-oxfords-autonomous-vehicle-technology-showcased-shell-eco-marathon>. Acesso em: 9 dez. 2023.

[21] PRNEWSWIRE. **ORECA Optimizes Race Car Design With ANSYS Simulation Technology.** Disponível em:

<https://www.prnewswire.com/news-releases/oreca-optimizes-race-car-design-with-an-sys-simulation-technology-300225163.html#>. Acesso em: 9 dez. 2023.

[22] FETCHCFD. **F1 Mesh for Simulation.** Disponível em:

<https://fetchcfid.com/view-project/136-F1-Mesh-for-Simulation>. Acesso em: 9 dez. 2023.

[23] LAM, C. K.; K. BREMHORST. A Modified Form of the $k-\epsilon$ Model for Predicting Wall Turbulence. **Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme**, v. 103, n. 3, p. 456–460, 1 set. 1981.

[24] SOBACHKIN, A. **Numerical Basis of CAD-Embedded CFD.** [s.l: s.n.]. Disponível em:

https://www.solidworks.com/sw/docs/Flow_Basis_of_CAD_Embedded_CFD_Whitepaper.pdf.

[25] MONTIBELLER, Cassiano. **ESTUDO AERODINÂMICO PARA CARROS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.** 2016. 133 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

[26] DENGO D. **Antropometria e Ergonomia Importância e Aplicabilidade.** Disponível em:

<https://solucoesergonomicas.com.br/antropometria-e-ergonomia-importancia-e-aplicabilidade/>.