

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNO BOSCH**

**ANÁLISE AERODINÂMICA DE UM PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA POR SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL  
(CFD)**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2016**

BRUNO BOSCH

**ANÁLISE AERODINÂMICA DE UM PROTÓTIPO DE  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA POR SIMULAÇÃO  
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)**

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

Orientador: Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto

PATO BRANCO

2016

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ANÁLISE AERODINÂMICA DE UM PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA POR SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Bruno Bosch

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 02/12/2016 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Junior  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me concebido saúde e forças para superar as dificuldades.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos, companheiros de formação que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao meu orientador, pelo suporte e empenho dedicado para a elaboração deste trabalho.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar conhecimento, tanto acadêmico como profissional e pessoal.

A todos que indiretamente ou diretamente fizeram parte da minha formação.

“A vida só pode ser comprendida, olhando-se para trás; mas só pode ser vivida, olhando-se para frente.” (Soren Kierkegaard)

## RESUMO

BOSCH, Bruno. **Análise Aerodinâmica de um Protótipo de Eficiência Energética por Simulação Fluidodinâmica Computacional (CFD)**. 2016. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Os estudos acerca da aerodinâmica veicular têm demonstrado grande intensidade nas últimas décadas, isso sendo ocasionado pelo grande interesse da população por meios automotivos mais eficientes, que por sua vez poluem menos o ambiente. E para desvendar como a aerodinâmica está intimamente ligada com o consumo de combustível, à medida que o arrasto surge como uma força opositora do movimento, as indústrias automotivas têm intensificado na busca por ferramentas que possam prever o desempenho automotivo. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo computacional para analisar o escoamento ocasionado sobre os protótipos de eficiência energética da equipe Pato a Jato da UTFPR, câmpus Pato Branco. Através da utilização do *software* Ansys Workbench®. O uso de ferramentas computacionais permite alcançar os resultados com um menor custo e tempo envolvido. Sendo o objetivo do presente trabalho obter uma redução no arrasto propondo modificações na geometria de tais protótipos. Para isso, primeiramente três malhas diferentes foram testadas para verificar qual a mais adequada para a resolução do problema. Após a determinação da melhor malha, duas variáveis que influenciam na aerodinâmica veicular foram estudadas, sendo elas o ângulo de convergência traseira e a inclinação frontal. Os resultados encontrados demonstraram correspondência com os esperados. E este estudo demonstrou que o arrasto sofre mais alterações para mudanças na geometria traseira ao invés de modificações na região frontal.

**Palavras-chave:** Aerodinâmica Veicular; Análise Fluidodinâmica Computacional; Eficiência Energética; Arrasto; Escoamento Externo; Ângulo de convergência.

## ABSTRACT

BOSCH, Bruno. **Aerodynamic Analysis of a Prototype of Energy Efficiency by Computational Fluid Dynamics Simulation (CFD)**. 2016. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Studies on vehicular aerodynamics have shown great intensity in the last decades, this being caused by the great interest of the population by means of more efficient automotive, which in turn pollute less the environment. And to uncover how aerodynamics is closely linked with fuel consumption, as trawling emerges as an opposing force of movement, automotive industries have stepped up their search for tools that can predict automotive performance. In this work, a computational model was developed to analyze the flow generated on the energy efficiency prototype of the Pato a Jato team of UTFPR, Pato Branco campus. Through the use of Ansys Workbench® software. The use of computational tools allows achieving the results with a lower cost and time involved. The objective of this work is to obtain a reduction in drag by proposing modifications in the geometry of such prototypes. For this, first three different meshes were tested to verify which one was best suited to solve the problem. After determining the best mesh, two variables that influence vehicle aerodynamics were studied, being they the angle of rear convergence and the frontal slope. The results found corresponded to those expected. And this study demonstrated that trawling undergoes more changes to changes in the rear geometry rather than changes in the frontal region.

**Keywords:** Vehicle Aerodynamics; Computational Fluid Dynamics; Energy Efficiency; Drag; External Flow; Convergence Angle.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Os principais elementos de simulação numérica e os erros associados ..	17
Figura 2 - Discretização .....	18
Figura 3 - Modelos de Turbulência.....	21
Figura 4 - Desenvolvimento de modelos a partir de um formato básico e a influência no coeficiente de arrasto. ....	23
Figura 5 - Variação do coeficiente de arrasto com relação ao ângulo de saída .....	24
Figura 6 - Componentes do arrasto em um corpo.....	25
Figura 7 - Influência do arrasto viscoso e de forma sobre o arrasto total. ....	26
Figura 8 - Distribuição de Pressão ao longo da superfície de um veículo .....	28
Figura 9 - Carenagens dos Protótipos.....	29
Figura 10 - Coeficiente de Arrasto na influência da inclinação da região frontal .....	30
Figura 11 - Variação no ângulo de convergência superior traseira para o design 2..	31
Figura 12 - Variação na inclinação frontal do Design 1 .....	32
Figura 13 - Protótipo dentro do Volume de Controle .....	34
Figura 14 - Inflation gerado na Malha.....	35
Figura 15 - Coeficiente do modelo de turbulência $\kappa$ - $\epsilon$ .....	36
Figura 16 - Refino de malha .....	38
Figura 17 - Influência na malha no design 1 sobre o coeficiente de arrasto .....	39
Figura 18 - Influência na malha no design 1 sobre o coeficiente de sustentação .....	39
Figura 19 - Influência na malha no design 2 sobre o coeficiente de arrasto .....	40
Figura 20 - Influência na malha no design 2 sobre o coeficiente de sustentação .....	40
Figura 21 - Influência na malha no tempo de processamento.....	41
Figura 22 - Coeficiente de arrasto para distintos ângulos de convergência traseira do design 1.....	42
Figura 23 - Linhas de corrente sobre o design 1 com ângulo de convergência traseira 15° .....	43
Figura 24 - Linhas de corrente sobre o design 1 com ângulo de convergência traseira 30° .....	44
Figura 25 - Coeficiente de Sustentação para distintos ângulos de convergência traseira do design 1 .....	45
Figura 26 - Distribuição de pressão sobre o design 1 .....	46



Figura 27 - Distribuição de pressão sobre o design 1 com ângulo de convergência traseira 30° .....	46
Figura 28 - Coeficiente de Pressão para distintos ângulos de convergência traseira do design 1 .....	47
Figura 29 - Coeficiente de arrasto para distintos ângulos de convergência traseira do Design 2 .....	48
Figura 30 - Linhas de corrente sobre o design 2 com ângulo de convergência traseira 15° .....	49
Figura 31 - Linhas de corrente sobre o design 2 com ângulo de convergência traseira 25° .....	49
Figura 32 - Coeficiente de Sustentação para distintos ângulos de convergência traseira do Design 2. ....	50
Figura 33 - Distribuição de pressão sobre o design 2 com ângulo de convergência traseira 10° .....	51
Figura 34 - Distribuição de pressão sobre o design 2 com ângulo de convergência traseira 25° .....	51
Figura 35 - Coeficiente de Pressão para distintos ângulos de convergência traseira do Design 2 .....	52
Figura 36 - Coeficiente de arrasto para distintos ângulos da inclinação frontal do design 1 .....	53
Figura 37 - Linhas de correntes sobre o Design 1 com inclinação Frontal 10° .....	54
Figura 38 - Linhas de correntes sobre o Design 1 com inclinação Frontal 30° .....	55
Figura 39 - Distribuição de pressão sobre o Design 1 com inclinação Frontal 10° ....	55
Figura 40 - Distribuição de pressão sobre o Design 1 com inclinação Frontal 30° ....	56
Figura 41 - Coeficiente de Sustentação para distintos ângulos da inclinação frontal do design 1 .....	57
Figura 42 - Coeficiente de arrasto para distintos ângulos da inclinação frontal do design 2 .....	58
Figura 43 - Linhas de correntes sobre o Design 2 com inclinação Frontal 10° .....	59
Figura 44 - Linhas de correntes sobre o Design 2 com inclinação Frontal 30° .....	59
Figura 45 - Distribuição de pressão sobre o Design 2 com inclinação Frontal 10° ....	60
Figura 46 - Distribuição de pressão sobre o Design 2 com inclinação Frontal 30° ....	60
Figura 47 - Coeficiente de Sustentação para distintos ângulos da inclinação frontal do design 1 .....	61

Figura 48 - Coeficiente de Arrasto para os designs 1 e 2, sobre alteração do ângulo de convergência traseira .....	62
Figura 49 - Coeficiente de Sustentação para os designs 1 e 2, sobre alteração do ângulo de convergência traseira .....	63
Figura 50 - Coeficientes Aerodinâmicos para os designs 1 e 2, sobre influência da inclinação frontal .....	64
Figura 51 - Comparação entre o ângulo de convergência traseira com a inclinação frontal do coeficiente de arrasto para o design 1.....	65
Figura 52 - Comparação entre o ângulo de convergência traseira com a inclinação frontal do coeficiente de arrasto para o design 2.....	65
Figura 53 - Convergência dos Resultados sobre o coeficiente de arrasto dos protótipos .....	71
Figura 54 - Convergência dos Resultados sobre o coeficiente de Sustentação dos protótipos.....	72
Figura 55 - Y <sup>+</sup> Design 1 .....	73
Figura 56 - Y <sup>+</sup> Design 2 .....	73

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões para discretização do Design 1. ....	33
Tabela 2 - Dimensões para discretização do Design 2. ....	33
Tabela 3 - Parâmetros e condições de contorno. ....	37
Tabela 4 - Resultados dos Coeficientes Aerodinâmicos para o Design 1 com a alteração no ângulo de convergência traseira. ....	42
Tabela 5 - Resultados dos Coeficientes Aerodinâmicos para o Design 2 com a alteração no ângulo de convergência traseira. ....	47
Tabela 6 - Resultados dos Coeficientes Aerodinâmicos para o Design 1 com a alteração na inclinação frontal. ....	53
Tabela 7 - Resultados dos Coeficientes Aerodinâmicos para o Design 2 com a alteração na inclinação frontal. ....	57

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 Objetivos .....	14
1.1.1 Objetivo Geral .....	14
1.1.2 Objetivo Específico.....	14
1.2 Justificativa.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Análise Fluidodinâmica Computacional.....	15
2.1.1 Método dos Elementos Finitos .....	16
2.2 Equação da Continuidade e Equações de Navier-Stokes.....	18
2.3 Turbulência.....	20
2.4 Arrasto.....	22
2.5 Pontos de Pressão .....	27
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 Modificações nos Designs.....	30
3.2 Simulação.....	33
3.2.1 Discretização dos Designs .....	33
3.2.2 Geração da Malha.....	34
3.2.3 Parâmetros das Simulações.....	35
3.2.4 Condições de Contorno.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 Influência da Malha nos Coeficientes Aerodinâmicos .....	38
4.2 Influência do Ângulo de Convergência Traseira sobre o Arrasto .....	42
4.3 Influência da Inclinação Frontal sobre o Arrasto .....	52
4.4 Comparação dos Resultados .....	62
5 CONCLUSÕES .....	67

REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICES.....	71

## 1 INTRODUÇÃO

Com o imenso crescimento populacional, e a alta demanda por carros, ao longo das últimas décadas as companhias automobilísticas vem aumentando sua área de pesquisa em torno da eficiência, devido a crise do petróleo e a conscientização com o meio ambiente, uma vez que os recursos naturais estão cada vez mais escassos, o qual a aerodinâmica está intimamente ligada a esse conceito, não apenas visando a produção de carros mais eficientes como também por veículos mais atraentes.

O primeiro carro desenvolvido em volta da aerodinâmica se deu em 1921, o inventor alemão Edmund Rumpler criou o Rumpler-Tropfenauto, conhecido como carro gota d' água, conhecido dessa maneira por sua similaridade a uma gota d' água, uma forma de aerodinâmica da natureza, contudo o visual não atraiu o público e não foi muito vendido.

E ao longo da evolução das tecnologias, muitas ferramentas vem auxiliando com a solução de problemas, uma delas é a simulação fluidodinâmica computacional, a análise a partir de simulações computacionais e métodos aproximados para prever o comportamento do sistema surgiram em virtude da dificuldade ou impossibilidade de obter soluções analíticas ou realizar experimentos. Com isso, o crescente desenvolvimento das ferramentas computacionais e da capacidade de processamento dos computadores tornou a simulação uma alternativa segura e rápida na obtenção de problemas.

A análise aerodinâmica por simulação fluidodinâmica computacional será realizada para os protótipos da equipe Pato a Jato da UTFPR Câmpus Pato Branco, cujo tais pode-se dizer que possuem corpos afinados na região traseira, característica que favorece para a redução do arrasto, como também apresenta proximidade com o solo, e devido a sua complexidade da geometria a determinação dos esforços aerodinâmicos é inviável se for mensurada analiticamente.

Vale ressaltar que o arrasto é constituído por duas componentes, sendo o arrasto viscoso e o arrasto de pressão, onde estudos apontam que esse último representa algo em torno de 75 a 85% do arrasto total de um automóvel, a partir disso focou-se em analisar parâmetros que influenciam significadamente sobre o arrasto, sendo o ângulo de convergência traseira e a inclinação frontal dos protótipos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise do arrasto para diferentes geometrias dos protótipos de eficiência energética através do método de simulação fluidodinâmica computacional, apresentando métodos de redução do arrasto.

### 1.1.2 Objetivo Específico

- Comparar diferentes design dos protótipos de eficiência energética;
- Alterar parâmetros na geometria dos protótipos que influenciam na aerodinâmica;
- Encontrar uma melhor geometria visando a eficiência do protótipo, ou seja, buscando um menor arrasto;
- Realizar análise dos pontos de pressão.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Olhando para o âmbito econômico no Brasil hoje, nota-se uma tendência da população em optar por carros com menor consumo de combustível, devido ao alto custo, a partir disso este trabalho demonstra que o estudo da aerodinâmica está diretamente ligada com a redução do consumo de combustível, design, dimensões do carro, entre outros.

Além disso, a busca por melhorias nos protótipos da equipe Pato a Jato almejando maiores conquistas nas competições de eficiência energética.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ANÁLISE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Existem duas maneiras que auxiliam a estimar valores próximos aos reais os esforços aerodinâmicos, uma delas é a análises fluidodinâmicas computacionais, e a outra as análises em túneis de vento.

Os túneis de vento permitem o levantamento de características aerodinâmicas com grande precisão, contudo para obter fatores como razão de bloqueio, a camada limite da superfície de sustentação, as turbulências no escoamento, entre outros, similares a um ambiente mais próximo do real, o custo operacional torna-se muito elevado, além da necessidade de apresentar muitos ensaios com diferentes geometrias até encontrar uma boa correlação dos coeficientes aerodinâmicos.

A partir disso, surgiu uma forma de simulação das condições reais, denominada de Análise Fluidodinâmica Computacional, com o auxílio dessa ferramenta é possível transformar situações reais em computacional com uso de desenhos tridimensionais, favorecendo o controle dos resultados encontrados em túneis de vento.

De acordo com Versteeg e Malalasekera (1995) existem três etapas para encontrar soluções para problemas de CFD, os quais são pré-processamento, resolução (solver) e o pós-processamento.

O pré-processamento consiste na entrada de dados do problema no programa computacional, por meio de uma interface fácil que posteriormente transforme tais dados de forma apropriada para utilização na próxima etapa, resolução. Os ofícios necessários no pré-processamento envolvem:

- Definição da geometria da região de interesse: o domínio computacional;
- A subdivisão do domínio de uma grade em um número menor de subdomínios, que não se sobrepõem: uma grade (ou malha) de células (ou volumes de controle ou elementos);
- Seleção dos fenômenos físicos e químicos a serem modelados;



- Definição das propriedades do fluido;
- Especificação das condições de contorno adequadas a células que coincidem com a fronteira do domínio.

O resultado esperado do problema depende plenamente das opções selecionadas no pré-processamento. Usualmente a geometria é importada de programas CAD (Desenho Auxiliado por Computador), o que facilita na estruturação do problema. A solução para um problema CFD é definida pelos nós da malha, e a precisão é regida pela quantidade dos nós na malha, quanto maior melhor a solução, contudo aumenta também os custos computacionais e o tempo de cálculo para simulação. Portanto, depende das habilidades do usuário para projetar uma malha equilibrada entre o número de nós e os custos de operação computacional e tempo.

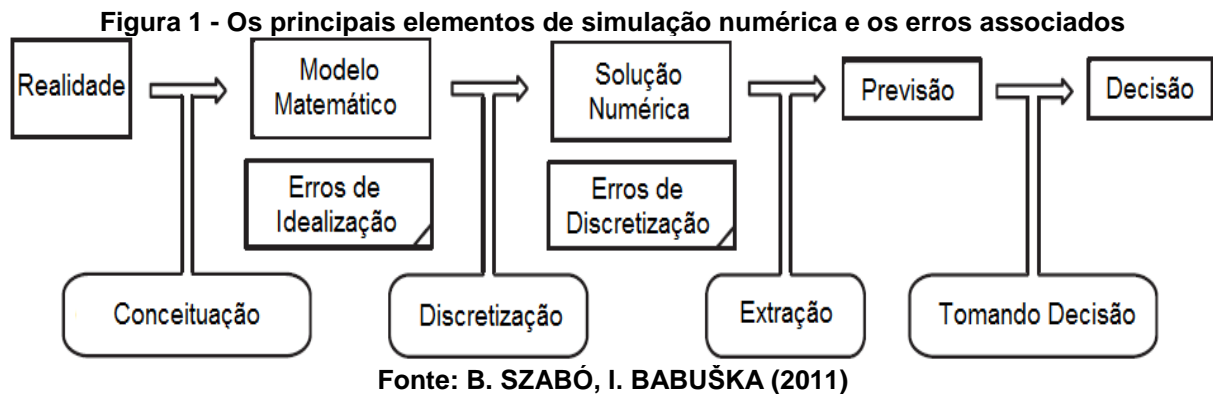
Após o pré-processamento ocorre a resolução, onde equações diferenciais são integradas com a aplicação das leis de conservação na região de cada malha. Por meio dos métodos: Diferenças Finitas, Elementos Finitos ou Volumes Finitos, onde tais métodos numéricos apresentam os seguintes passos, aproximação das variáveis fluidodinâmicas desconhecidos por meio de funções simples, discretização das aproximações por substituição nas equações de escoamento que regem e subsequentes manipulações matemáticas, e por fim solução das equações algébricas. Enfim, no pós-processamento os resultados são apresentados e visualizados para análise do usuário.

### 2.1.1 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos nos últimos 15 anos se tornou uma ferramenta indispensável para resolver problemas de engenharia de estrutura muito complexas, principalmente no âmbito aerodinâmico. Devido ao enorme número de cálculos que o método de elementos finitos necessita, é requerido a utilização de um computador digital para realização de problemas de engenharia. (STASA, 1985)

Para Szabó e Babuška (2011) o objetivo da simulação com a utilização do método de elementos finitos é realizar previsões a resposta dos sistemas físicos para diferentes maneiras de excitação do ambiente, e a partir de tais previsões, estipular os melhores métodos para o desenvolvimento do problema. Para alcançar estes

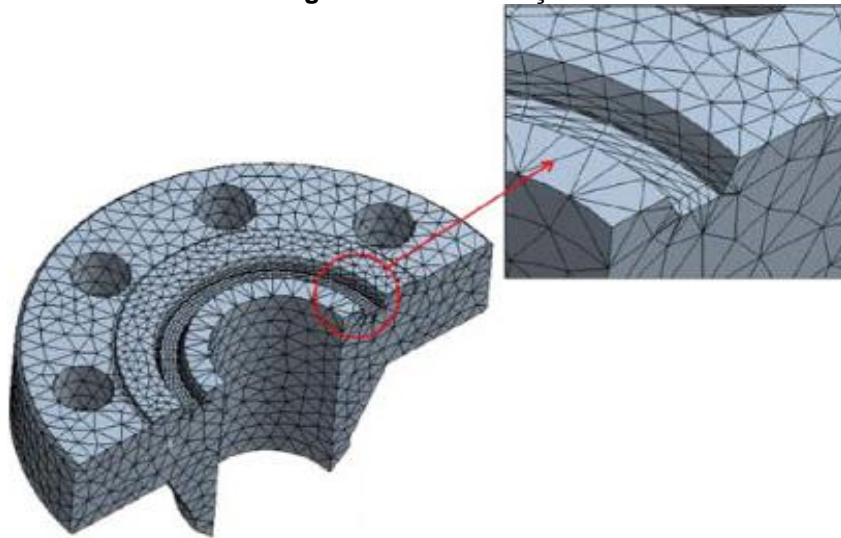
objetivos, tanto os modelos matemáticos e as condições de contorno devem ser definidas idealizando representações da realidade. Com isso, algumas perguntas devem ser solucionadas, tais como: Quais os aspectos da realidade são de interesse? Que dados devem ser previstos? Com que precisão é necessário? Os principais elementos de simulação e os erros associados são indicados esquematicamente na Figura 1.



Narasaiah (2008) afirma que uma solução analítica é uma expressão matemática que informa valores de determinada região de um corpo, o qual é válida por um número infinito de pontos no componente. Contudo, na grande maioria de problemas de engenharia, não é possível obter soluções matemáticas analiticamente, com isso em problemas mais complexos o método de elementos finitos fornece soluções aproximadas, entretanto aceitáveis, obtendo soluções para alguns pontos do problema.

O método de elementos finitos é iniciado na discretização, onde no domínio da solução é subdividido em pequenas partes de forma geométrica simples, tais como triângulos, quadrados, entre outros os quais são denominados de elementos, e são unidos entre si pelos nós, com isso os problemas complexos são transformados em questões mais simples. E a precisão da resposta depende do espaço de elemento finito, cujo é determinado pelo conjunto de todas as funções que podem ser escritas como combinações lineares de funções base, e do método utilizado para calcular os dados da solução. (SZABÓ e BABUŠKA, 2011)

**Figura 2 - Discretização**



**Fonte: SCIELO**

A partir da discretização do componente em um número finito de elementos, as equações de elementos finitos são deduzidas pelas formulações das equações de Navier-Stokes (Equação da Continuidade, Conservação do Momento e da Energia), determinando a pressão e os esforços aerodinâmicos em cada elemento geométrico com formato definido.

## 2.2 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE E EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

Para a discretização da malha do sistema em um número finito de elementos, as leis básicas que vigoram o escoamento fluidodinâmico podem ser escritas na forma diferencial, onde as variáveis estudadas serão velocidade, pressão, densidade e suas derivadas no espaço de volume de controle e do tempo. Para solução destes parâmetros, as equações que regem o problema são conhecidas como Equações de Navier-Stokes e Equação da continuidade.

A Equação 1 descrita abaixo é referente à Equação da Continuidade na forma diferencial. (Fox, 2006)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

As equações de Navier-Stokes, Equação 2, é descrito pelas três equações a seguir. (Fox, 2006)

$$\begin{aligned}\rho \cdot \frac{Du}{Dt} &= Fx - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( 2 \frac{du}{dx} - \frac{2}{3} \operatorname{div} w \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]; \\ \rho \cdot \frac{Dv}{Dt} &= Fy - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( 2 \frac{dv}{dy} - \frac{2}{3} \operatorname{div} w \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]; \\ \rho \cdot \frac{Dw}{Dt} &= Fz - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( 2 \frac{dw}{dz} - \frac{2}{3} \operatorname{div} w \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right];\end{aligned}\quad (2)$$

De acordo com Zienkiewicz e Taylor (2000), para escoamento com velocidade baixa, densidade constante e problema isotérmico, o sistema é caracterizado como escoamento incompressível, e a partir disso as Equações de Navier-Stokes e Equação da Continuidade, se reduzem para as equações 3 e 4 respectivamente:

$$\begin{aligned}\rho \left( \frac{du}{dt} + u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} + w \frac{du}{dz} \right) &= Fx - \frac{\partial p}{\partial x} + u \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left( \frac{dv}{dt} + u \frac{dv}{dx} + v \frac{dv}{dy} + w \frac{dv}{dz} \right) &= Fy - \frac{\partial p}{\partial y} + u \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left( \frac{dw}{dt} + u \frac{dw}{dx} + v \frac{dw}{dy} + w \frac{dw}{dz} \right) &= Fz - \frac{\partial p}{\partial z} + u \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right);\end{aligned}\quad (3)$$

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

As equações de Navier-Stokes também podem ser explicitas na sua forma integral, a qual é descrita na equação 5. (Fox, 2006)

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \tau_\phi \nabla_\phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV;\quad (5)$$

Onde,

$\rho \rightarrow$  Densidade;

$\phi \rightarrow$  Grandeza escalar;

$\vec{v} \rightarrow$  Velocidade Vetorial (u,v,w);

$\vec{A} \rightarrow$  Vetor área do Volume de controle;

$\tau \rightarrow$  Coeficiente de Difusão para  $\phi$ ;

$\nabla \rightarrow$  Gradiente de  $\phi$ ;

$S \rightarrow$  Fonte de  $\phi$  por unidade de volume.

Para problemas que apresentam geometria complexa de análise, onde não é possível encontrar uma solução analiticamente e realizar a integração na área ou volume do sistema, o método por elementos finitos é uma alternativa viável para resolver o problema.

### 2.3 TURBULÊNCIA

Uma vez já mencionado, os escoamentos turbulentos são determinados por comportamentos transientes, aleatórios, dissipativos e tridimensionais (Hinze, 1959). De acordo com Rodi, 1980, a turbulência se torna significativa devido a elevados números de Reynolds, ocasionando em grandes variações de flutuações de velocidades e pressões.

O número de Reynolds, descrito na equação 6, é um parâmetro adimensional, responsável por descrever a maneira do escoamento sobre corpos sólidos, o qual depende de algumas variáveis tais como dimensões do corpo, velocidade do escoamento e propriedades do fluido (Çengel e Cimbala, 2007).

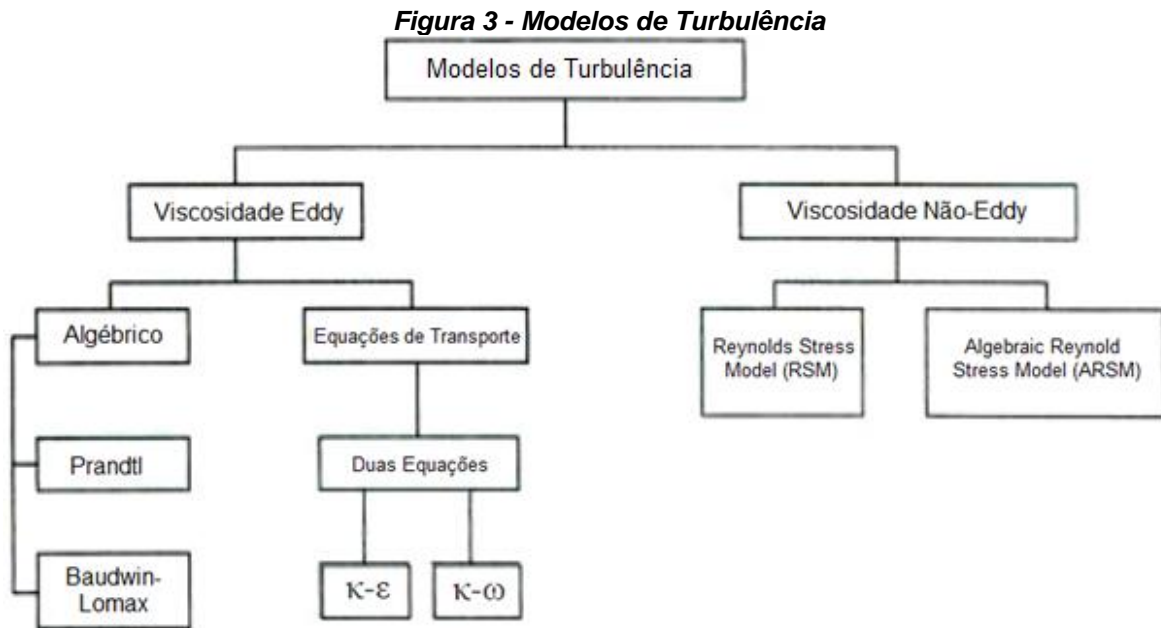
$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (6)$$

Onde:  $\rho$  é a densidade do ar,  $v$  a velocidade do escoamento,  $\mu$  a viscosidade dinâmica do ar,  $L$  o comprimento do corpo.

Para Hucho (1998), valores do número de Reynolds maiores que  $10^5$  o escoamento já pode ser considerado como turbulento, contudo dependendo de outras variáveis, mesmo com valores acima do mencionado, o escoamento pode apresentar características tanto turbulento como laminar.

Visando isso, Chen, Patel e Ju, 1990, destacou que devido a necessidade por uma simulação mais próxima do real onde os veículos são expostos, escoamento turbulento, surgiu um meio para determinar uma solução média temporal das equações de Navier-Stokes, determinado como Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS).

Para a aplicação do método de RANS, foi necessário encontrar novas equações denominadas Modelos de turbulência, uma vez que o número de variáveis aumentou, determinadas como tensões de Reynolds. Tais modelos são divididos em dois grupos: Viscosidade Eddy (Isotrópicos) e Viscosidade Não-Eddy (Anisotrópicos) (HUCHO, 1998).



Fonte: HUCHO (1998).

Dentre os modelos de turbulência, as Equações de Transporte  $\kappa - \varepsilon$  e  $\kappa - \omega$ , onde empregam os conceitos físicos da turbulência pela energia cinética ( $\kappa$ ) e dissipação ( $\varepsilon$  e  $\omega$ ), e ambas adicionam duas equações de transporte ao problema do fechamento, são os mais utilizados devido a fácil implementação, possuir baixo custo computacional e boa estabilidade. O modelo  $\kappa - \omega$  é adequado para escoamentos externos e aplicações em CFD, por ser capaz de prever com precisão o que ocorre na região próxima às paredes do sólido (Versteeg e Malalasekera, 1995). Enquanto que o modelo  $\kappa - \varepsilon$  apresenta mais exatidão para escoamentos livres, com isso a utilização adequada desse modelo com uma discretização da camada limite na região da superfície do veículo traduz em resultados mais precisos. Neste trabalho foi utilizado o modelo  $\kappa - \varepsilon$ .

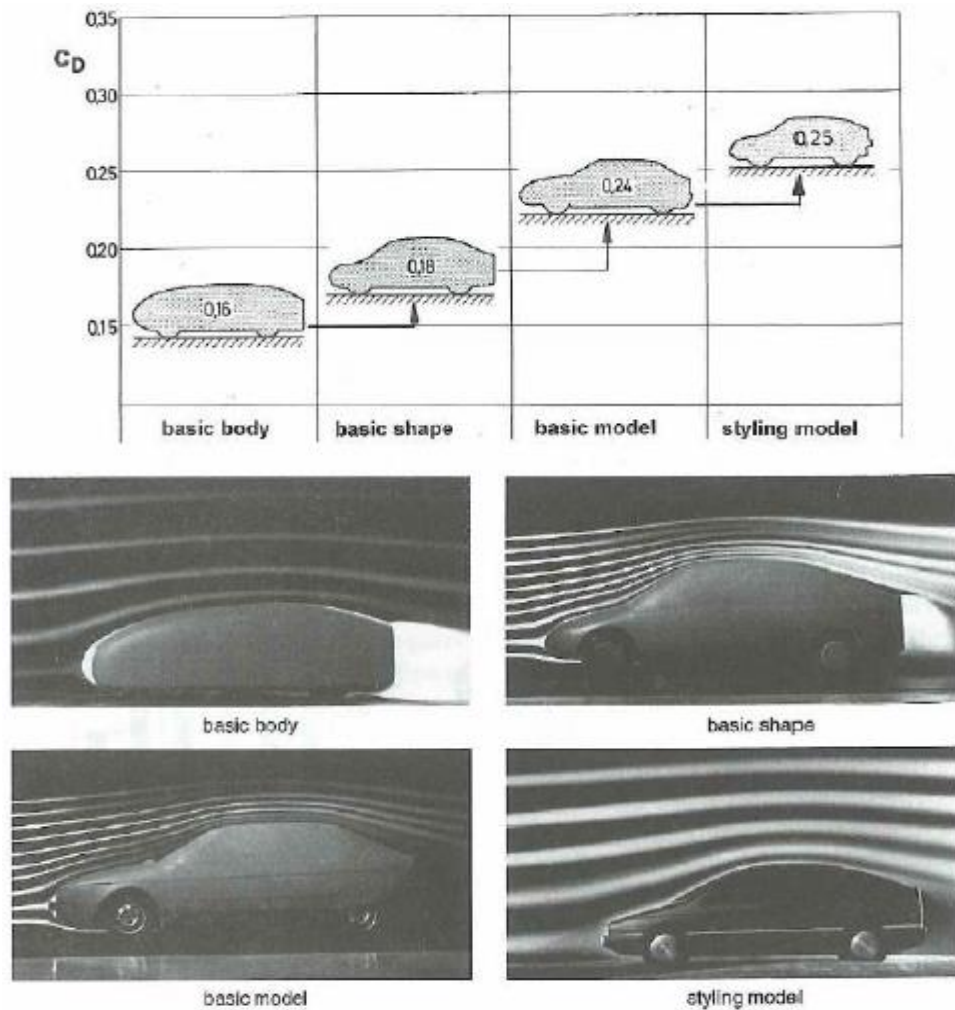
## 2.4 ARRASTO

O desenvolvimento aerodinâmico em veículos automotivos ganhou suma importância ao longo da história, uma vez que obteve maiores necessidades em desenvolver veículos mais eficientes, com a capacidade de diminuir o consumo alterando apenas a geometria dos projetos. (Castejon, 2010)

Um projeto bem desenvolvido visando a aerodinâmica significa que está diretamente interligado ao seu arrasto, uma vez que o arrasto influencia totalmente no consumo de combustível de um automóvel. Segundo Foux (1985), é possível reduzir mais de 50% no coeficiente de arrasto apenas realizando alterações na geometria dos veículos, tal redução evidenciando em um decréscimo de mais de 12% no consumo direto de combustível. E a partir disso que demonstra o interesse das indústrias automotivas a aderirem estudos para com a aerodinâmica veicular.

Hucho (1998) afirma que os primeiros projetos antecedem de um formato básico de modelo de veículo, onde realça que as estratégias para aprimorar os detalhes e formas de modelos aerodinâmicos são complementares e que para um bom desenvolvimento de projeto necessita priorizar ambas estratégias para objetivar o final do produto, exemplificados na figura 4 a seguir.

**Figura 4 - Desenvolvimento de modelos a partir de um formato básico e a influência no coeficiente de arrasto.**



Fonte: Hucho (1998).

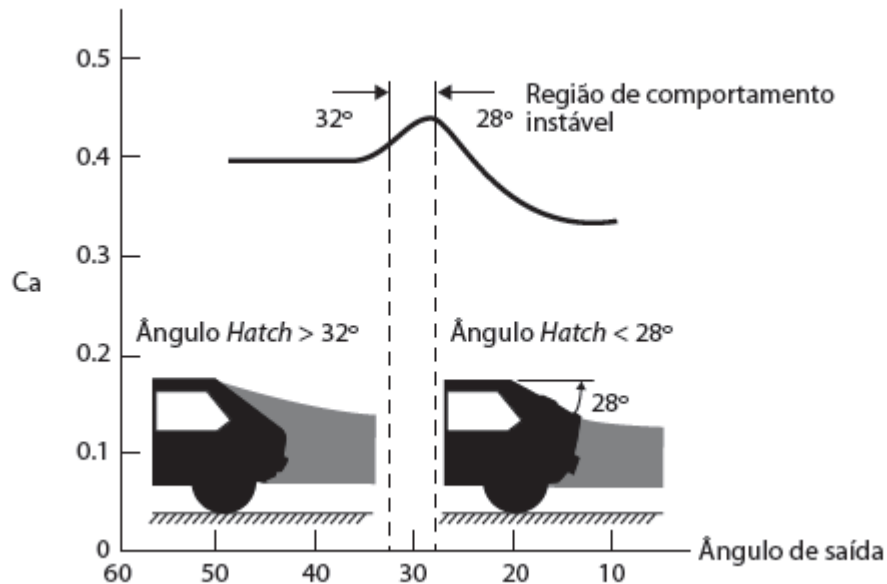
Dentre as características de forma dos automóveis, ao longo do desenvolvimento de novos estudos, notou-se um padrão com a mudança de algumas características na geometria dos veículos, ocasionando um favorecimento nas variáveis aerodinâmicas, Segel (1956) demonstrou que alterações na inclinação da região frontal dos veículos, raios de transição, ângulo de convergência traseira, elevação do chão, entre outros detalhes, reduzem o coeficiente de arrasto significadamente se comparado aos modelos originais.

Averiguando a busca por modelos mais eficientes, além da forma dos modelos, dispositivos foram sendo desenvolvidos afim de propor uma redução no coeficiente de arrasto, tais como spoilers, aerofólios, placas externas, difusores, defletores laterais, etc.



A figura 5 apresenta a variação do coeficiente de arrasto em função da variação do ângulo de saída, onde observa-se uma região de instabilidade próximo ao ângulo de 30° e uma região de estabilidade próxima ao ângulo de 15°.

**Figura 5 - Variação do coeficiente de arrasto com relação ao ângulo de saída**



**Fonte: Milliken W.F., Milliken, D.L. (1995).**

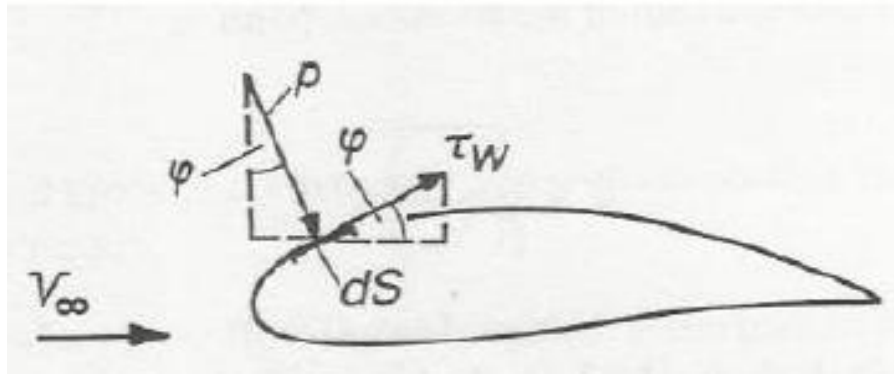
Com a implementação de dispositivos na região traseira, concede ao sistema corrigir o deslocamento prematuro, desenvolvendo uma sucção que condiciona as linhas de correntes próximas a superfície do corpo. Além disso, tais dispositivos auxiliam na redução da força de sustentação, cujo tal responsável por manter o carro empurrado contra o solo, com o objetivo de obter um melhor agarre e um melhor aproveitamento do fundo plano. (Gillespie, 1992)

Com um escoamento governado de baixo para cima, causado pela menor pressão na região superior do carro, complementa para o deslocamento do escoamento na parte superior, ocasionando grandes vórtices, responsáveis por perda de energia. (Segel, 1956)

E voltada para essa energia que Olley, 1934, afirma que a redução do coeficiente de arrasto em veículos é baseada no fato de que perturbações bruscas no escoamento consomem energia local e com isso podem ser agente de um consumo de energia em distintos locais do veículo.

Segundo trabalhos realizados por Hucho, 1995, notou-se que o arrasto surge de forma mais característica na parte traseira dos corpos, para isso é recomendado encontrar modos de conter a separação do fluxo na região traseira, com o intuito de suavizar o escoamento. A figura 6 demonstra as componentes do arrasto em um corpo.

**Figura 6 - Componentes do arrasto em um corpo.**



Fonte: Hucho, 1995.

O arrasto é baseado nas Equações de Conservação do Momento de Navier-Stokes, já explicitas neste trabalho anteriormente. E tem como princípio a Segunda Lei de Newton, onde afirma que a força exercida sobre um objeto é equivalente ao produto de sua massa pela sua aceleração.

E a força resultante sofrida em um veículo gera o arrasto, representada por  $D$ , cujo tal é a componente no sentido do escoamento, e a sustentação, representada por  $L$ , onde atua na direção normal ao escoamento. Munson, 2004, descreve que é possível encontrar o arrasto e a sustentação através da integração das tensões de cisalhamento e normais ao objeto que está sendo analisado. A partir disso, tem-se:

$$dFx = (pdA)\cos\theta + (\tau_p dA)\sen\theta \quad (7)$$

$$dFy = -(pdA)\sen\theta + (\tau_p dA)\cos\theta \quad (8)$$

$$D = \int dFx = \int (pdA)\cos\theta + \int (\tau_p dA)\sen\theta \quad (9)$$

$$L = \int dFy = \int (pdA)\sen\theta + \int (\tau_p dA)\cos\theta \quad (10)$$

Contudo pela dificuldade de calcular tais integrais, devido à complexidade dos fenômenos tridimensionais envolvidos e geometrias de forma complexas, Morelli (2000) determinou uma alternativa, onde definiu os coeficientes de arrasto  $C_d$ , e de Sustentação  $C_l$ , explicitados a seguir.

$$Cd = \frac{D}{0,5\rho v^2 A} \quad (11)$$

$$Cl = \frac{L}{0,5\rho v^2 A} \quad (12)$$

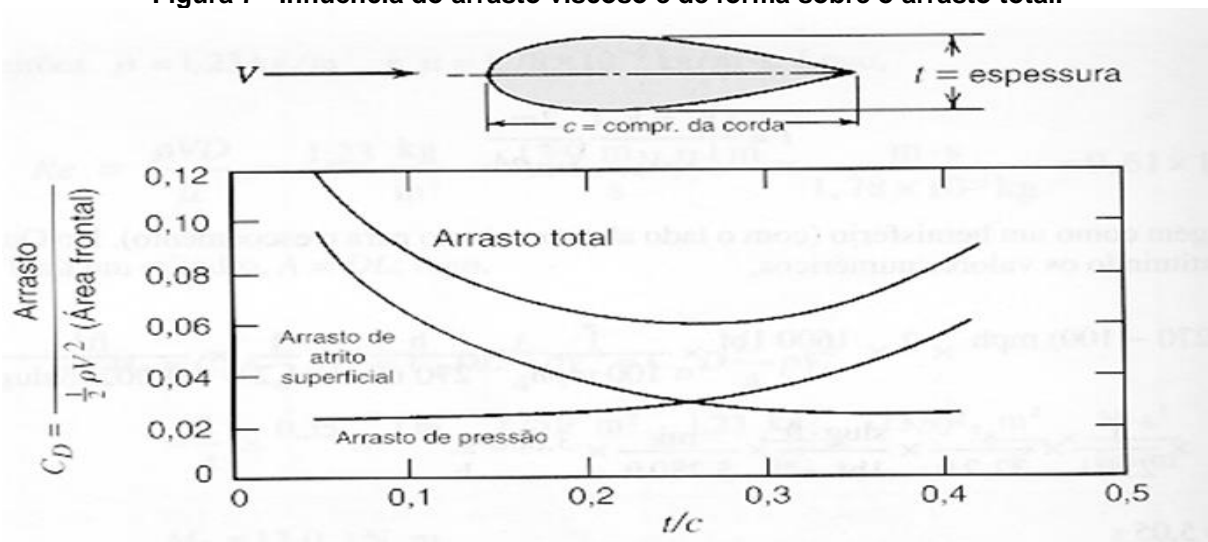
Sendo que, D, Força de Arrasto; L, Força de Sustentação;  $\rho$ , densidade do ar; v, velocidade do objeto; A, área frontal do objeto.

Morelli (2000) ainda afirma que o arrasto se subdivide a outros dois coeficientes, sendo um sobre arrasto viscoso e o arrasto de pressão. Como o próprio nome supôs, o arrasto viscoso se deve pelas características do meio determinada pela viscosidade, cujo qual consiste em uma força de adesão sobre a camada limite formada próxima a superfície do objeto. De acordo com seus estudos, o arrasto de viscosidade é responsável de 5 a 10% do arrasto total de um objeto.

Uma outra pequena parcela responsável pelo arrasto total é a sustentação, representando uma porcentagem aproximadamente entre 10 a 15%, tal determinado pela componente da força de sustentação na direção do deslocamento do escoamento.

O maior agente no arrasto veicular é proporcionado pelo arrasto de forma, provocado pela perda de energia que os vórtices assumem sobre o escoamento nas regiões de desacoplamento da camada limite. Avalia-se que 75 a 80% do arrasto total é influenciado pelo arrasto de forma.

**Figura 7 - Influência do arrasto viscoso e de forma sobre o arrasto total.**



Fonte: Schlichting (2000).

E focando para o arrasto de forma, Hucho (1995) afirma que um estudo da geometria traseira é de suma importância para a redução do arrasto, visto que para

isso necessita de uma pressão dinâmica próxima da pressão de escoamento livre, e para alcançar tal redução uma maneira é promover o afilamento da região traseira.

Afim de quantificar a relação das variáveis aerodinâmicas com o consumo de combustível, Fletcher e Stewart, 1986, concretizaram um experimento onde arredondaram as arestas e alteraram a curvatura da superfície frontal de um ônibus, resultando em uma redução de 27% no coeficiente de arrasto, e com isso o modelo apresentou uma economia de combustível de 13,8%, para uma velocidade de 90 km/h.

## 2.5 PONTOS DE PRESSÃO

Como já averiguado no tópico anterior, um veículo em movimento ocasiona um distúrbio no fluxo de ar, provocando forças aerodinâmicas sobre a superfície do veículo, sendo uma delas gerada pela pressão, cujo tal atua de maneira perpendicular à superfície, agindo tanto no arrasto como na sustentação, sendo ela totalmente dependente da geometria do objeto no escoamento.

Pelo princípio de Bernoulli, a variação da velocidade se relaciona com a variação de pressão. Relação explícita pela equação de Bernoulli a seguir. (Çengel e Cimbala, 2007)

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = cte \quad (13)$$

Onde  $p$  é a pressão,  $V$  a velocidade no ponto de estudo,  $\rho$  a densidade do fluido.

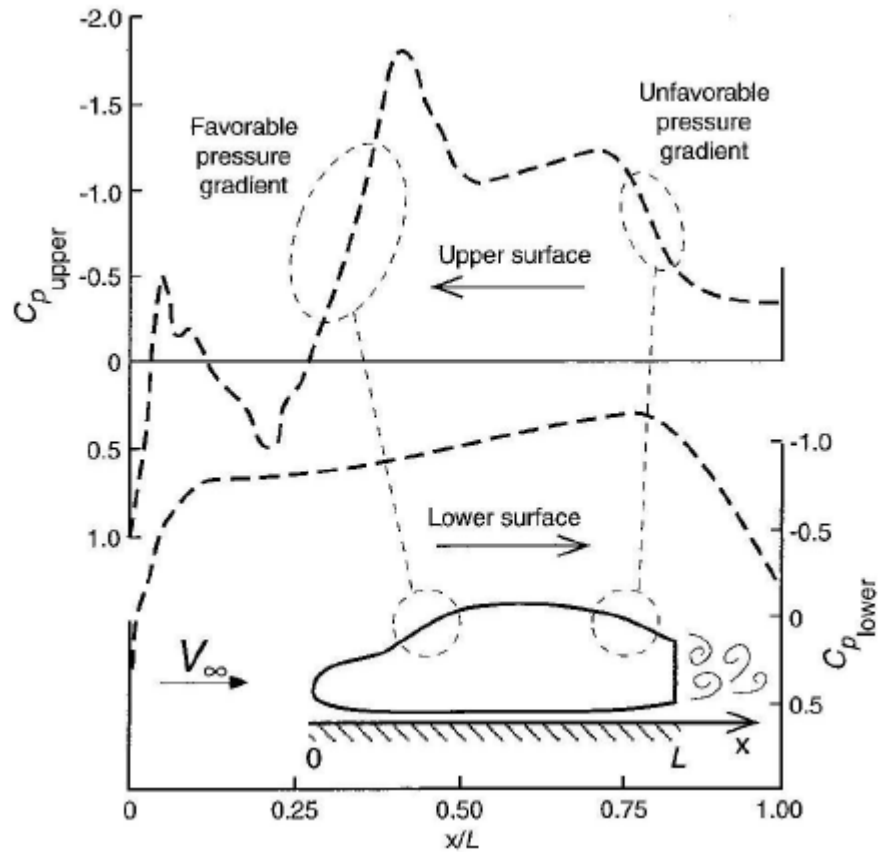
De acordo com Hucho, 1995, para a aerodinâmica veicular é desejável obter forças de sustentação negativas, para que seja gerada uma menor pressão na região inferior do veículo, dessa maneira pressionando o automóvel contra o solo.

A partir da equação de Bernoulli, é possível determinar uma variável utilizada para a determinação dos esforços aerodinâmicos, o coeficiente de pressão, diferentemente das outras variáveis aerodinâmicas, essa é independente da velocidade, determinada pela equação 14 a seguir. (Çengel e Cimbala, 2007)

$$C_p = \frac{(p-p_\infty)}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (14)$$

Katz (1995) afirma que a partir de uma distribuição de pressão ao longo da superfície um objeto é possível determinar as componentes da força resultante gerada pelo arrasto e pela sustentação.

Figura 8 - Distribuição de Pressão ao longo da superfície de um veículo



Fonte: Hucho, 1995.

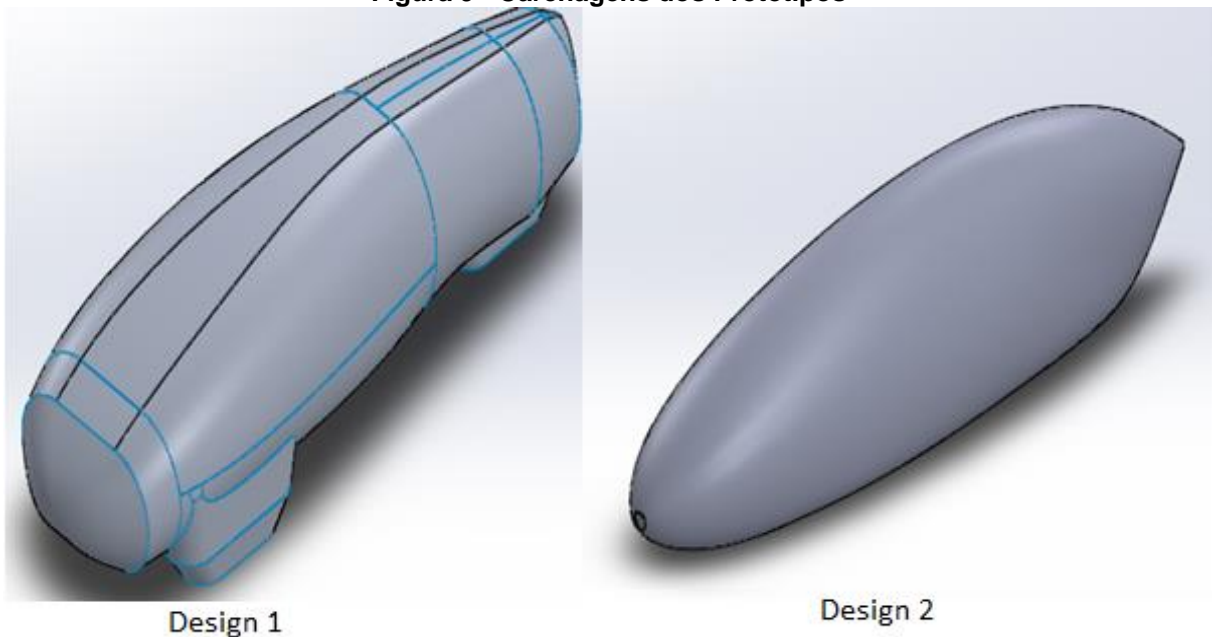
### 3 METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é buscar uma otimização na geometria dos protótipos de eficiência energética já produzido pela Equipe Pato a Jato da UTFPR Câmpus Pato Branco, realizando um estudo da aerodinâmica do veículo, buscando uma redução nas forças de arrasto do protótipo, e conseqüentemente aumentando a eficiência.

Como já mencionado anteriormente, devido a geometria complexa do protótipo, uma maneira de estudar e buscar resultados aceitáveis para o problema é pelo método de elementos finitos, o qual será aplicado com o auxílio do *software* Ansys Workbench, a partir de várias simulações do comportamento do escoamento em volta de diferentes geometrias do protótipo.

Uma vez que o projeto é desenvolvido visando a participação de competições de eficiência energética, as dimensões do protótipo são limitadas devido a regras de segurança estabelecidas por tais organizações, portanto as características geométricas dos projetos serão realizadas tendo em vista o regulamento estabelecido pelas competições, onde o mesmo foi desenhado no *software* SolidWorks versão 2015. A figura 9 mostra os modelos dos dois protótipos originais já desenvolvidos que atendem aos requisitos do regulamento citado acima.

**Figura 9 - Carenagens dos Protótipos**



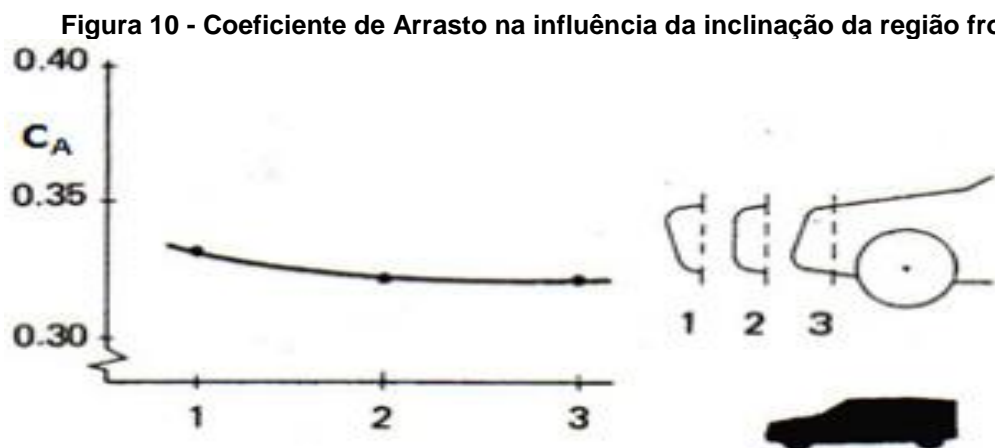
**Fonte: Equipe Pato a Jato**

O design 1 foi projetado visando acoplar todos os componentes dentro de sua carenagem, afim de evitar o surgimento de um regime turbulento e perda de energia, desta maneira transformando o escoamento do ar sobre o carro mais uniforme. Já o design 2, foi elaborado com o intuito de aproximar sua geometria à modelo gota d'água, e também apresentar uma menor área frontal, contudo com o eixo da direção das rodas dianteiras se expondo para fora do protótipo, corroborando para a geração de um regime turbulento sobre tal região.

As simulações foram realizadas utilizando a plataforma FLUENT® para a realização do processamento numérico do escoamento em torno dos protótipos.

### 3.1 MODIFICAÇÕES NOS DESIGNS

Para a otimização dos desenhos em CAD, utilizou-se como referência as geometrias já desenvolvidas pela equipe Pato a Jato, e então analisados fatores essenciais que influenciam no escoamento externo, tais como inclinação da região frontal, raios de transição, ângulo de convergência traseira, elevação do chão, entre outros. Onde para a análise do parâmetro da inclinação da região frontal, foi baseada no trabalho de Gilhaus e Renn (1986), conforme mostra a Figura 10.



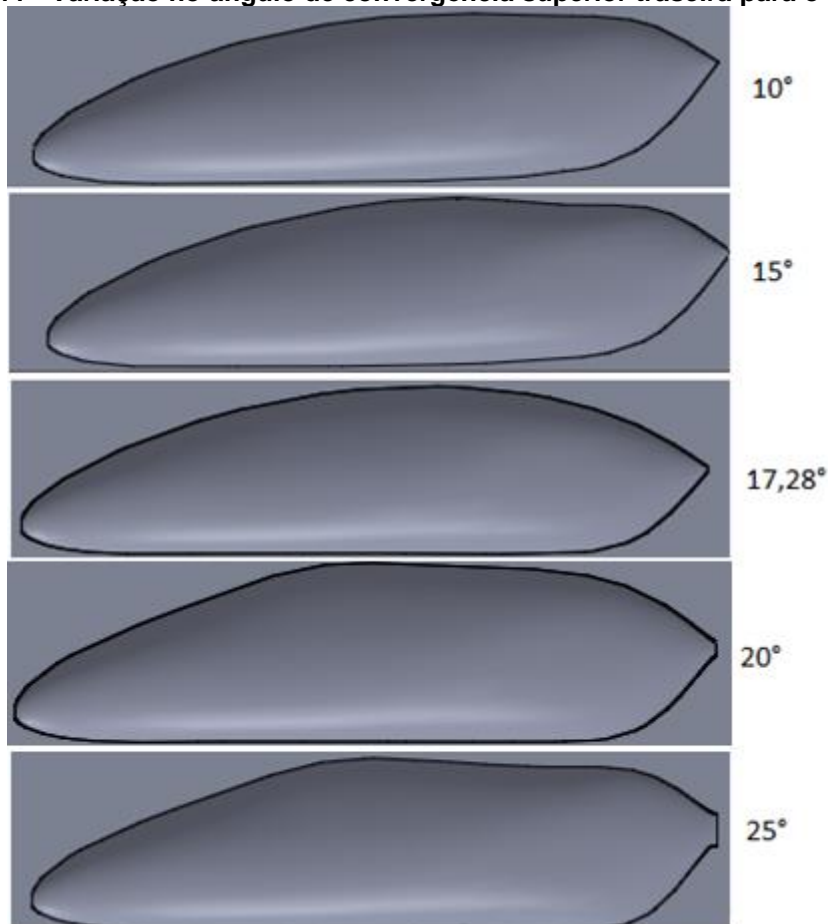
Fonte: A. GILHAUS, V. RENN (1986)

Optou-se por não utilizar o eixo da direção dianteira e as rodas do design 1, com o intuito de comparar o arrasto apenas sobre as carenagens, como também a fim de melhorar a praticidade durante as simulações.

Para o desenvolvimento deste trabalho, a nível de comparar diferentes geometrias visando encontrar um menor arrasto, foi focado em alterar duas variáveis, sendo o ângulo de convergência traseira e a inclinação da região frontal.

Primeiramente foi alterado unicamente do projeto o ângulo de convergência traseira, que de acordo com Hucho (1995) é o principal responsável pela redução do arrasto em automóveis, e que apresenta melhores resultados para valores entre 10 e 15°. Os ângulos adotados a partir do design 1, cujo tal apresenta ângulo de convergência traseira de 9,53°, foram de 15°, 20°, 25° e 30°. Já para o design 2, que apresenta 17,28° de ângulo de convergência traseira, os ângulos adotados foram de 10°, 15°, 20° e 25°, tais alterações demonstradas na figura 11.

**Figura 11 - Variação no ângulo de convergência superior traseira para o design 2**



**Fonte: Autoria Própria**

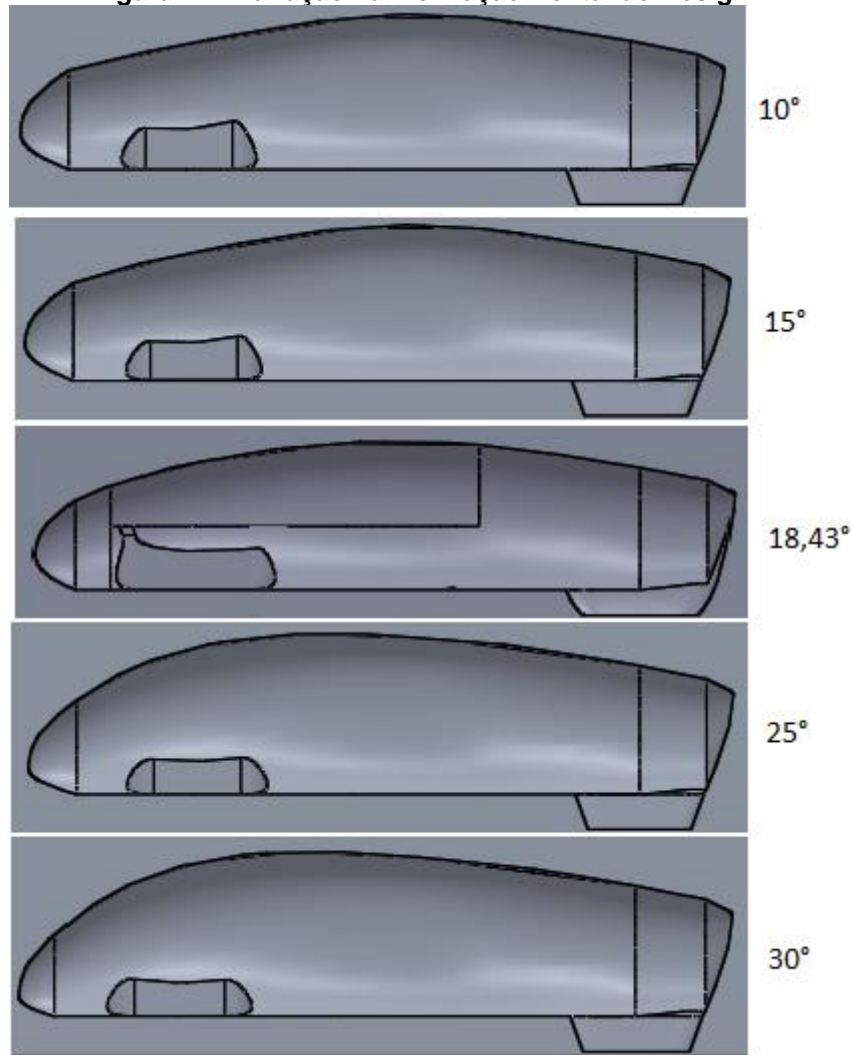
É percebido que ao aumentar o ângulo de convergência superior traseira dos protótipos, conseqüentemente evidencia em um aumento na sustentação. Com o intuito de evitar essa adição, ao longo que foi crescendo o ângulo de convergência traseira foi adotado um ângulo de divergência inferior nos protótipos, cujo tal de acordo



com Hucho (1995), afirmou que juntamente com um melhor ângulo de convergência promove um menor arrasto para o protótipo.

Posteriormente a isso, foi modificado exclusivamente do projeto a inclinação da região frontal, cujo tal é medida com relação ao eixo horizontal, uma vez que Gilhaus e Renn (1986) afirmam que a inclinação frontal é um parâmetro sensível para com o coeficiente de arrasto, sendo possível uma redução significativa em tal coeficiente apenas com um arredondamento de aresta, com isso foi adotado dois valores maiores e dois valores menores da inclinação dos protótipos originais, o design 1 apresenta inclinação frontal de  $18,43^\circ$ , e o design 2 uma inclinação frontal de  $19,78^\circ$ . Tais mudanças foram adotadas cumprindo o regulamento proposto pelas competições de eficiência energética.

**Figura 12 - Variação na inclinação frontal do Design 1**



**Fonte: Autoria Própria**

## 3.2 SIMULAÇÃO

### 3.2.1 Discretização dos Designs

Com finalidade de obter na simulação resultados próximos as condições reais, foi realizado a discretização dos designs dentro de um volume de controle, onde foi estipulado dimensões equivalente a vinte vezes as medidas de largura e comprimento dos protótipos, e dez vezes as medidas da altura dos protótipos, afim de proporcionar um escoamento mais uniforme possível.

A partir disso, adquiriram-se as seguintes dimensões para a simulação, exemplificado nas tabelas 1 e 2 a seguir.

**Tabela 1 - Dimensões para discretização do Design 1.**

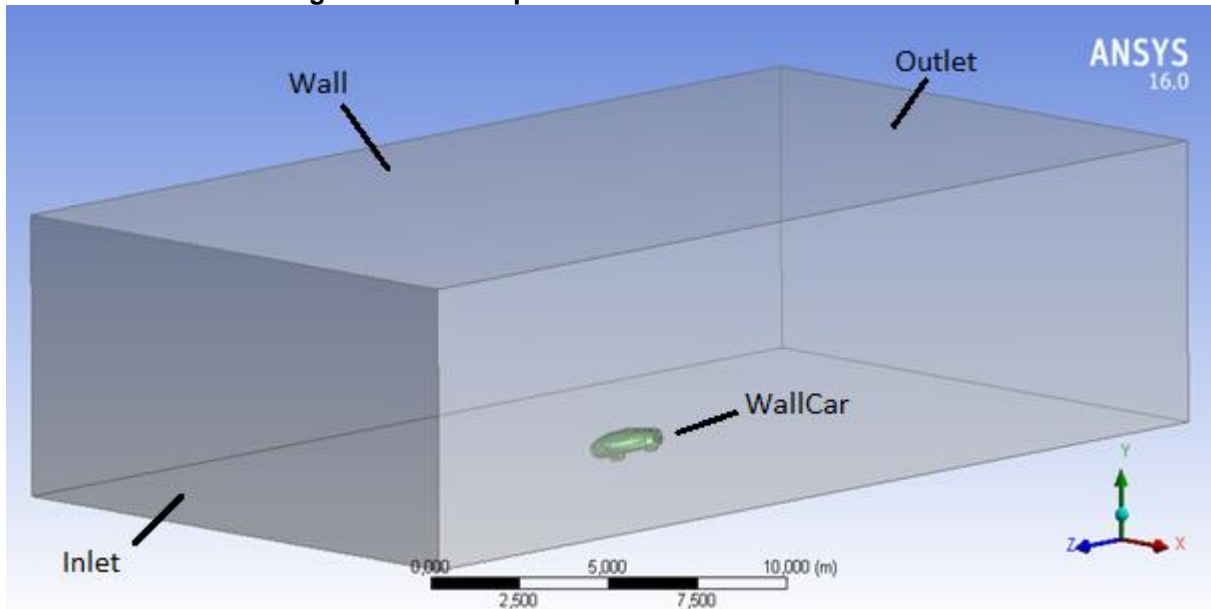
<b>Design 1</b>	<b>Dimensões:</b>
<b>Comprimento do Protótipo</b>	2400 mm
<b>Altura do Protótipo</b>	680 mm
<b>Largura do Protótipo</b>	800 mm
<b>Área Frontal do Protótipo</b>	0,4144 m <sup>2</sup>
<b>Comprimento do Volume de Controle</b>	48 m
<b>Altura do Volume de Controle</b>	6,8 m
<b>Largura do Volume de Controle</b>	16 m

**Tabela 2 - Dimensões para discretização do Design 2.**

<b>Design 2</b>	<b>Dimensões:</b>
<b>Comprimento do Protótipo</b>	2560 mm
<b>Altura do Protótipo</b>	650 mm
<b>Largura do Protótipo</b>	600 mm
<b>Área Frontal do Protótipo</b>	0,2842 m <sup>2</sup>
<b>Comprimento do Volume de Controle</b>	51,2 m
<b>Altura do Volume de Controle</b>	6,5 m
<b>Largura do Volume de Controle</b>	12 m

Para a realização da simulação, foi utilizada uma estratégia comum para análises computacionais com a intenção de analisar escoamentos externos em objetos, onde foi excluído o protótipo do volume interno de um prisma que compõe o volume de controle, como mostrado na figura 13.

**Figura 13 - Protótipo dentro do Volume de Controle**



**Fonte: Autoria Própria realizada no ANSYS® v16.0.**

A partir disso, foi nomeado as seções que influenciam na determinação das condições de contorno, sendo elas: *Inlet*, a parede de entrada do escoamento sobre o volume de controle, *Wall*, a parede externa do volume de controle, *WallCar*, a superfície do protótipo interna do volume de controle, e *Outlet*, a parede de saída do escoamento.

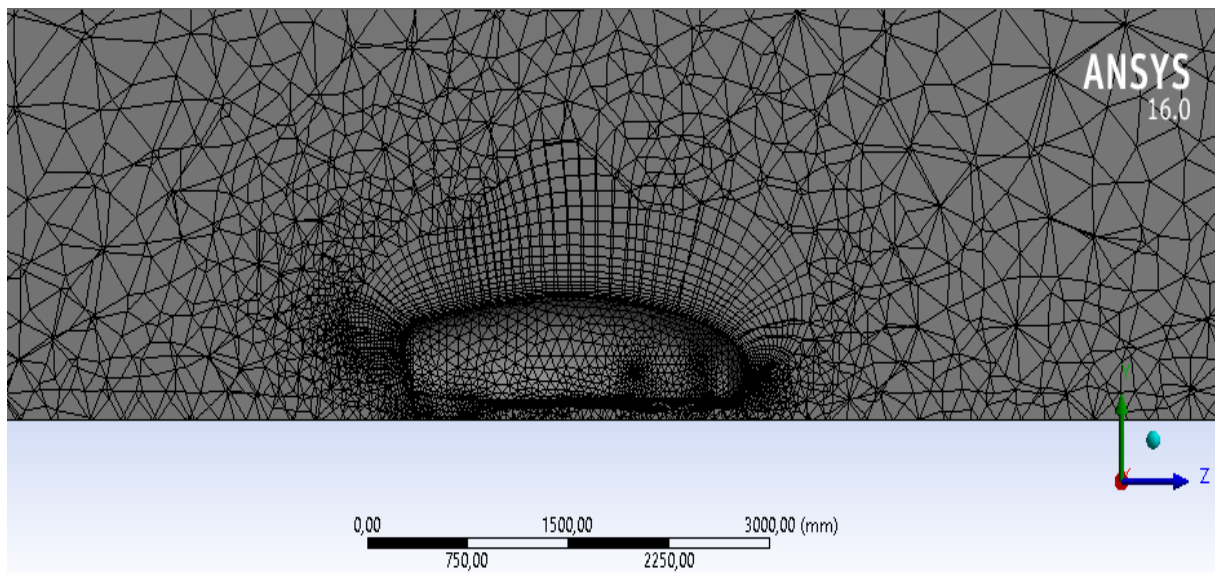
### 3.2.2 Geração da malha

Para a geração da malha, foi adotado uma malha tetraédrica por todo o volume de controle, está uma selecionada por permitir uma adequada adaptação em geometrias complexas, e também por visar estabelecer geometrias o mais próximo de figuras geométricas isométricas, o que ocasiona uma solução iterativa com deslocamentos semelhantes, com isso gerando uma malha mais uniforme, desta maneira tornando o processo iterativo mais estável.

Em regiões onde é necessária uma análise mais precisa e onde há mais variações do comportamento do escoamento, realizou-se uma malha mais refinada com a utilização do recurso *inflation*, próximo a parede do protótipo. O tamanho mínimo de elemento foi adotado como 100 mm e o número de elementos gerado com esse tamanho de elemento foi de 1783313. Este refino favorece a convergência da simulação.

Uma vez que este trabalho não apresenta uma análise experimental, um comparativo de malha foi realizado para cada uma das condições de geometria, três tipos de malhas diferentes foram criados, e observado a convergência e divergência dos resultados, sendo este último explicitado no **Apêndice A**.

**Figura 14 – Inflation gerado na Malha**



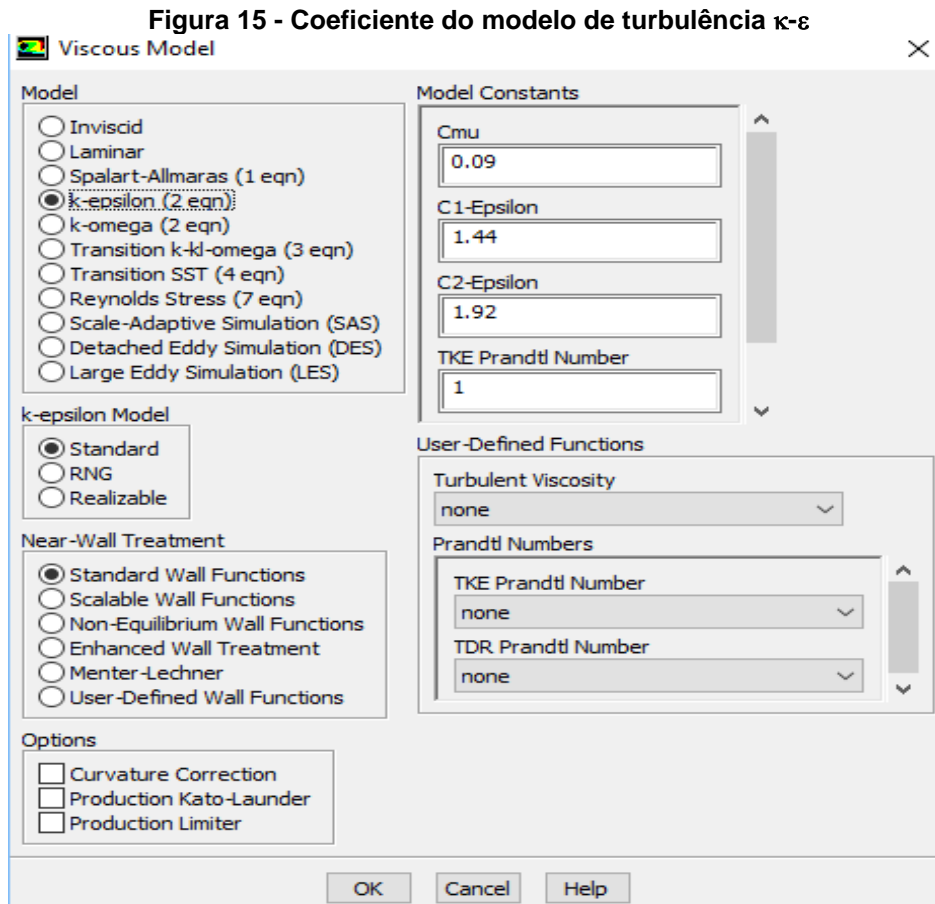
**Fonte: Autoria Própria realizada no ANSYS® v16.0.**

### 3.2.3 Parâmetros das simulações

Após a determinação das geometrias no SolidWorks e geração de malha é necessário configurar o Fluent, a partir disso foram determinados os parâmetros físicos e as propriedades necessárias para a execução da simulação. O sentido do escoamento sobre o carro foi adotado como referência o eixo z positivo.

O fluido escolhido para as simulações foi o ar a 25°C, e em todos os casos o regime de escoamento adotado foi o permanente e pressão absoluta de (1) atm. Além disso, o modelo de turbulência padrão escolhido foi o  $\kappa$ - $\epsilon$ , este determinado pois apresenta fácil implementação, possui baixo custo computacional e boa estabilidade.

Com a implementação desse modelo de turbulência, de acordo com Schlichting e Gersten, 2000, os resultados encontrados tornam-se satisfatórios apenas para valores de  $Y_{plus}$  ( $y^+$ ) no intervalo entre 30 e 200, para paredes solidas no modelo (wall), com isso a verificação dessa variável foi analisada para todas as simulações, tal demonstrada no **APÊNDICE B**. A figura 15 apresenta os coeficientes na simulação para esse modelo de turbulência.



Fonte: ANSYS v16.0.

### 3.2.4 Condições de contorno

Para encontrar resultados mais satisfatórios para uma simulação tridimensional, primeiramente o recurso de dupla precisão do Ansys Workbench foi selecionado, uma vez que mesmo para baixos números de Reynolds, os modelos utilizados apresentam grande condições de turbulência existente nas regiões de desunião do escoamento.

Afim de analisar a convergência dos resultados e a influência da velocidade no arrasto e na sustentação, como também realizar análises próximas a situações reais empregadas nos protótipos, este trabalho foi realizado com uma velocidade média de entrada no volume de controle (*inlet*), sendo ela de 15 m/s.

Já para a saída (*outlet*) do escoamento no volume de controle, outra condição de contorno foi a consideração da pressão manométrica ajustada para zero (0) atm em todas as simulações. E tanto para as condições de contorno de entrada e saída, a intensidade da turbulência foi ajustada para 3% e a relação de viscosidade turbulenta igual a 10.

A tabela 3 a seguir, apresenta as demais configurações adotadas nas simulações.

**Tabela 3 - Parâmetros e condições de contorno.**

<b>Ambiente</b>	Fluido – ar: T = 25°C, P <sub>abs</sub> = 1 atm, ρ = 1,225 kg/m <sup>3</sup> , μ = 1,78*10 <sup>-5</sup> kg/m-s, γ = 1,4.
<b>Valores de entrada:</b>	V = 15 m/s.
<b>Modelo de Turbulência:</b>	κ-ε
<b>Intensidade de Turbulência:</b>	3%
<b>Regime de Escoamento:</b>	Permanente
<b>Valores de Saída:</b>	Pressão manométrica = 0 atm
<b>Critério de Convergência:</b>	10 <sup>-5</sup>

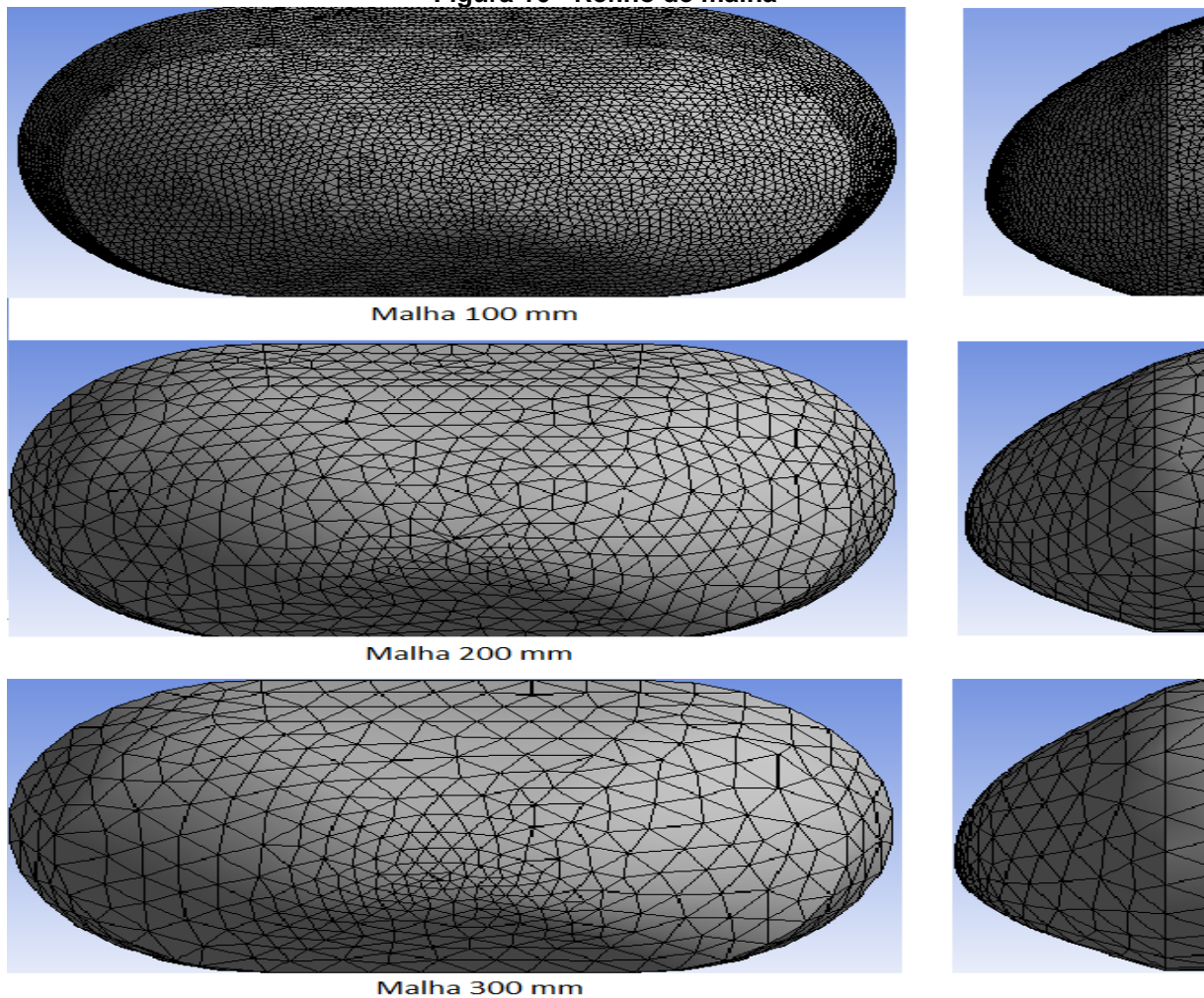
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 INFLUÊNCIA DA MALHA NOS COEFICIENTES AERODINÂMICOS

A região de impacto entre o ar e os protótipos é caracterizado por apresentar um grande gradiente de pressão, e é a região onde ocorre o desprendimento de vórtices com o protótipo, com isso o estudo de malha foi considerado para ajustar possíveis recirculações do escoamento e obter um resultado mais preciso dos coeficientes aerodinâmicos.

Para o estudo da influência da malha nos coeficientes aerodinâmicos, foram utilizados três diferentes refinamentos de malha, sendo eles com tamanho de elemento de 100 mm, 200 mm e 300 mm.

**Figura 16 - Refino de malha**

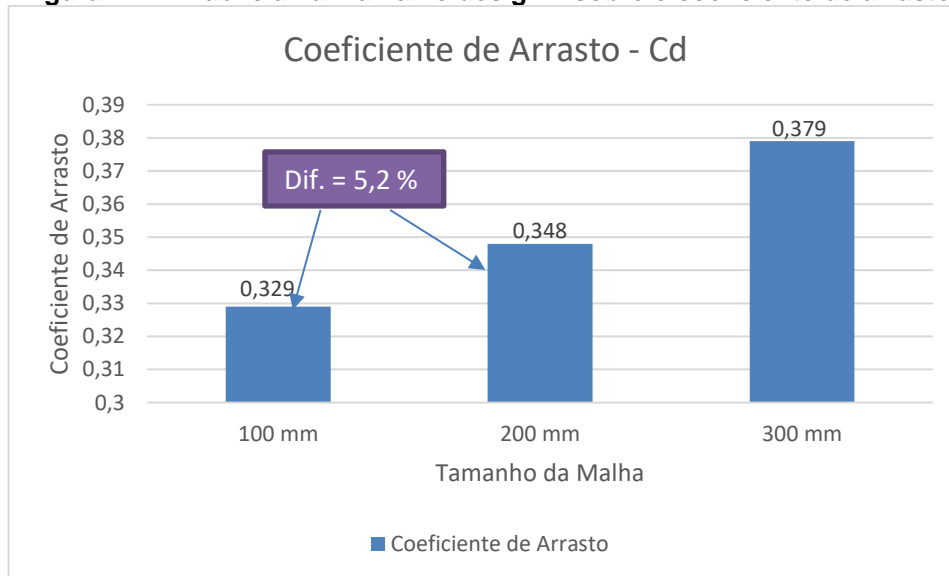


Fonte: ANSYS® v16.0.

E afim de apenas comparação de malha utilizou-se os resultados encontrados para as análise sem alteração do ângulo de convergência traseira e da inclinação frontal sobre os designs.

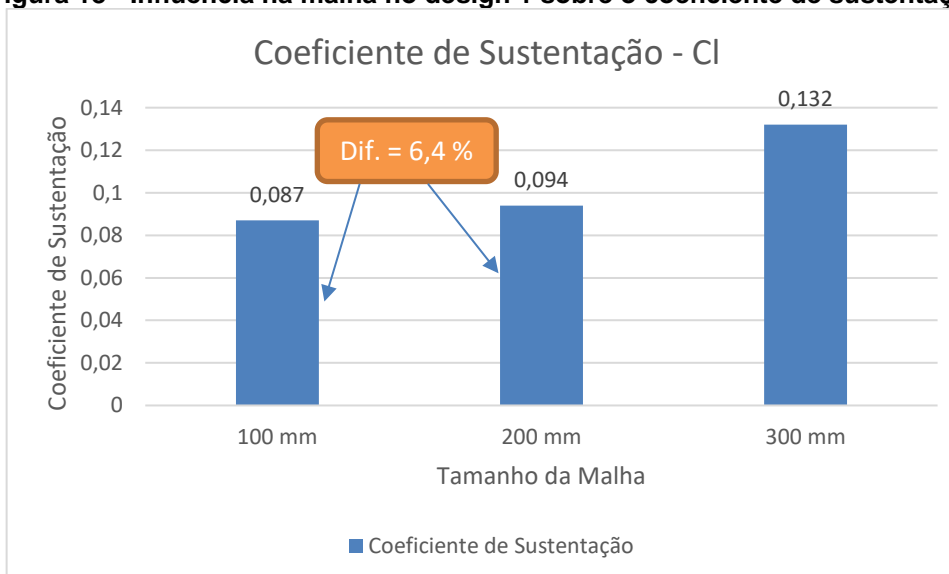
O modelo com 100 mm de refino gerou 1783313 elementos na malha, já o modelo com 200 mm gerou 641656 elementos, e por fim o modelo com 300 mm gerou 427771 elementos.

**Figura 17 - Influência na malha no design 1 sobre o coeficiente de arrasto**



Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

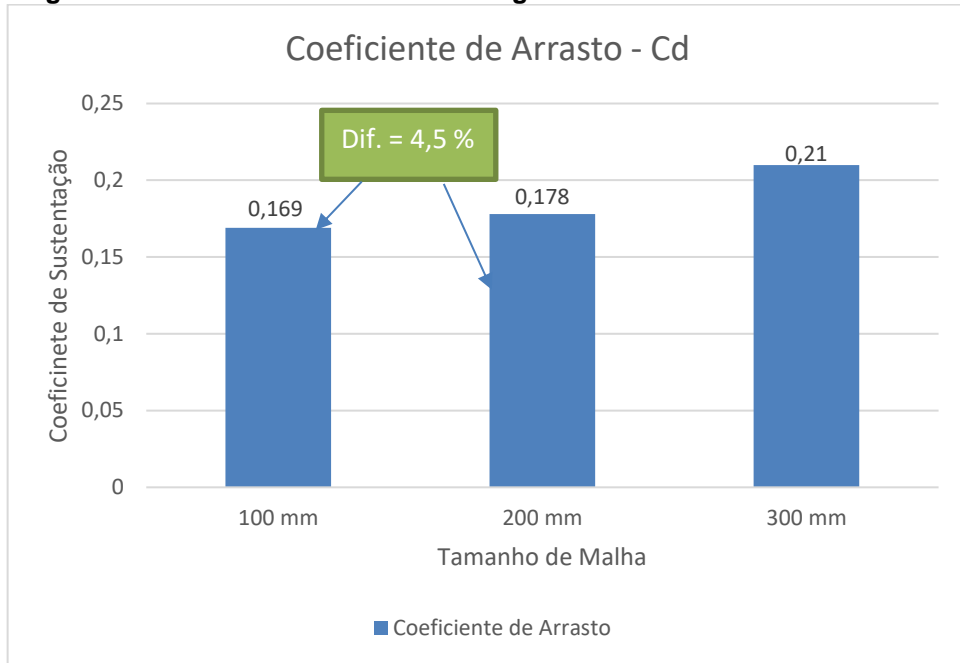
**Figura 18 - Influência na malha no design 1 sobre o coeficiente de sustentação**



Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

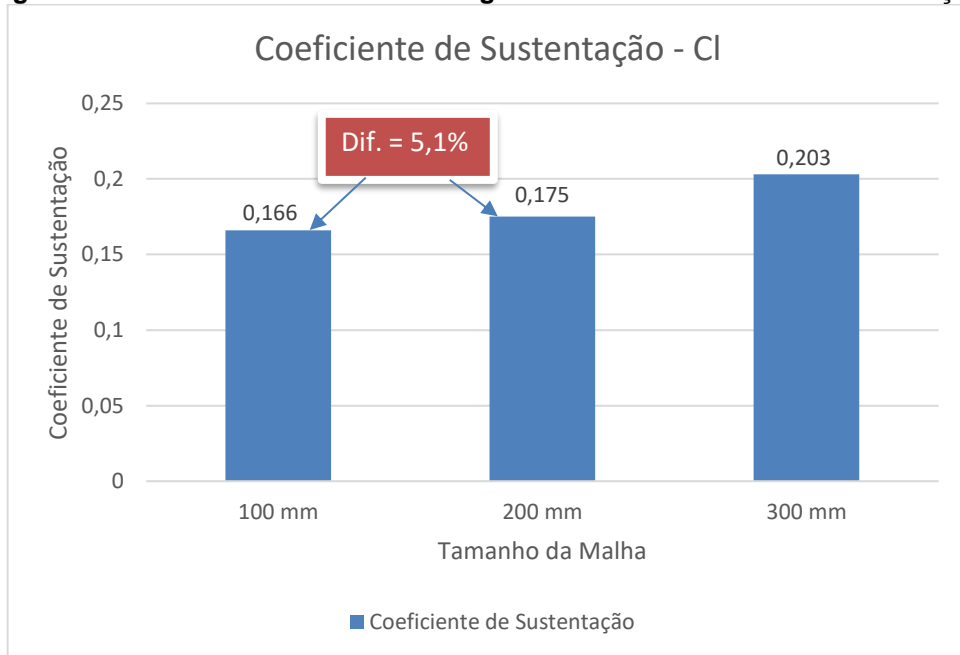


**Figura 19 - Influência na malha no design 2 sobre o coeficiente de arrasto**



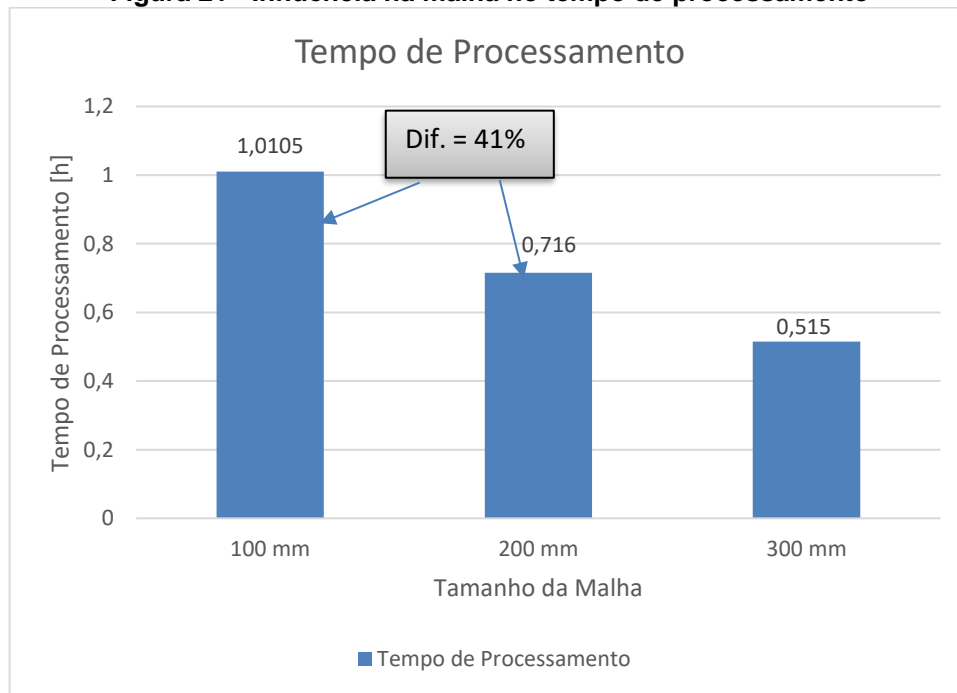
Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

**Figura 20 - Influência na malha no design 2 sobre o coeficiente de sustentação**



Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

**Figura 21 - Influência na malha no tempo de processamento**



**Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.**

Como pode perceber nos gráficos, a diferença de resultados para os coeficientes aerodinâmicos é efetiva para malha maiores, contudo para malhas menores essa diferença decresce significativamente, na figura 17, existe uma diferença de 5,2% no coeficiente de arrasto entre as malhas com elementos de tamanho 100 e 200 mm, no entanto, com relação ao tempo de processamento, a malha mais fina apresenta 41% a mais no tempo da malha de 200 mm. Todas as simulações foram realizadas para os modelos originais, sem alteração no ângulo de convergência traseira.

Uma vez que este trabalho visa obter não apenas a precisão dos resultados, mas como também o tempo de resposta, a malha mais indicada para a obtenção das análises é a de 200 mm de tamanho de elemento.

## 4.2 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE CONVERGÊNCIA TRASEIRA SOBRE O ARRASTO

Após analisado a influência da malha sobre os coeficientes aerodinâmicos, e determinado a melhor malha para processamento das simulações, a concepção deste trabalho se volta na redução do arrasto. Como já mencionado, o objetivo deste trabalho é comprovar a ideia de que a alteração na geometria, região traseira e frontal, reduz o arrasto aerodinâmico.

A partir disso, com a verificação das simulações sobre as variações dos ângulos de convergência traseira, os resultados obtidos são expressos a seguir:

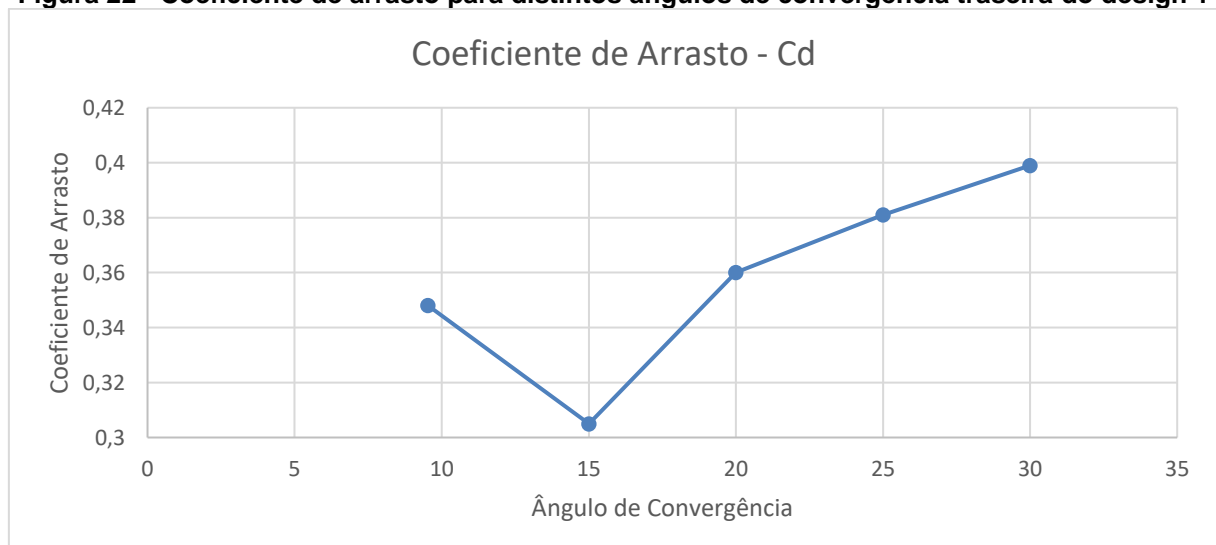
- Design 1:

**Tabela 4 - Resultados dos Coeficientes Aerodinâmicos para o Design 1 com a alteração no ângulo de convergência traseira.**

	Ângulo de Convergência[°]	Coef. Sustentação	Sustentação[N]	Coef. Arrasto	Arrasto[N]
<b>Original</b>	9,53	0,094	5,368293	0,348	19,874106
<b>Modificação 1</b>	15	0,169	9,6515055	0,305	18,5605875
<b>Modificação 2</b>	20	0,234	13,363623	0,36	20,55942
<b>Modificação 3</b>	25	0,325	18,5605875	0,381	21,7587195
<b>Modificação 4</b>	30	0,449	25,6421655	0,399	22,7866905

Através dos coeficientes de arrasto obtidos pela tabela 4, é possível plotar o seguinte gráfico:

**Figura 22 - Coeficiente de arrasto para distintos ângulos de convergência traseira do design 1**



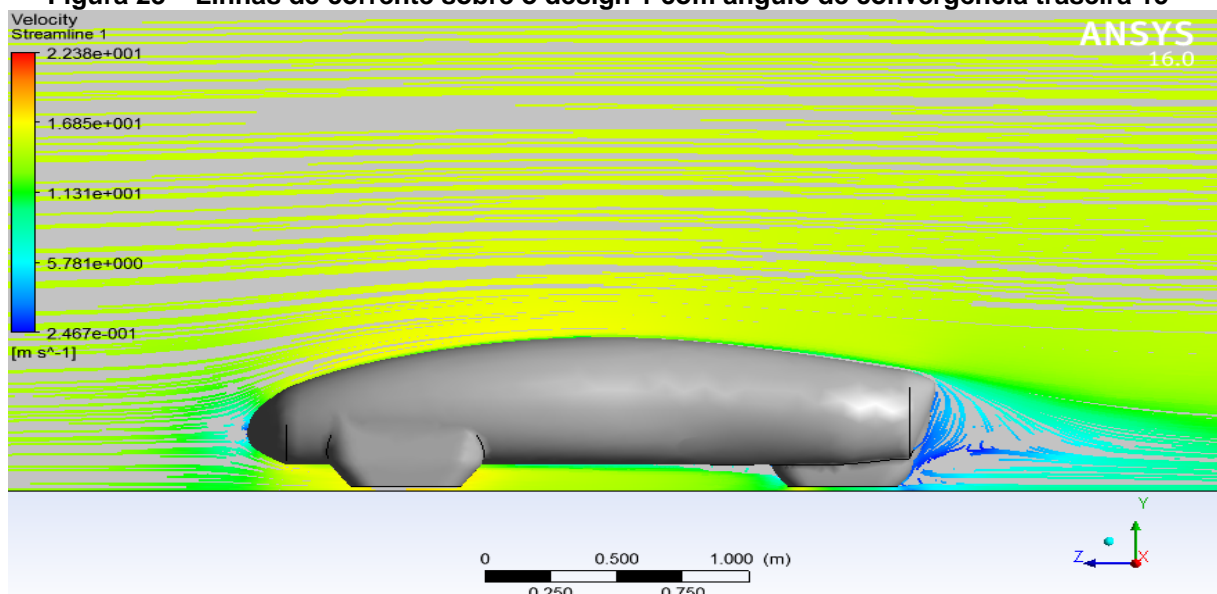
Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

Analisando a figura 22, pode-se notar que o arrasto apresentou uma redução com a adição do ângulo de convergência traseira, como explicitado na teoria, onde tal apresenta valores satisfatórios para ângulos entre 10 e 15°. Dentre os casos analisados, o arrasto apresenta valor mínimo em 15°, e volta a aumentar para ângulos maiores, e para valores próximos a 30° apresenta uma declinação no aumento do arrasto, contudo para comprovar a teoria evidenciada por Hucho (1995), onde afirmou a existência de uma descontinuidade entre valores de 27 a 32° necessitaria analisar uma parcela maior de casos. Em comparação ao modelo já desenvolvido pela Equipe Pato a Jato, observa-se pelo gráfico uma redução de 12,35% no arrasto com a alteração do ângulo de convergência traseira, evidenciando o fato do arrasto ser influenciado grandemente pela geometria traseira.

Uma vez que anteriormente já foi constatado uma redução no arrasto para valores entre 10 e 15° sobre a angulação de convergência traseira em trabalhos anteriores, sendo assim este estudo sobre esse design corrobora para que estes resultados possam ser difusos para uma gama maior de modelos automotivas.

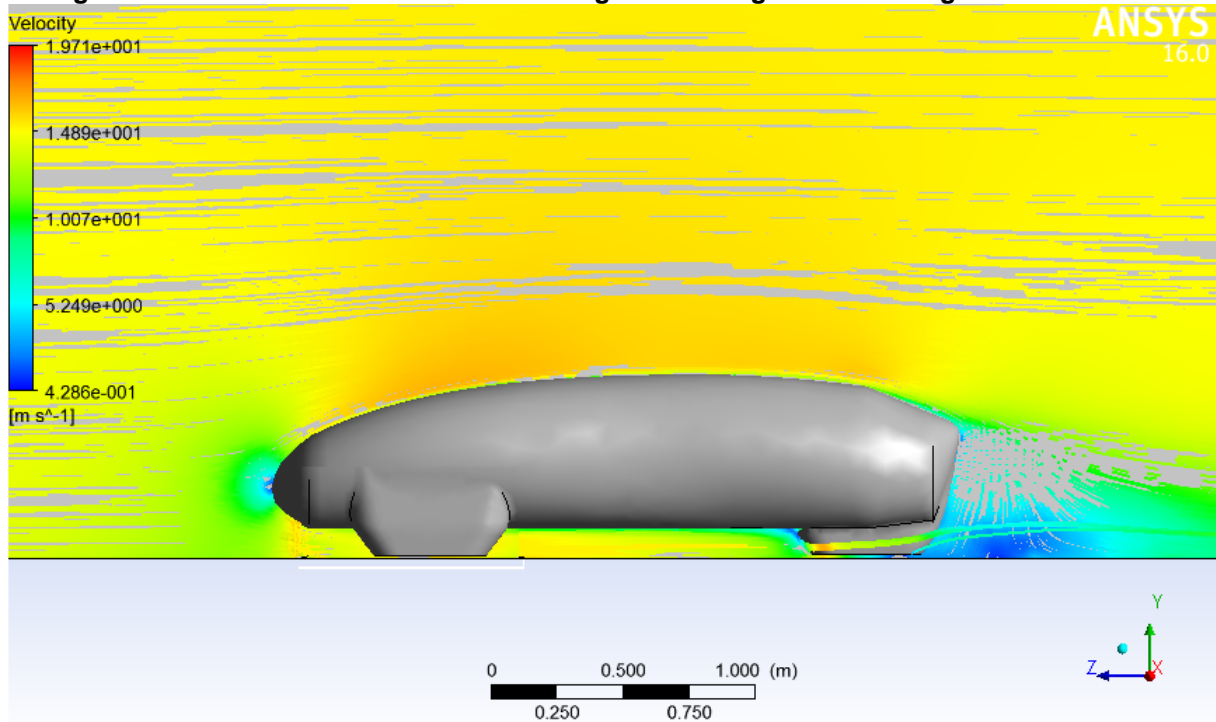
Com o intuito de validar o motivo da redução do arrasto quando apresentado o protótipo com um ângulo de convergência traseira de 15°, e também a razão de aumentar o arrasto para valores superiores desses ângulos, foram analisados os vetores de velocidade e os vórtices formado na traseira dos designs, afim de observar as regiões onde consta a menor quantidade de movimento sobre a superfície, tais expressos nas figuras 23 e 24.

**Figura 23 – Linhas de corrente sobre o design 1 com ângulo de convergência traseira 15°**



Fonte: ANSYS® v16.0.

**Figura 24 - Linhas de corrente sobre o design 1 com ângulo de convergência traseira 30°**

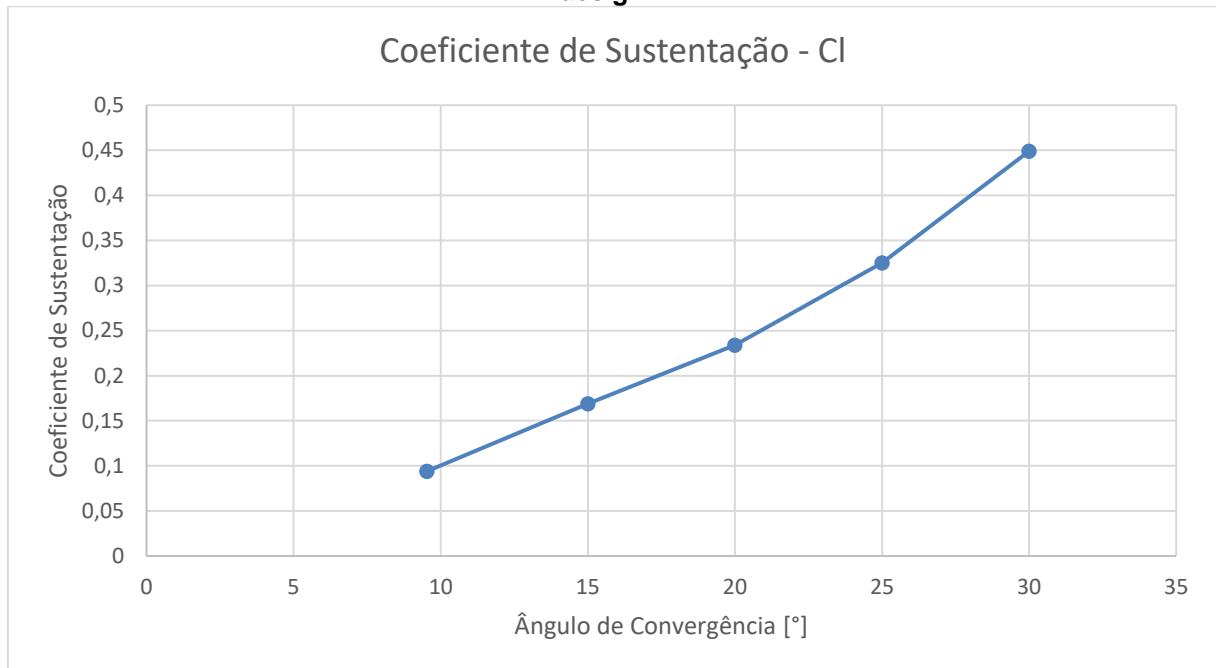


**Fonte: ANSYS® v16.0.**

De acordo com as figuras 23 e 24, estão apresentadas as linhas de correntes de velocidade geradas por um streamline em volta das superfícies dos protótipos, que escoam sobre a superfície frontal em direção a região traseira. No design com um ângulo de convergência de 15°, figura 23, nota-se um escoamento mais estável e um desacoplamento sobre a traseira do protótipo mais suave e uniforme, isto auxilia para o fato do arrasto apresentar valores menores para essa angulação. Já na figura 24, é possível observar que com um ângulo maior sobre a convergência traseira, a diferença de velocidade que escoam sobre a superfície se tornou maior, desta maneira intensificando os vórtices formado, e conseqüentemente aumentando o coeficiente de arrasto sobre tal design.

Afim de averiguar se a alteração do ângulo de convergência traseira poderia influenciar em outras variáveis que atuam com a aerodinâmica veicular, não apenas para com o arrasto, foi realizada análises sobre a sustentação e o centro de pressão, demonstrados através de gráficos nas figuras 25 e 28.

**Figura 25 - Coeficiente de Sustentação para distintos ângulos de convergência traseira do design 1**

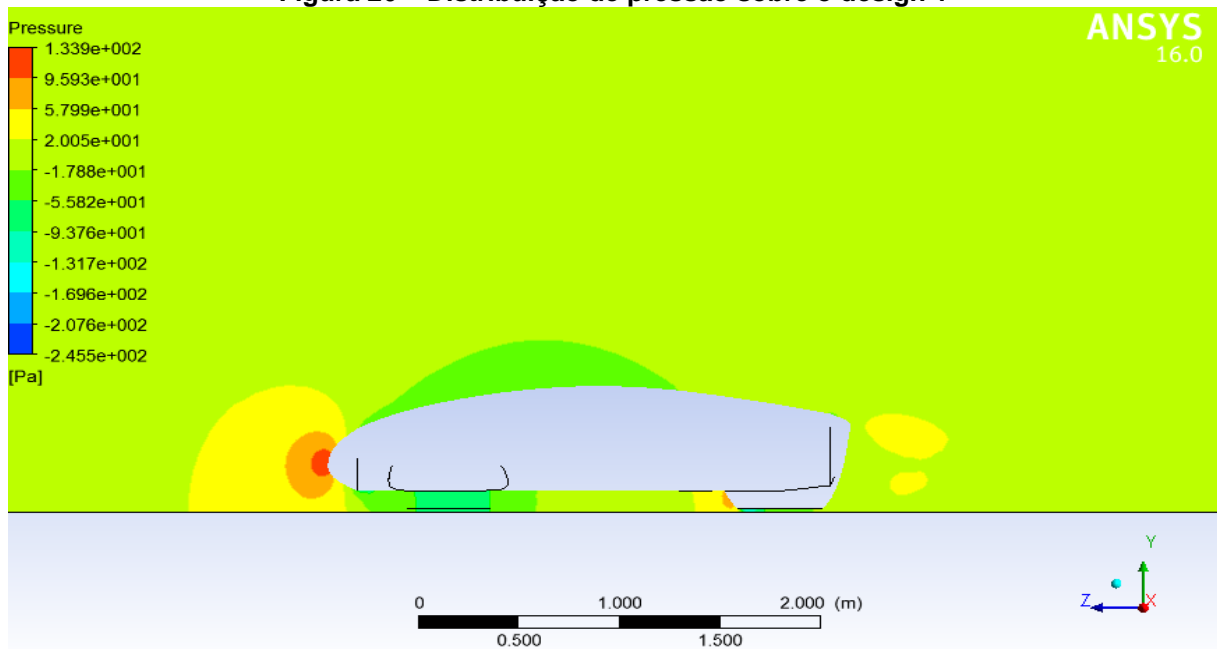


**Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.**

De acordo com a figura 25, verifica-se que a sustentação aumenta quando ângulos de convergência traseira apresenta valores maiores. E constata-se uma disparidade de 79,06% no coeficiente de sustentação se comparado o modelo inicial com o modelo com 30° de ângulo de convergência.

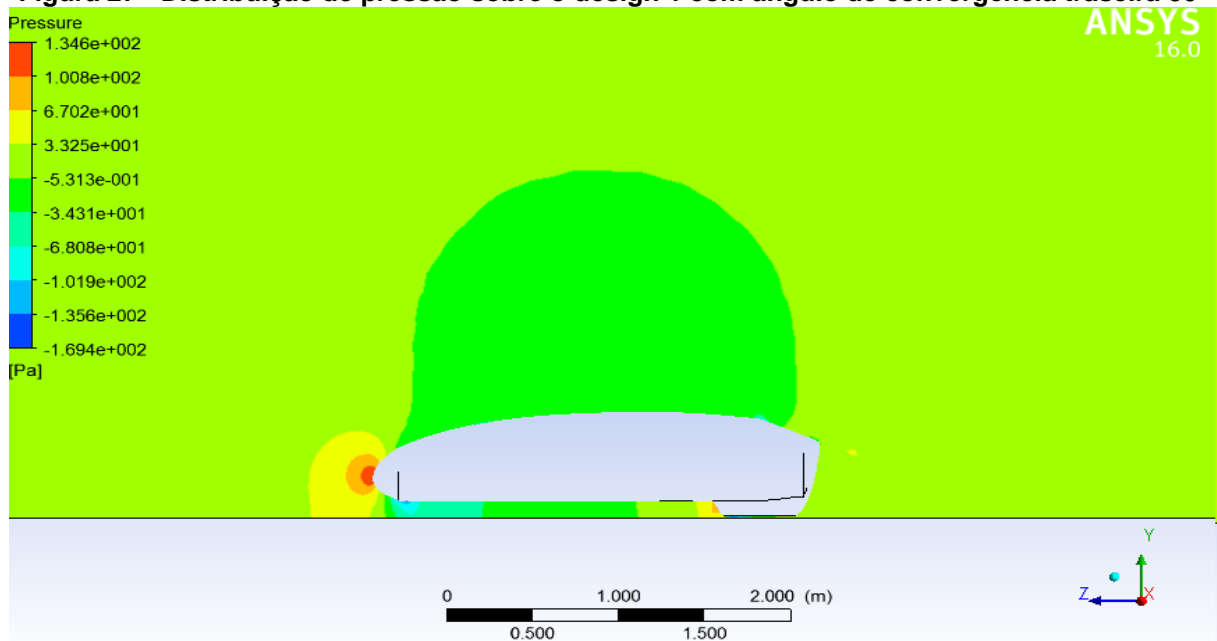
Afim de averiguar esse aumento na sustentação, a transição sobre os pontos pressão na região traseira superior do design 1 está demonstrada nas figuras 26 e 27, onde está representada a distribuição de pressão ocasionada sobre o plano de simetria do protótipo, para o modelo original e para o modelo com ângulo de convergência traseira de 30°, cujo tal apresentou valor máximo para com a sustentação.

**Figura 26 – Distribuição de pressão sobre o design 1**



Fonte: ANSYS® v16.0.

**Figura 27 - Distribuição de pressão sobre o design 1 com ângulo de convergência traseira 30°**

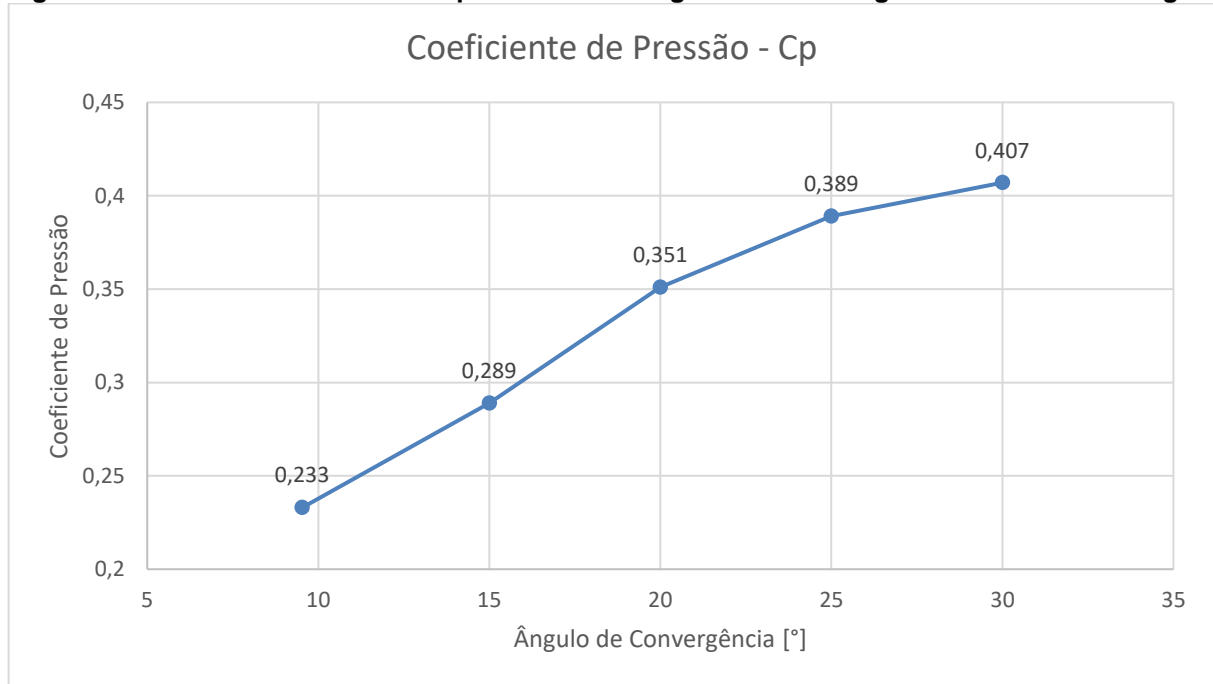


Fonte: ANSYS® v16.0.

Com a distribuição de pressão exposta, é possível notar que o aumento da sustentação é suscetível com o aumento do ângulo de convergência traseira, pelo fato de que a força normal aplicada sobre a superfície do protótipo com angulação maior é significadamente superior, e para ratificar isso, no gráfico da figura 28 do centro de pressão exposto a seguir, nota-se que com um aumento do ângulo promove um

deslocamento do centro de pressão em rumo a região traseira do design. Isto também ocasiona instabilidade no protótipo, variável que não será analisada neste trabalho, o que fica como recomendação para futuros trabalhos a análise sobre a estabilidade veicular dos protótipos.

**Figura 28 – Coeficiente de Pressão para distintos ângulos de convergência traseira do design 1**



Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

Observou-se para o Design 1, que para ângulos acima de 15°, tanto o coeficiente de arrasto como o coeficiente de sustentação apresentam um aumento, com isso é conclusivo que tais valores de ângulo não estabelecem melhorias para com a aerodinâmica veicular.

- Design 2:

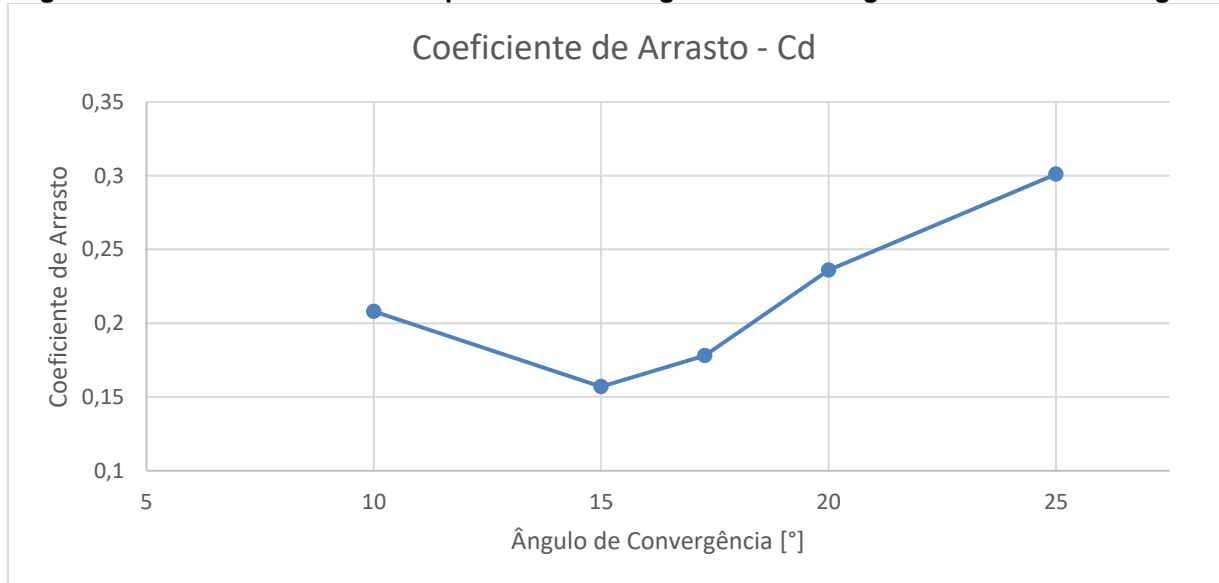
**Tabela 5 Resultados dos Coeficientes Aerodinâmicos para o Design 2 com a alteração no ângulo de convergência traseira**

	Ângulo de Convergência[°]	Coef. Sustentação	Sustentação[N]	Coef. Arrasto	Arrasto[N]
<b>Modificação 1</b>	10	0,153	5,993921784	0,208	8,1485996
<b>Modificação 2</b>	15	0,162	6,346505419	0,157	6,1506256
<b>Original</b>	17,28	0,175	6,855792891	0,228	8,9321187
<b>Modificação 3</b>	20	0,198	7,756839956	0,279	10,930093
<b>Modificação 4</b>	25	0,245	9,598110047	0,301	11,791964



Através dos coeficientes de arrasto obtidos pela tabela 5, é possível plotar o seguinte gráfico:

**Figura 29 - Coeficiente de arrasto para distintos ângulos de convergência traseira do Design 2**



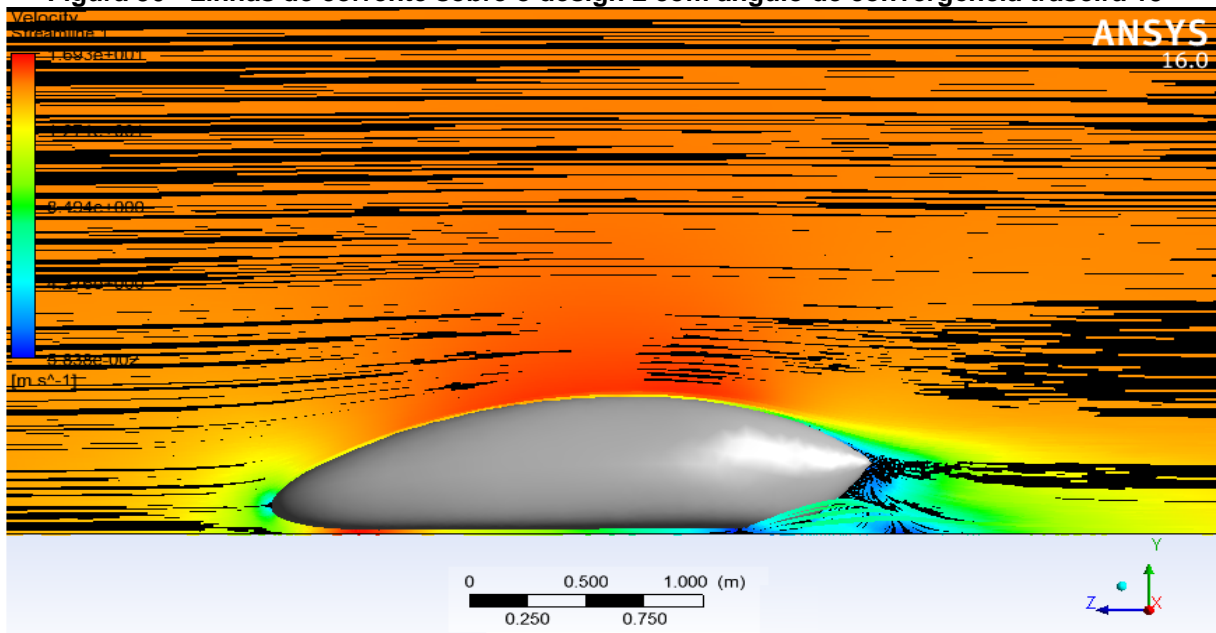
**Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.**

Uma vez que o design 2 apresenta um ângulo de convergência traseira de  $17,28^\circ$ , tal sendo maior que o considerado ângulo ideal, foi proposto a análise para ângulos menores e maiores.

Assim como o design 1, os valores mínimos encontrados para os coeficientes de arrasto sobre o design 2 foram próximos a  $15^\circ$ , este apresentando o menor resultado. Onde esses tais ângulos apresentam valor menor que o encontrado para o modelo original, que por sua vez demonstrou um coeficiente de arrasto 7,4% superior ao encontrado para o modelo com um ângulo de  $15^\circ$  para a convergência traseira.

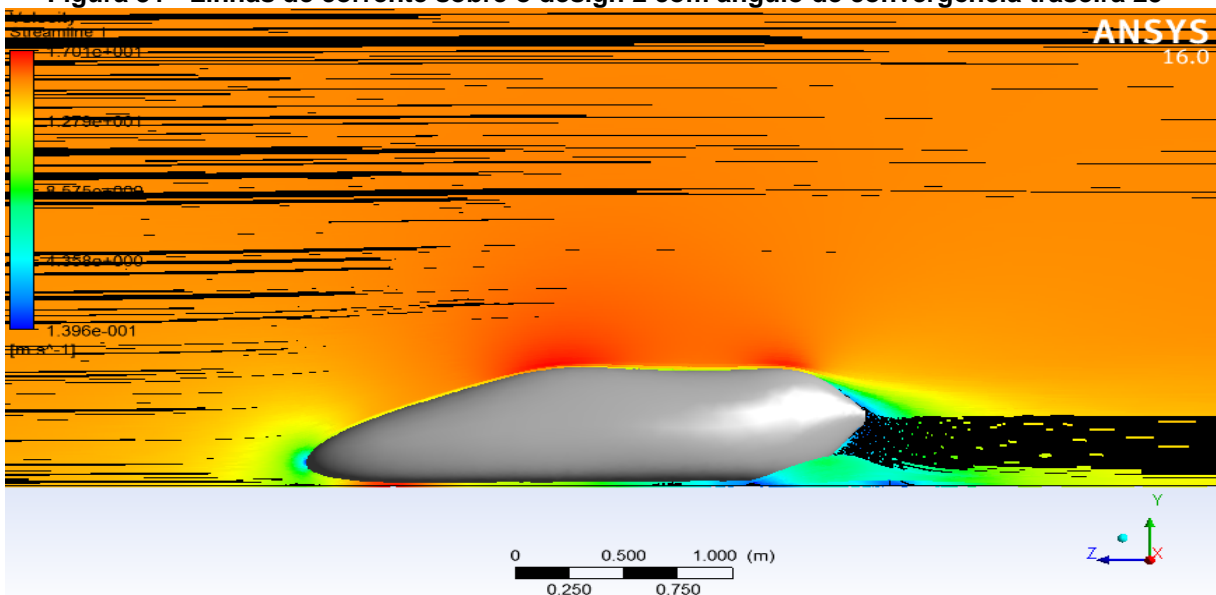
Para comprovar os resultados encontrados para o coeficiente de arrasto, as figuras 29 e 30, exemplificam os vetores de velocidades e os vórtices formados na região traseira dos protótipos, afim de descobrir as regiões que apresentam menor quantidade de movimento. A figura 30 remete-se ao protótipo com ângulo de convergência traseira igual a  $15^\circ$ , e a figura 31 demonstra os efeitos sobre o protótipo que sofreu maior influência sobre o arrasto, o design com ângulo de convergência traseira equivalente a  $25^\circ$ .

Figura 30 - Linhas de corrente sobre o design 2 com ângulo de convergência traseira 15°



Fonte: ANSYS® v16.0.

Figura 31 - Linhas de corrente sobre o design 2 com ângulo de convergência traseira 25°



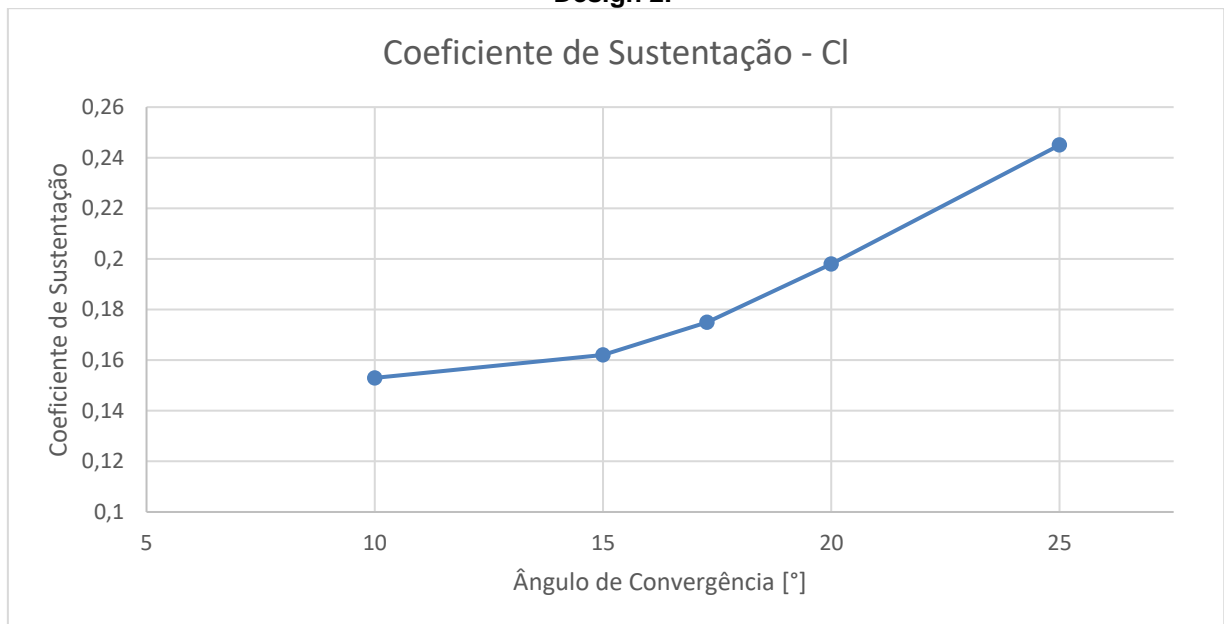
Fonte: ANSYS® v16.0.

Uma vez que o arrasto de pressão é proveniente da perda da quantidade de movimento, provindo do deslocamento do escoamento sobre a região traseira, local com tendência a ocorrer o desprendimento de pares de vórtices contra rotativos, ou seja, quando o fluxo desacopla da superfície e a camada limite é dispersada. Para o design 2, nota-se que tanto para o modelo com um ângulo de 10° como o de 25° apresentam uma recirculação com vórtices contra rotativos, sendo que este último

modelo manifesta uma recirculação mais intensa se comparado com o primeiro modelo, e assim sendo uma evidencia para o maior coeficiente de arrasto encontrado por este último modelo. Além disso, com essa intensidade maior dos vórtices ocasiona sobre o sistema uma maior diferença de velocidades sobre a superfície, sendo esta uma justificativa para o modelo com menor ângulo de convergência traseira demonstrar menor arrasto, apresentando um escoamento mais uniforme e suave.

Com relação a análise da sustentação sobre o design 2, a figura 32 revela a variação do coeficiente de sustentação com a variação do ângulo de convergência traseira superior.

**Figura 32 – Coeficiente de Sustentação para distintos ângulos de convergência traseira do Design 2.**

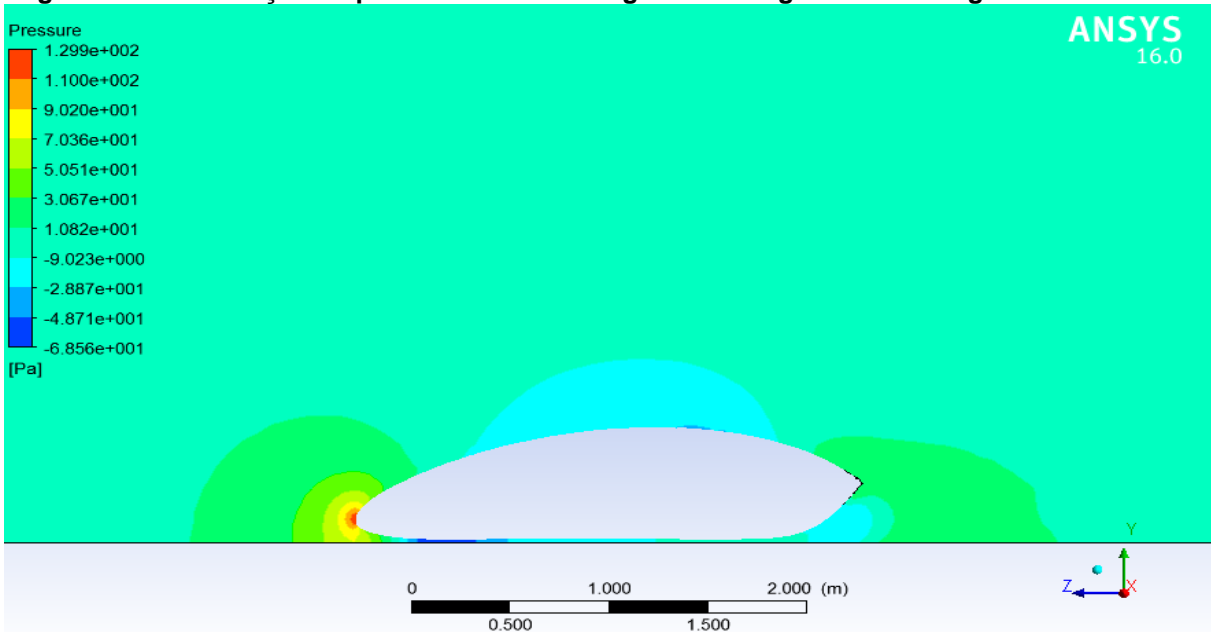


**Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.**

Observando a figura 32, percebe-se o aumento da sustentação quando solicitado para um crescente ângulo de convergência traseira, e apresenta uma discrepância de 37,55% no coeficiente de sustentação ao comparar o modelo com ângulo de convergência 10° com o modelo de 25°.

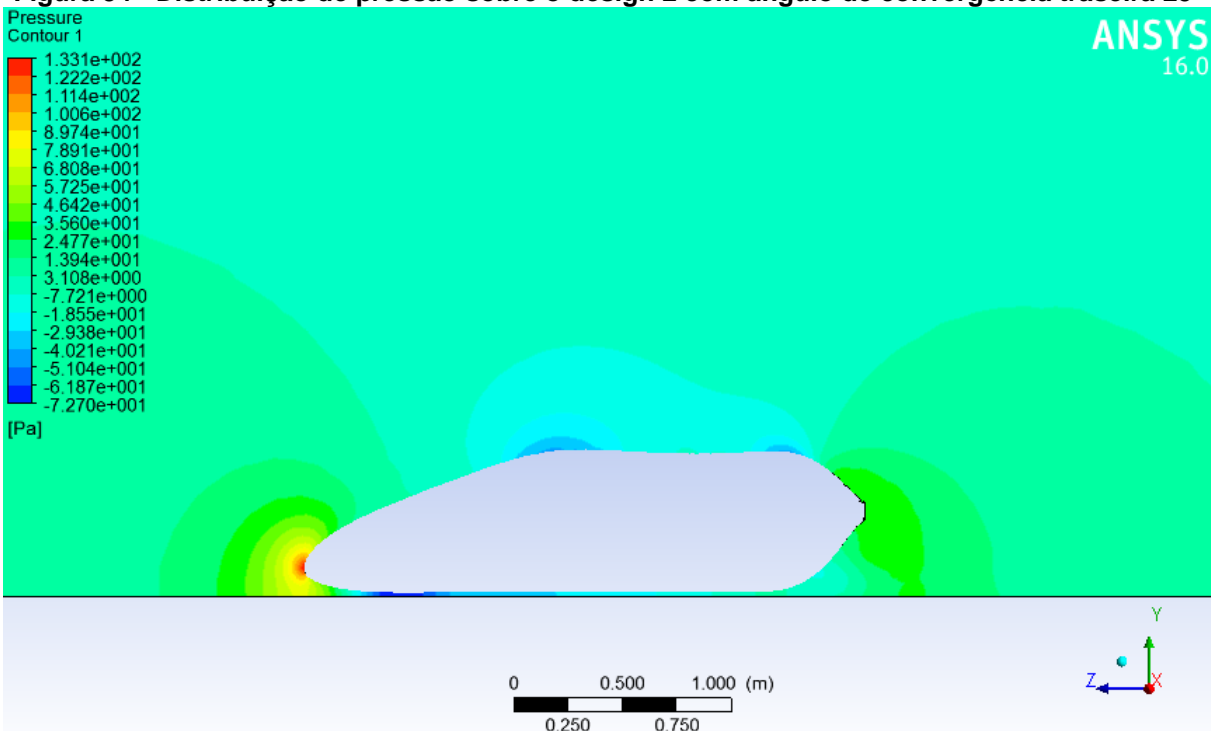
Para auxiliar na comprovação desse aumento da sustentação, uma análise sobre a distribuição de pressão do design 2 está representada nas figuras 33 e 34, como também a análise sobre o centro de pressão, explicitado pela figura 35.

Figura 33 - Distribuição de pressão sobre o design 2 com ângulo de convergência traseira 10°



Fonte: ANSYS® v16.0.

Figura 34 - Distribuição de pressão sobre o design 2 com ângulo de convergência traseira 25°

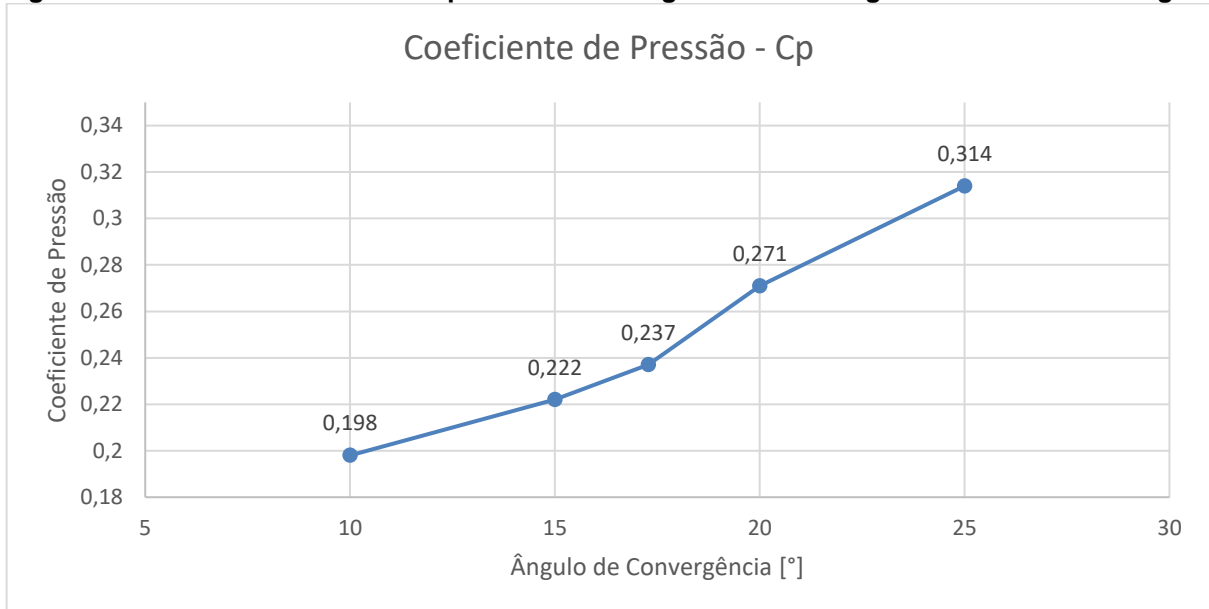


Fonte: ANSYS® v16.0.

Ao analisar a distribuição de pressão sobre o modelo com 25° de ângulo de convergência traseira, nota-se que condições de sucção com pressões negativas estão mais evidências, e encontradas predominantemente sobre as regiões onde o protótipo sofre brusca variação da angulação, tais condições responsáveis por

prejudicar o deslocamento do veículo, e além disso nota-se que esse modelo apresenta uma distribuição de pressão mais elevada se comparado com o modelo com 10° de ângulo de convergência, demonstrando a ocorrência de uma força normal aplicada maior, e com isso levando ao aumento da sustentação no protótipo.

**Figura 35 - Coeficiente de Pressão para distintos ângulos de convergência traseira do Design 2**



**Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.**

Similarmente ao design 1, o gráfico do coeficiente de pressão, demonstra que com um aumento do ângulo de convergência ocorre um deslocamento do centro de pressão em direção a região traseira, o que demonstra ainda mais a influência da região traseira sobre os coeficientes aerodinâmicos, e esse aumento está relacionado com a queda da estabilidade veicular.

#### 4.3 INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO FRONTAL SOBRE O ARRASTO

Uma vez analisado a influência do ângulo de convergência traseira sobre o arrasto, é pertinente realizar um estudo a fundo de outra variável capaz de promover uma melhoria nos aspectos aerodinâmicos, para então a partir dos resultados propor uma melhor geometria para os protótipos de eficiência energética da Equipe Pato a Jato.

A variável em questão no momento trata-se da inclinação frontal dos modelos, cujo tal está localizada na região de maior impacto entre o escoamento e os protótipos, que é caracterizado por apresentar um grande gradiente de pressão, sendo o local onde ocorre a penetração do escoamento sobre a superfície, e tornando-se a magnitude dessa variável, a responsável pelas características que o escoamento vai apresentar sobre os protótipos.

A partir disso, com a verificação das simulações sobre as variações da inclinação frontal, os resultados obtidos para cada design são expressos a seguir:

- Design 1:

**Tabela 6 - Resultados dos Coeficientes Aerodinâmicos para o Design 1 com a alteração na inclinação frontal**

	Inclinação Frontal [°]	Coef. de Sustentação	Sustentação [N]	Coef. de Arrasto	Arrasto [N]
<b>Modificação 1</b>	10	0,052	2,969694	0,309	17,6468355
<b>Modificação 2</b>	15	0,07	3,997665	0,333	19,0174635
<b>Original</b>	18,43	0,094	5,368293	0,348	19,874106
<b>Modificação 3</b>	25	0,118	6,738921	0,412	23,529114
<b>Modificação 4</b>	30	0,137	7,8240015	0,476	27,184122

Com a obtenção de tais valores é possível plotar um gráfico em função do coeficiente de arrasto pela variação da inclinação frontal, demonstrado na figura a seguir.

**Figura 36 - Coeficiente de arrasto para distintos ângulos da inclinação frontal do design 1**



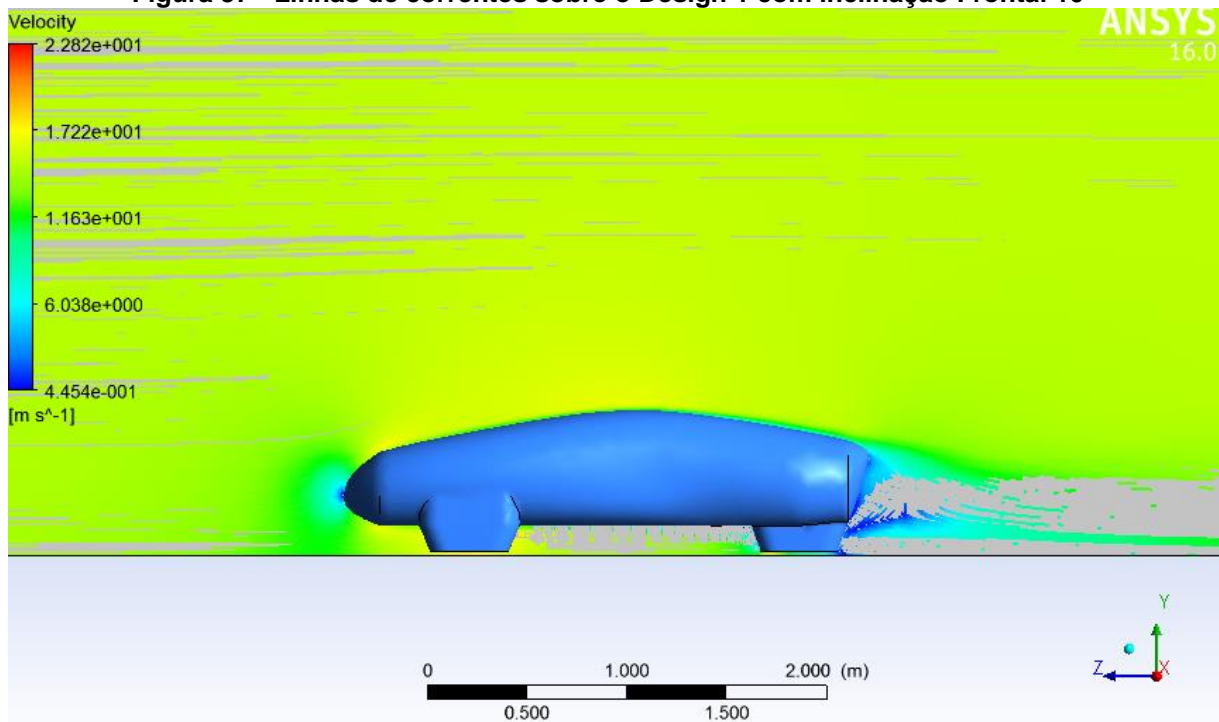
Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

Ao observar o gráfico da figura 36, nota-se que o design 1 apresentou coeficiente de arrasto menor para valores inferiores de inclinação frontal, demonstrando uma variação de 11,20% quando o modelo apresenta inclinação igual a 10°, e mostrou uma variação de 26,89% para o modelo com inclinação frontal de 30°.

Por causa de uma proximidade com o solo, o ar tende a fluir por cima do veículo melhor que por baixo dele, com isso as linhas de corrente de velocidade próximas da região frontal são direcionadas para cima, portanto o escoamento é defletido aos pontos de intersecção entre a região frontal e as laterais do protótipo.

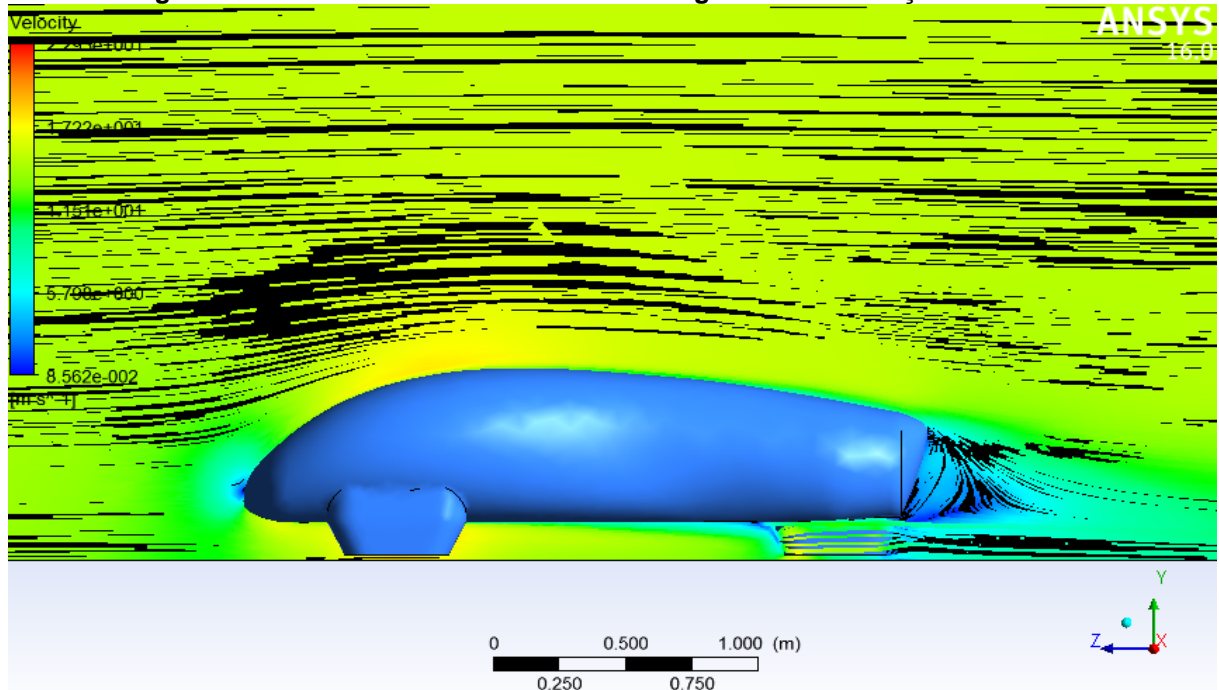
E a fim de demonstrar o motivo da redução do arrasto para valores de inclinação frontal menor que o modelo original, foram analisados a quantidade de movimento sobre as superfícies, para os modelos com inclinação frontal de 10° e 30°, demonstrados respectivamente pelas figuras 37 e 38 a seguir.

**Figura 37 - Linhas de correntes sobre o Design 1 com inclinação Frontal 10°**



**Fonte: ANSYS® v16.0.**

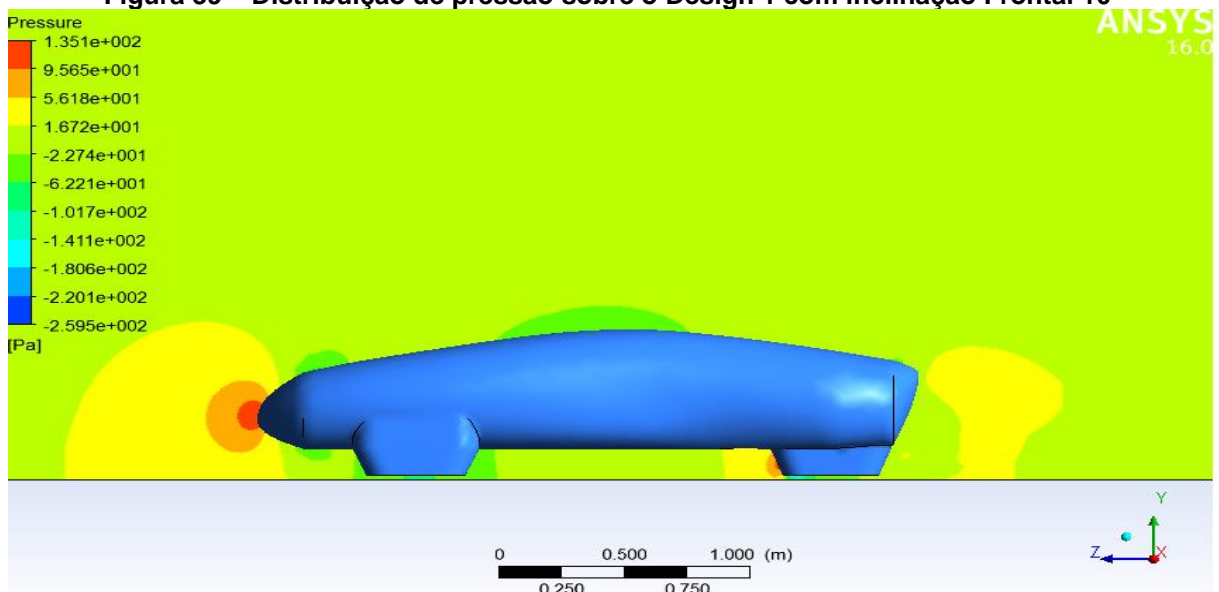
Figura 38 - Linhas de correntes sobre o Design 1 com inclinação Frontal 30°



Fonte: ANSYS® v16.0.

Percebe-se que com uma inclinação frontal maior, o escoamento torna-se mais difícil para reproduzir um movimento mais harmônico sobre a superfície, e apresenta um gradiente de velocidade superior ao modelo com inclinação menor no momento de colisão do escoamento com o protótipo. Contudo tais informações não são suficientes para reafirmar a redução do arrasto sobre inclinações menores, a partir disso uma análise de pressão está exemplificada nas figuras 39 e 40.

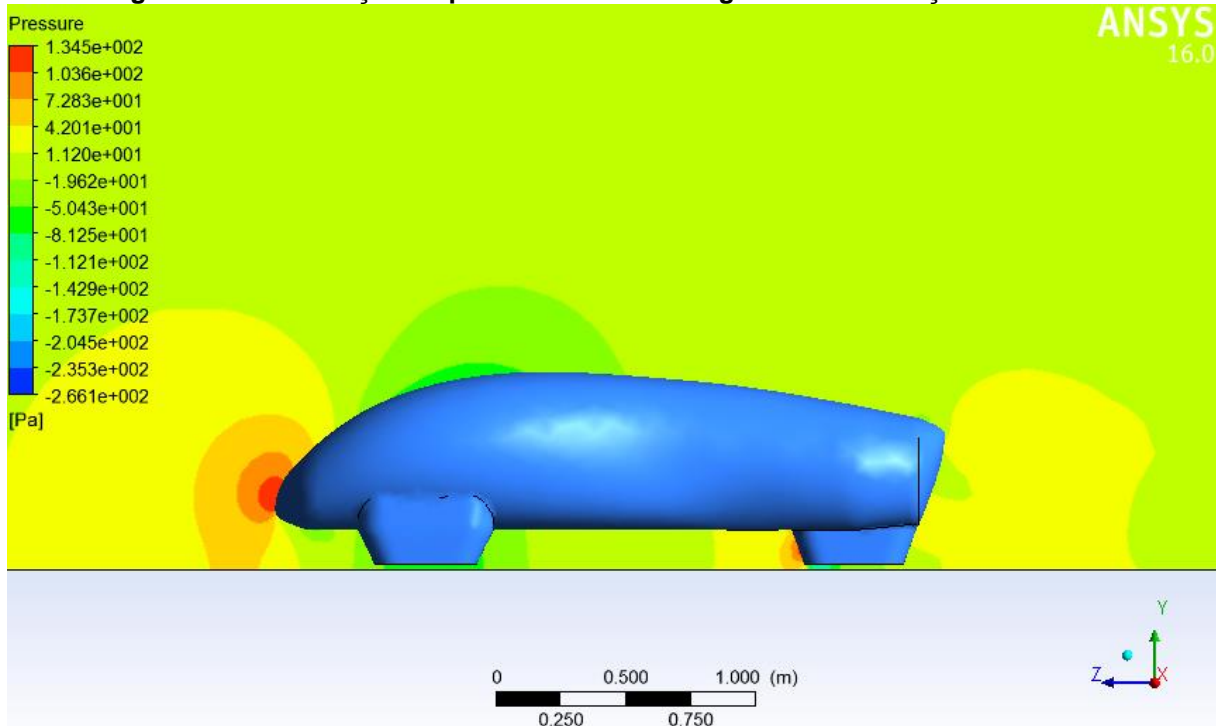
Figura 39 – Distribuição de pressão sobre o Design 1 com inclinação Frontal 10°



Fonte: ANSYS® v16.0.



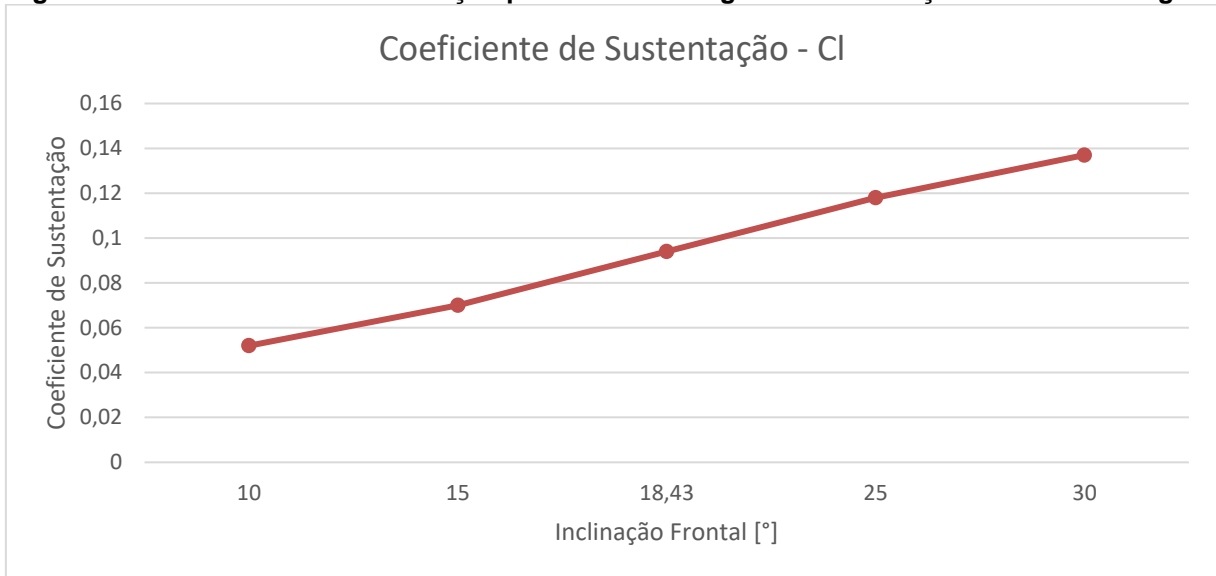
**Figura 40 - Distribuição de pressão sobre o Design 1 com inclinação Frontal 30°**



**Fonte: ANSYS® v16.0.**

Para modelos com ângulo de inclinação menor, a distribuição de pressão na superfície frontal apresenta forças que atuam alinhadas com o eixo de simetria longitudinal, sendo a direção da força de arrasto, e com a modificação na superfície frontal do modelo, implica no aparecimento de superfícies inclinadas, com relação ao plano de simetria vertical, o que ocasiona num aumento do arrasto. Além disso, a distribuição de pressão é causada pelo escoamento de esteira próximo a superfície do modelo, com isso devido a elevada inclinação frontal, o protótipo condiciona uma maior dificuldade para projetar o escoamento, assim atrapalhando com o deslocamento na junção entre a parte frontal e traseira do modelo.

É apresentado a seguir o gráfico do coeficiente de sustentação sobre a influência da inclinação frontal.

**Figura 41 - Coeficiente de Sustentação para distintos ângulos da inclinação frontal do design 1**

Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

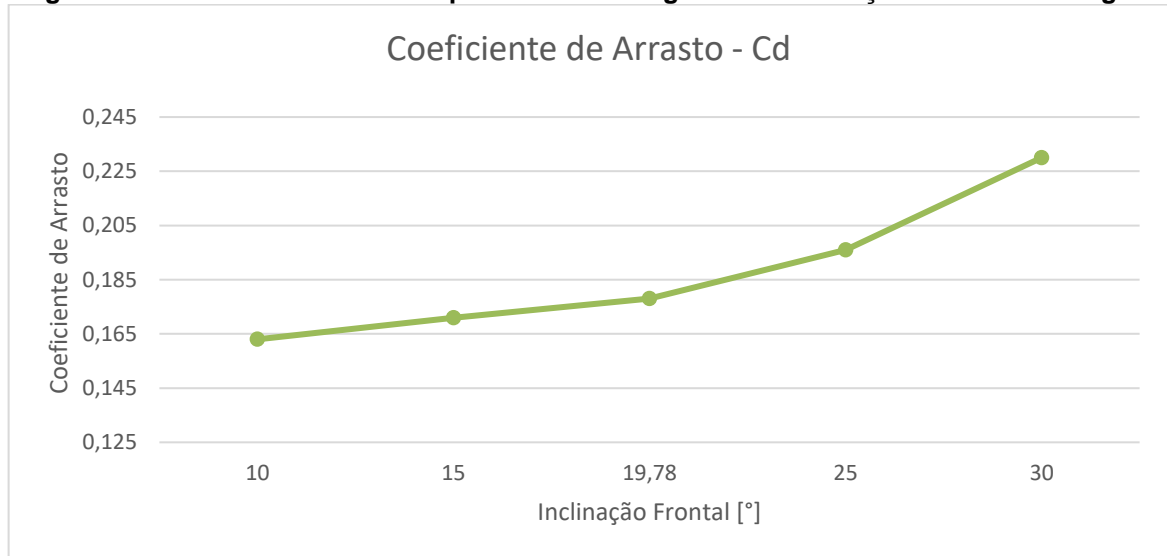
Onde que para o design 1, com a modificação da inclinação frontal o modelo demonstrou uma variação de aproximadamente 31% no coeficiente de sustentação. Que por sua vez, apresentou um crescimento quase linear, exemplificado na figura 41.

- Design 2:

**Tabela 7 - Resultados dos Coeficientes Aerodinâmicos para o Design 2 com a alteração na inclinação frontal.**

	Inclinação Frontal [°]	Coef. Sustentação	Sustentação[N]	Coef. Arrasto	Arrasto[N]
<b>Modificação 1</b>	12	0,151	5,915569866	0,163	6,385681378
<b>Modificação 2</b>	15	0,164	6,424857338	0,171	6,699089053
<b>Original</b>	19,78	0,175	6,855792891	0,178	6,973320769
<b>Modificação 3</b>	25	0,197	7,717663997	0,196	7,678488038
<b>Modificação 4</b>	30	0,221	8,657887022	0,23	9,010470656

A partir dos resultados obtidos, a figura 42, apresenta o gráfico do coeficiente de arrasto sobre a influência da variação da inclinação frontal.

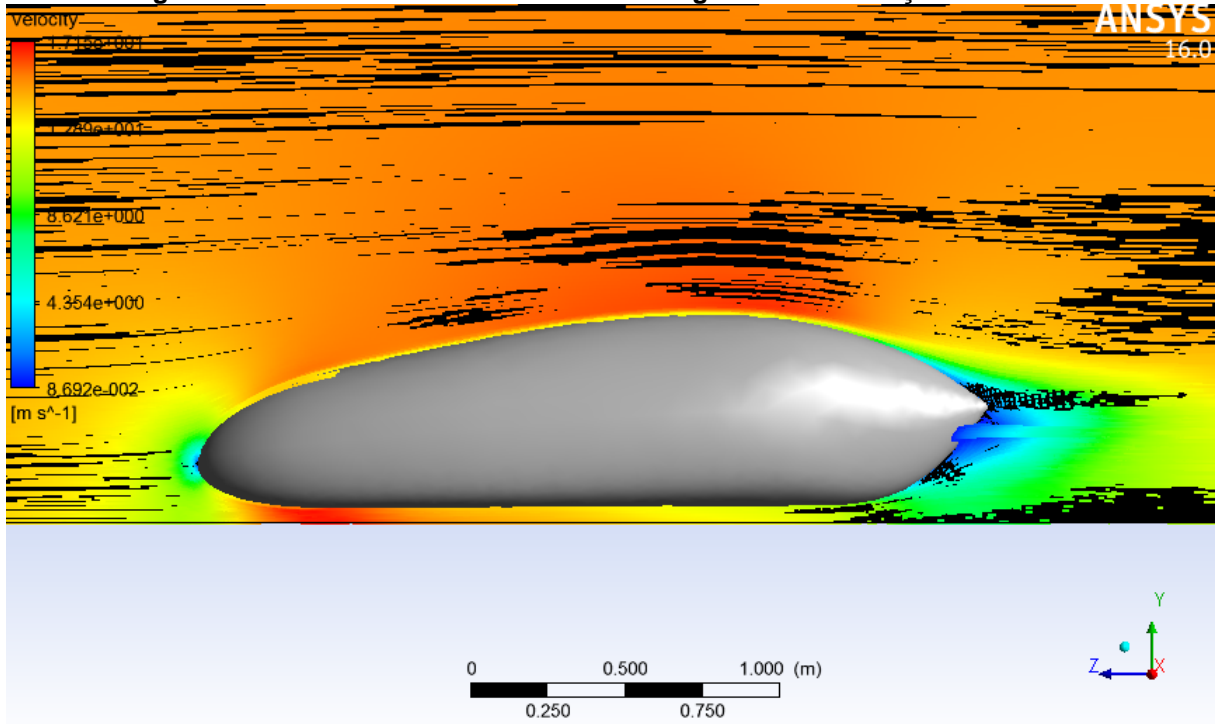
**Figura 42 - Coeficiente de arrasto para distintos ângulos da inclinação frontal do design 2**

**Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.**

Percebe-se pela figura 42, que o coeficiente de arrasto aumenta quando apresenta uma inclinação frontal maior, sendo de 22,60% a variação de seu valor para uma inclinação de 30°, e variando em 8,42% com relação ao modelo com uma inclinação de 10°.

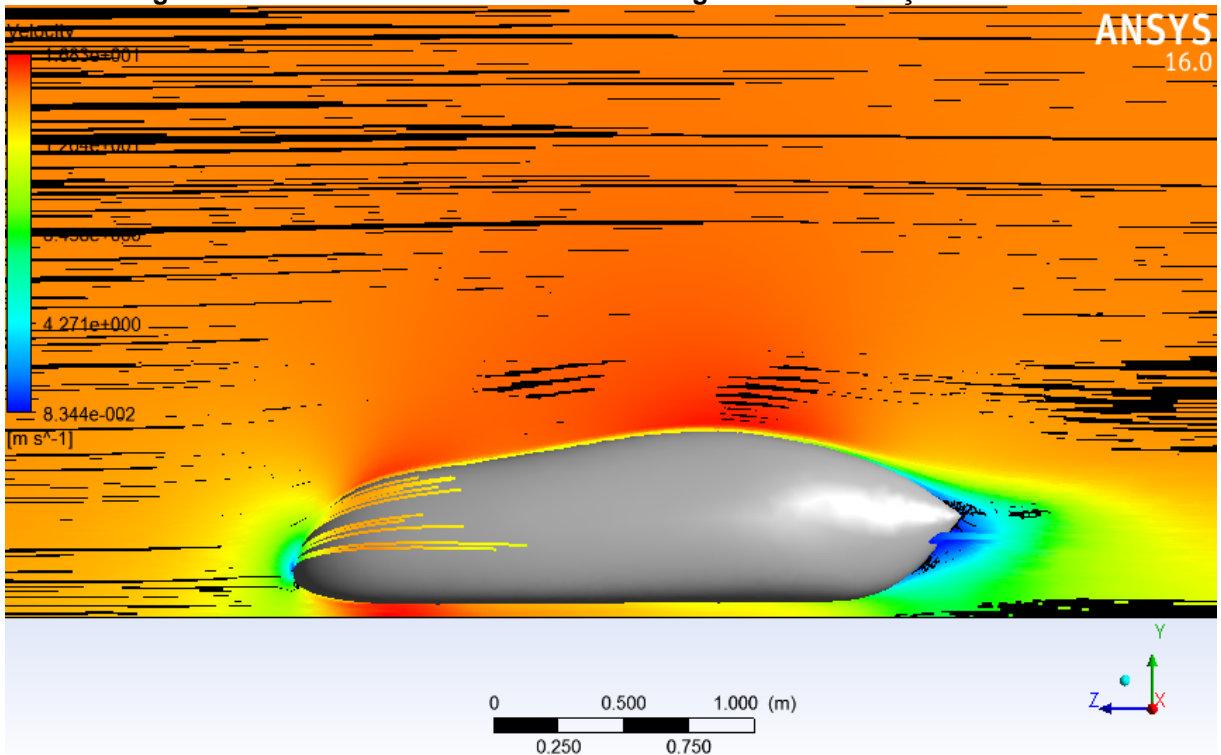
Visando comprovar a redução de arrasto para uma inclinação frontal menor, as figuras 43 e 44 demonstram as linhas de corrente de velocidade, mostrando a quantidade de movimento gerada em volta da superfície do protótipo.

Figura 43 - Linhas de correntes sobre o Design 2 com inclinação Frontal 10°



Fonte: ANSYS® v16.0.

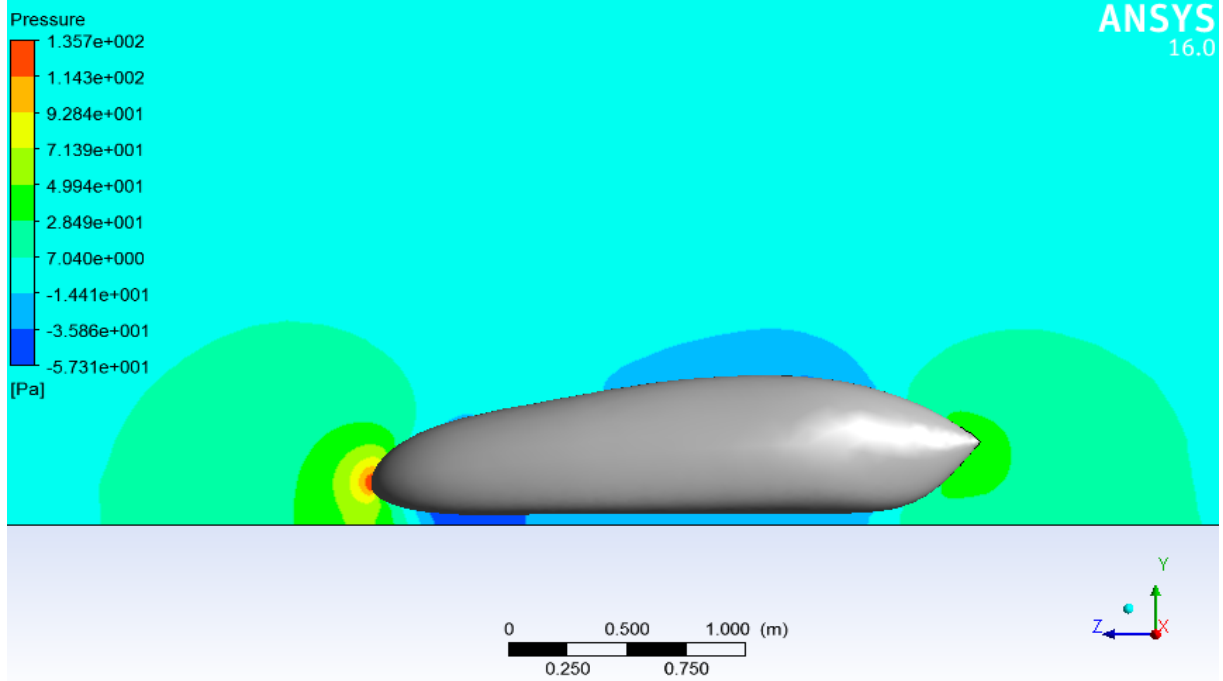
Figura 44 - Linhas de correntes sobre o Design 2 com inclinação Frontal 30°



Fonte: ANSYS® v16.0.

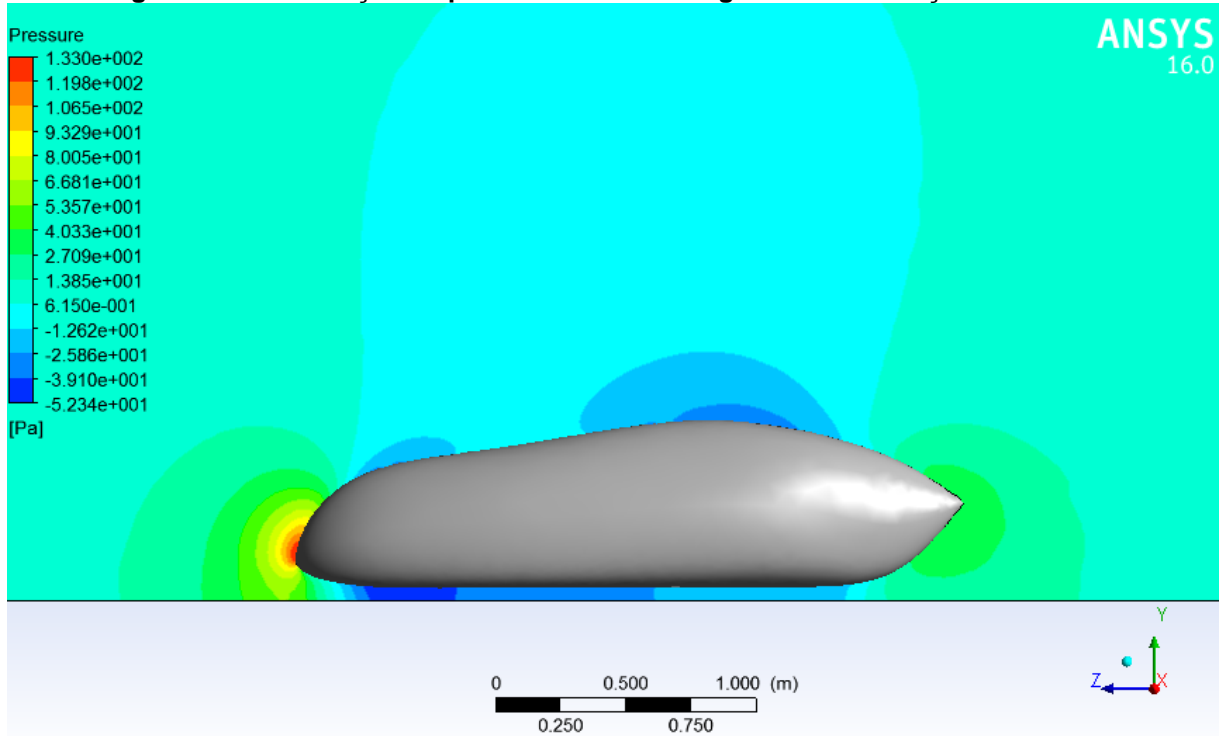
Comparando os dois designs quanto a quantidade de movimento, o modelo com inclinação frontal de 30°, apresenta sobre a região de impacto no protótipo um escoamento mais disperso e intenso, ocasionando sobre a superfície um escoamento instável.

Figura 45 - Distribuição de pressão sobre o Design 2 com inclinação Frontal 10°



Fonte: ANSYS® v16.0.

Figura 46 - Distribuição de pressão sobre o Design 2 com inclinação Frontal 30°

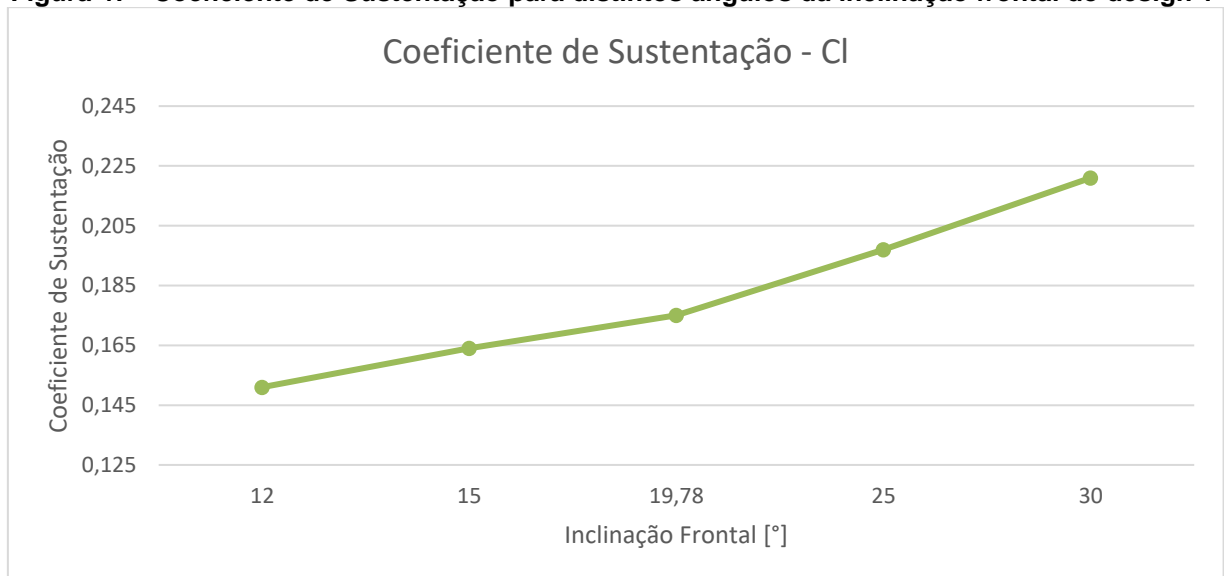


Fonte: ANSYS® v16.0.

Nas figuras anteriores apresentadas, está contida a distribuição de pressão sobre os modelos com menor e maior coeficiente de arrasto encontrado, respectivamente, para a configuração com maior inclinação frontal, 30°, nota-se que a distribuição de pressão na superfície frontal contribui em maior intensidade para a força normal gerada nessa região se comparado com o modelo com inclinação frontal menor, 10°, e uma vez que essa intensidade na força atua alinhada com o eixo de simetria longitudinal do protótipo, está sendo a direção da força do arrasto, tal ocasião comprova o aumento no coeficiente de arrasto para uma inclinação frontal maior.

Com a análise da distribuição de pressão, nota-se uma grande perturbação na região superior do protótipo ao obter valores maiores para a inclinação frontal do modelo, isto sendo responsável pelo aumento da sustentação, que está demonstrada no gráfico da figura 47 a seguir.

**Figura 47 - Coeficiente de Sustentação para distintos ângulos da inclinação frontal do design 1**



**Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.**

O gráfico do coeficiente de sustentação sobre a influência da inclinação frontal do design 2, mostrou que com uma crescente inclinação frontal, o modelo apresentou uma variação de 31,67% no coeficiente de sustentação.

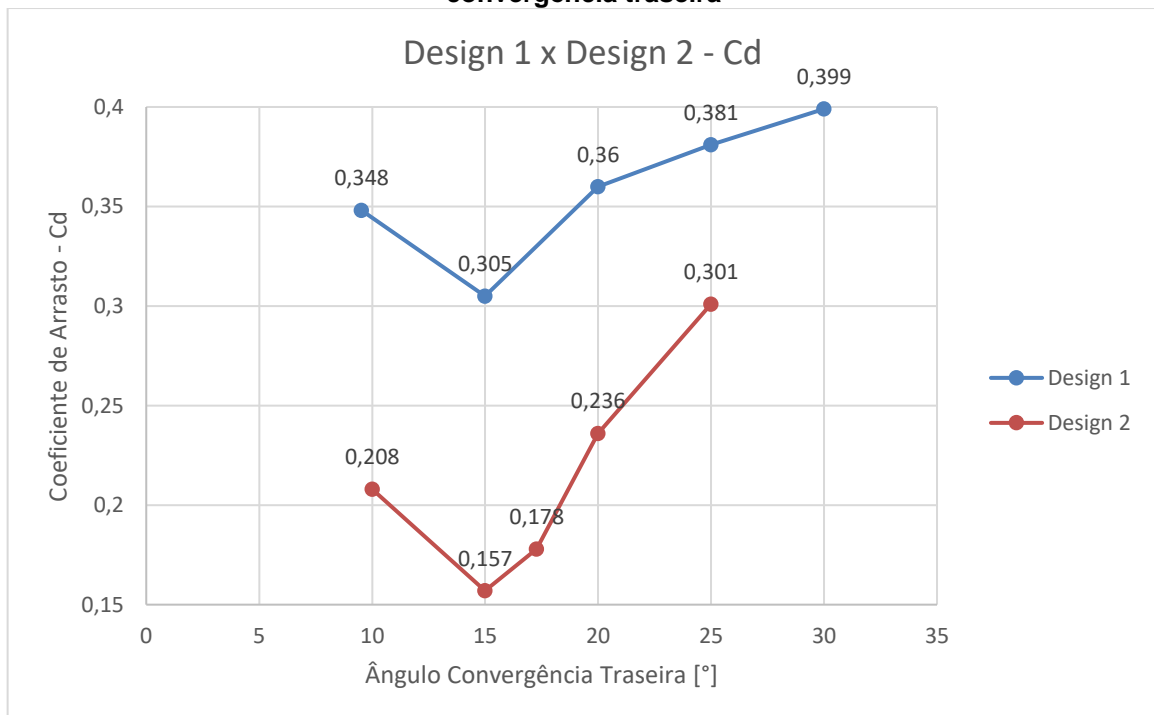
#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

No presente trabalho, o objetivo principal é de encontrar novas formas sobre os designs da equipe Pato a Jato, alterando parâmetros que estão relacionados as variáveis aerodinâmicas exercidas nos protótipos, afim de fomentar a eficiência energética.

Com o intuito de comparar os resultados encontrados para os dois designs com alterações individualmente dos parâmetros analisados, as figuras 48 e 49 a seguir demonstram a disparidade do coeficiente de arrasto e do coeficiente de sustentação encontrado para os dois designs estudados sobre o parâmetro do ângulo de convergência traseira.

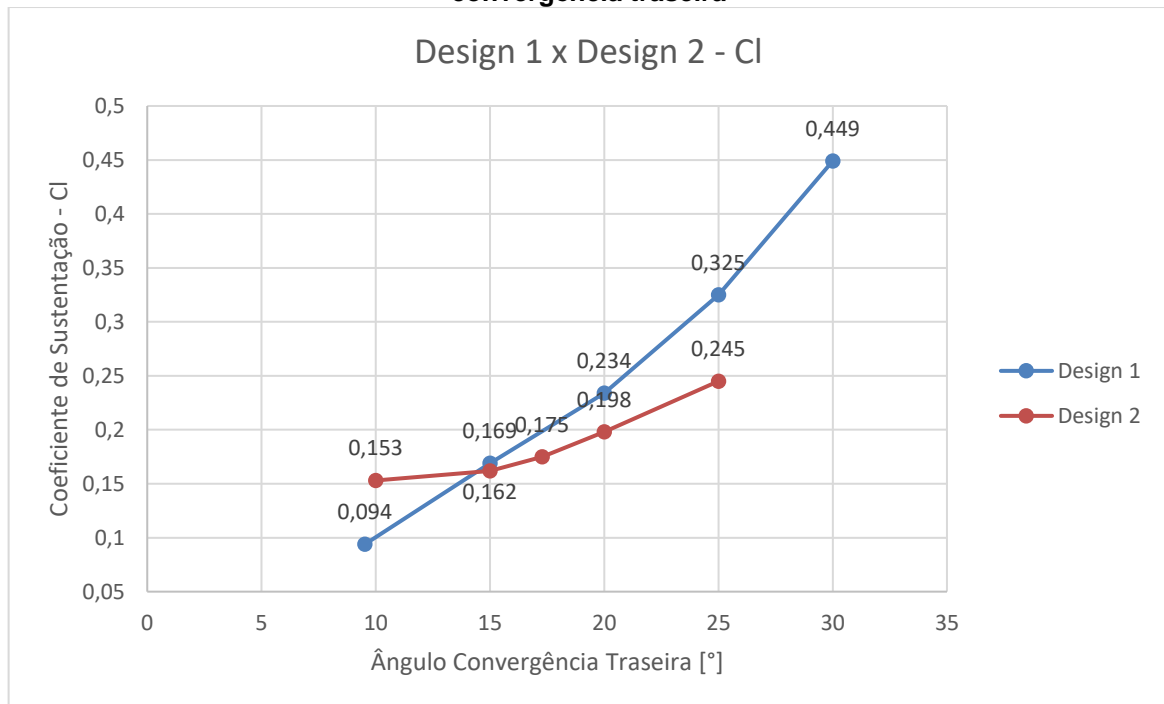
- Ângulo de Convergência Traseira:

**Figura 48 – Coeficiente de Arrasto para os designs 1 e 2, sobre alteração do ângulo de convergência traseira**



Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

**Figura 49 - Coeficiente de Sustentação para os designs 1 e 2, sobre alteração do ângulo de convergência traseira**



**Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.**

Com a variação do ângulo de convergência traseira sobre os protótipos, notou-se que para o coeficiente de arrasto, ambos os modelos apresentaram seus valores mínimos quando apresentado ângulo igual a 15°, comprovando o trabalho realizado por Hucho (1995). O design 2 mostrou uma maior sensibilidade com a alteração de tal parâmetro, demonstrando uma variação de 47,84% neste coeficiente entre os máximos e mínimos encontrados sobre ele, e devido ao seu formato semelhante à modelo gota os coeficientes de arrasto encontrados foram grandemente inferiores aos achados para o design 1, totalizando uma diferença de 48,52% sobre os melhores valores avistados.

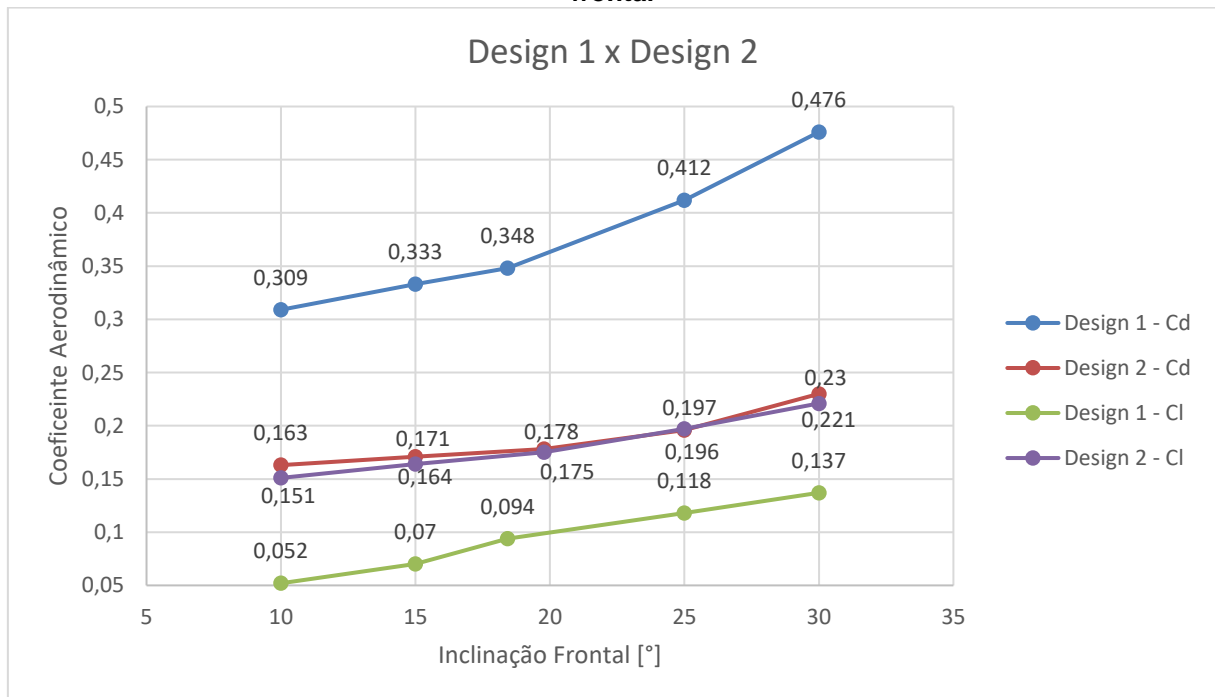
Já com relação ao coeficiente de sustentação, observou que tanto o design 1 como o design 2 apresentaram crescentes resultados com o aumento do ângulo de convergência traseira, sendo mais agudo esse aumento para angulações maiores, diferentemente do coeficiente de arrasto, o design 2 apresentou uma menor variação de resultados encontrados para o coeficiente de sustentação, rematando em uma diferença de 41,51% na variação se comparado com o design 1.



- Inclinação Frontal:

Com relação a inclinação frontal aplicada sobre os protótipos, foi possível obter uma variação de 35,08% no coeficiente de arrasto para o design 1, e uma variação de 29,13% para o design 2. E para o coeficiente de sustentação, a diferença encontrada entre os valores máximo e mínimos foi de 62,04% para o design 1, e 31,67% para o design 2. A partir da figura 50 demonstrada a seguir, notou-se que para este parâmetro, tanto para o coeficiente de arrasto como o coeficiente de sustentação, os resultados encontrados não apresentaram uma descontinuidade com o aumento da inclinação, diferentemente do ângulo de convergência traseira, que reduziu o arrasto em valores entre 10 e 15° e voltava a crescer para angulações maiores.

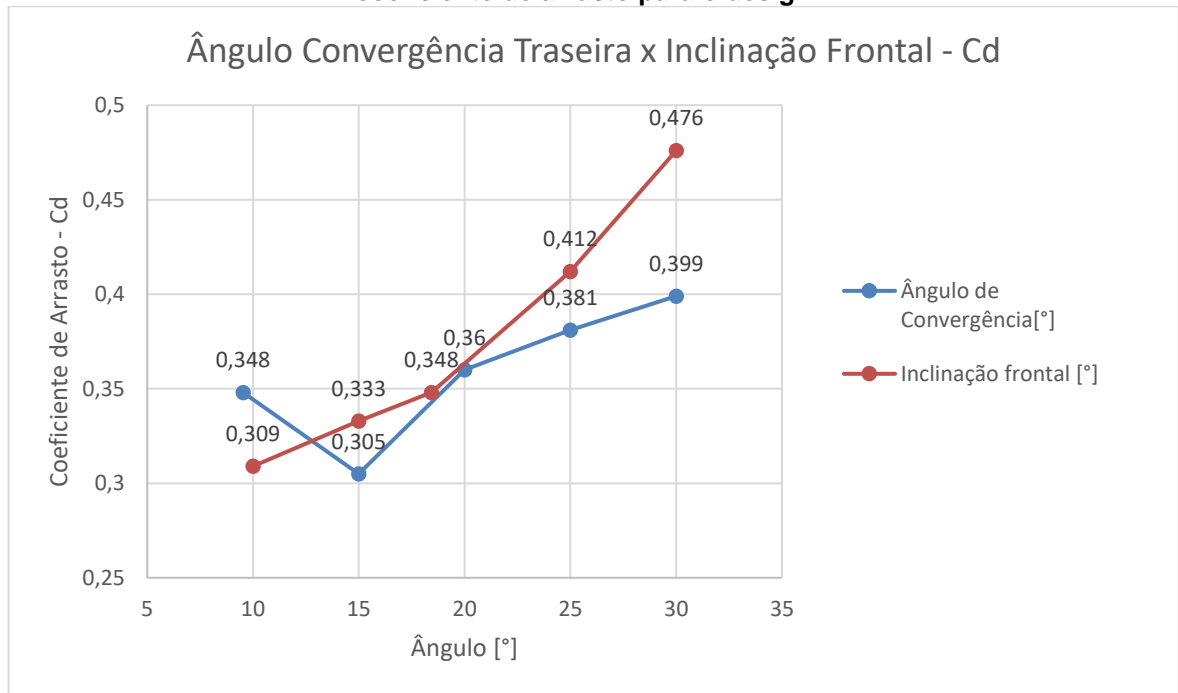
**Figura 50 – Coeficientes Aerodinâmicos para os designs 1 e 2, sobre influência da inclinação frontal**



Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

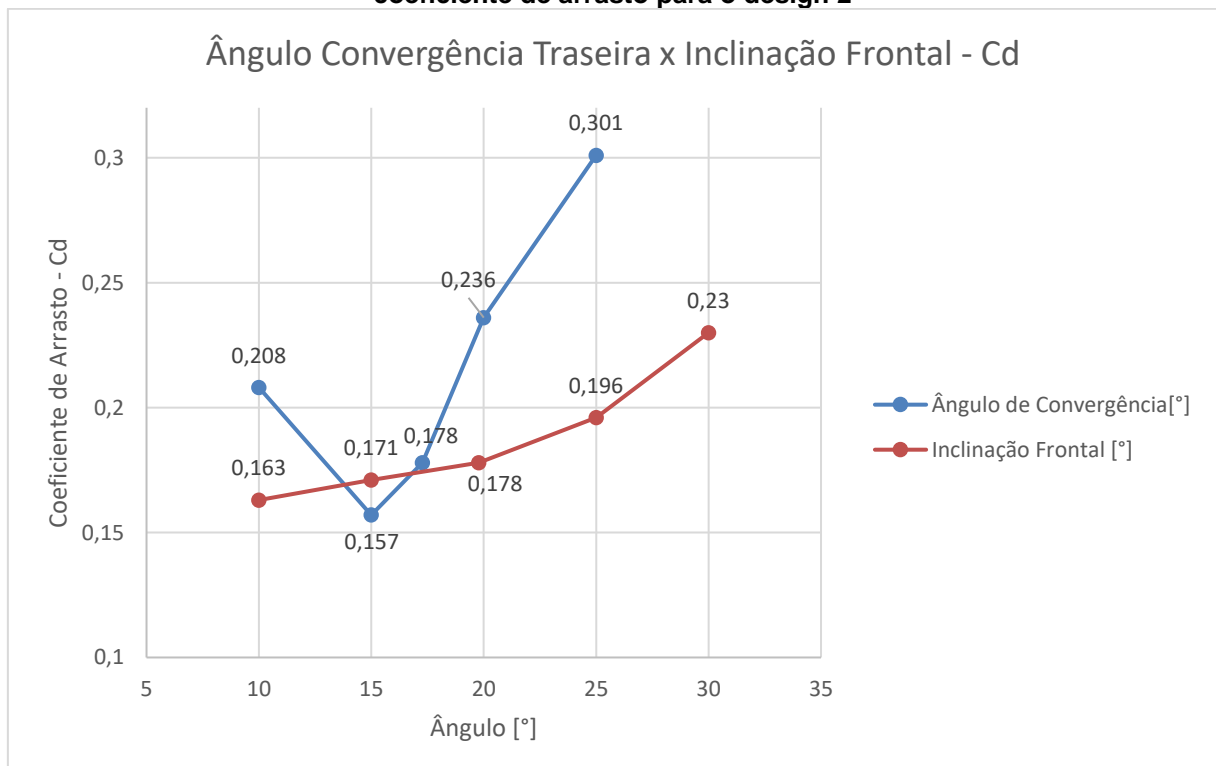
Além disso, afim de determinar qual parâmetro influenciou mais sobre o arrasto, dentre os dois estudados, as figuras 51 e 52 apresentam as curvas dos resultados encontrados sobre o ângulo de convergência traseira e a inclinação frontal para os designs 1 e 2 respectivamente.

**Figura 51 – Comparação entre o ângulo de convergência traseira com a inclinação frontal do coeficiente de arrasto para o design 1**



Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

**Figura 52 - Comparação entre o ângulo de convergência traseira com a inclinação frontal do coeficiente de arrasto para o design 2**



Fonte: Autoria Própria realizada no Excel®.

Mediante a comparação das curvas de ângulo de convergência traseira e inclinação frontal, foi possível constatar que para ambos os protótipos, a influência do ângulo de convergência traseira sobre o arrasto foi mais significativa em comparação com a inclinação frontal, fomentando a ideia de Hucho (1995), cujo afirmou que a angulação de convergência traseira é a principal forma de obter valores mínimos para o arrasto. Sendo que para o design 1 o modelo com menor coeficiente de arrasto para o ângulo de convergência traseira demonstrou uma variação de 1,29% para o valor do menor coeficiente de arrasto encontrado para a inclinação frontal. Já o design 2 mostrou uma diferença de 3,68% sobre os valores mínimos de cada parâmetro.

Com isso, conclui-se a análise do arrasto em virtude da alteração do ângulo de convergência traseira e da inclinação frontal, e com base nas informações encontradas é possível estabelecer melhorias para futuros protótipos, cujo qual recomendo que sejam voltadas para o formato do design 2, onde tal apresentou resultado mais satisfatórios para com o arrasto.

## 5 CONCLUSÕES

A exigência por veículos mais eficientes pela sociedade, tem tornado a área de estudo sobre a aerodinâmica mais intensa nos últimos anos, sendo que não apenas o custo pelos combustíveis sejam os responsáveis, mas como também a preocupação com o meio ambiente tem forçado a fabricantes de veículos se preocuparem em desenvolver veículos menos poluentes.

Uma vez que existem outros fatores que influenciam na eficiência dos automóveis, como motor, peso do carro, etc., a otimização da aerodinâmica é que demanda de um menor investimento, devido ao fato de não necessitar a criação de novos conceitos sobre a energia ou matérias desenvolvidas, que apresentam custo elevados.

E a principal forma de encontrar modelos mais eficientes através da aerodinâmica é buscando reduzir o arrasto sobre os veículos, sendo o maior responsável pela grandeza dessa variável.

No presente trabalho, o objetivo primordial é obter uma redução no arrasto sobre protótipos de eficiência energética desenvolvidos pela equipe Pato a Jato da UTFPR Câmpus Pato Branco, alterando dois parâmetros que influenciam no arrasto, sendo eles o ângulo de convergência traseira e a inclinação frontal.

E para a determinação da influência dessas variáveis sobre o arrasto, utilizou-se como ferramenta o método de elementos finitos, a partir do *software* Ansys Workbench v16.0®, cujo tal permite a visualização dos efeitos ocasionados sobre o escoamento, além de permitir observar as zonas de separação da camada limite e estimar os esforços aerodinâmicos exercidos.

Pelos resultados encontrados, tornou-se evidente que para uma determinada faixa de valores para o ângulo de convergência traseira o arrasto apresenta valores mínimos, sendo semelhantes aos valores explicitados no referencial teórico, com isso é pertinente dizer que o trabalho alcançou os objetivos traçados.

Para futuros trabalhos, que apresentam esse mesmo formato, pode ser satisfatório a inclusão de modelos para dados experimentais em tuneis de vento, afim de comparação com os resultados obtidos computacionalmente, e apresentando uma gama de valores para as variáveis analisadas mais aprofundadas, e com isso analisar

possíveis discontinuidades presentes nos coeficientes aerodinâmicos. Além disso, realizar estudos em volta da estabilidade dos veículos, que demonstrou ser influenciada pela geometria dos protótipos, como também uma análise sobre o ângulo de guinada, e por fim um estudo acerca do aumento da eficiência com a refrigeração do motor, que pode ser analisada pelos gradientes de pressão.

## REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Yunus A., CIMBALA, J.M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. São. Paulo: McGraw-Hill, 2007.

CHEN, H.C; PATEL, V.C; JU, S. **Solutions of Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations for Three-Dimensional Incompressible Flows**. Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA, 1990.

FLETCHER, C.A.J.; STEWART, G. D. H. (1986). **Bus Drag Reduction by the Trapped Vortex Concept for a Single bus and Two Buses in Tandem**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 24.

FOUX, A., FANGER-VEXLER, S., KATZ, J. **Full-Scale, On-Road Study of the Effect of Automobile Shape on its Aerodynamic Characteristics, and Comparison with Small-Scale Wind Tunnel Results**, SAE Paper No. 850287. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1985.

FOX, R. W. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6 ed. Rio de Janeiro, 2006.

GILHAUS, A.; RENN, V. **Drag and Driving-Stability-Related Aerodynamic Forces and their Interdependence-Results of Measurements on 3/8-Scale Basic Car Shapes**, SAE International, 1986.

HINZE, J. O. **Turbulence - An Introduction to its Mechanism and Theory**. McGraw-Hill, New York, 1959 ix + 586 pp.

HUCHO, W-H. **Aerodynamics of Road Vehicles**. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1998.

KATZ, J. **Race Car Aerodynamics: Designing for Speed**. 2 ed. Massachusetts, Bentley Publishers, 1995.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicles Dynamics**. Society of Automotive Engineers, 1995.

MORELLI, A. **A new Aerodynamics Approach to Advanced Automobile Basic Shapes**. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, USA, 2000.

NARASIAH, G. L. **Finite Element Analysis**. 2008.

OLLEY, M. (1934). **Independent Wheel Suspension – It's Whys and Wherefores**. SAE Journal, March.

RODI, W. **Turbulence Model and their Application in Hidraulics – A State of Art Review**. Institute fur Hydromechanik and Sonderforschungsbereich, University of Karlsruhe, Germany, 1980.

SCHLICHTING, H., GERSTEN, K. **Boundary Layer Theory**. 8<sup>th</sup> ed. Darmstadt, Berlin, Germany, 2000.

SEGEL, L. **Theoretical Prediction and Experimental Substantiation of the Response of the Automobile to Steering Control**. The Institution of Mechanical Engineers, August, 1956.

STASA, F. L. **Applied Finite Element Analysis for Engineers**. New York, United States, 1985.

SZABÓ, B. A.; BABUŠKA, I. **Introduction to Finite Element Analysis – Formulation, Verification and Validation**. Chichester, United Kingdom, 2011.

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

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method: Fluid Dynamics**. 5. ed. Oxford, England: Butterworth-Heinemann Linacre house, Jordan Hill, 2000.

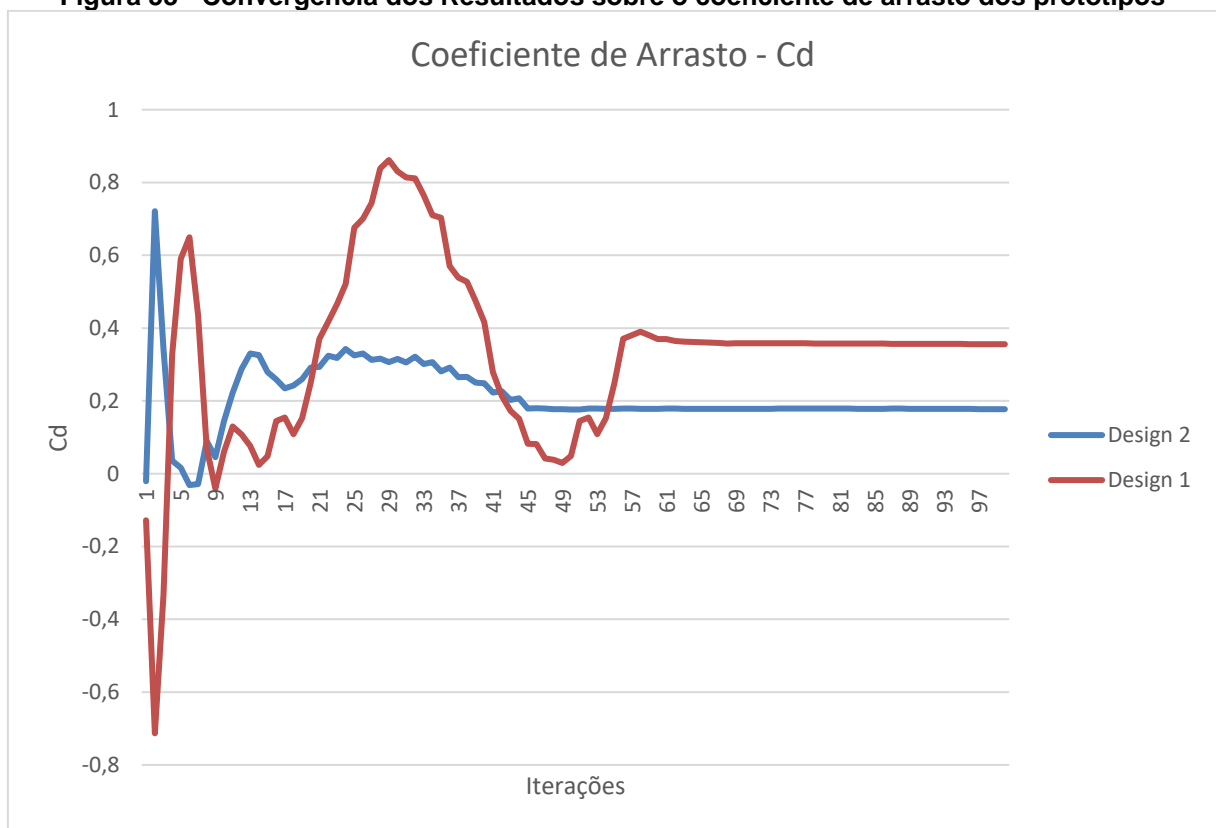
## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Definição da convergência dos resultados

Neste apêndice, é mostrado a convergência dos resultados obtidos para a simulação dos designs originais da equipe Pato a Jato.

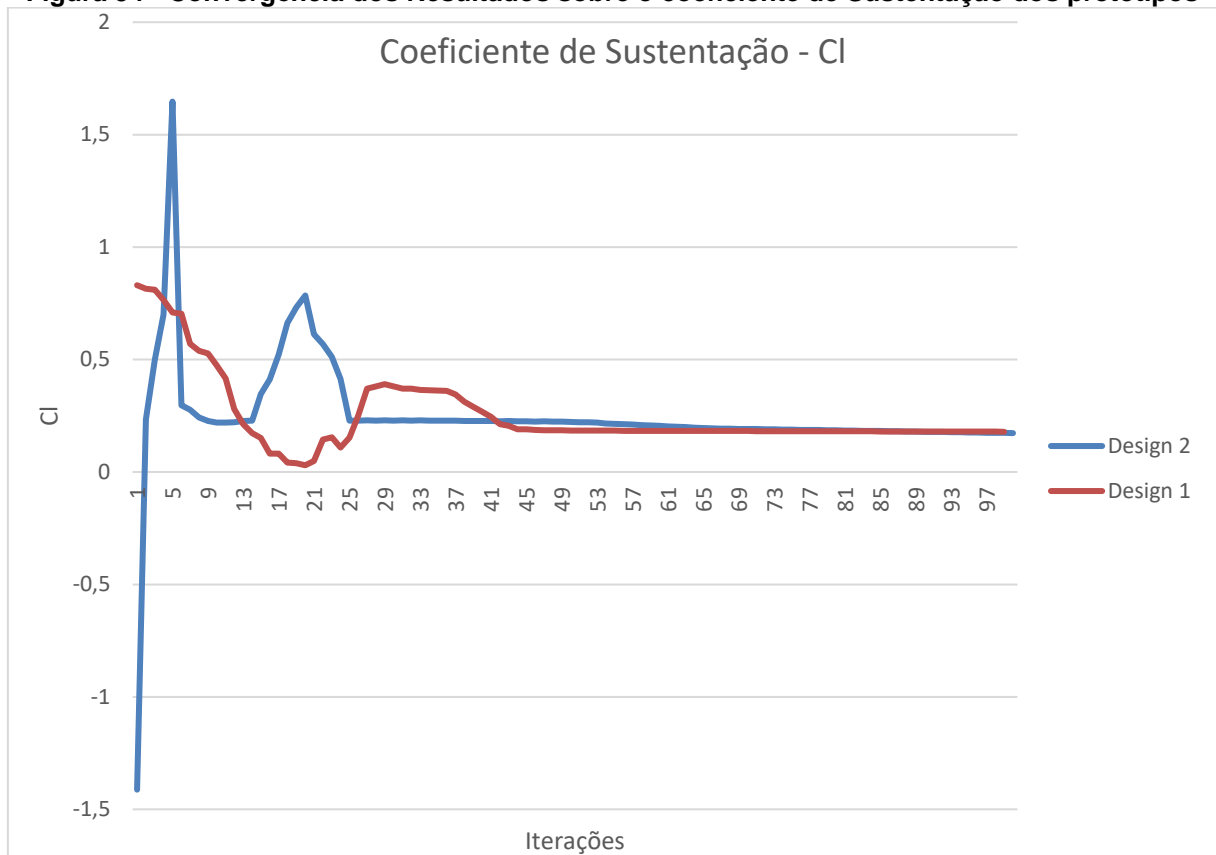
Uma vez que o presente trabalho não apresenta métodos experimentais para obtenção de resultados, a análise da convergência dos resultados torna-se necessário, dado que a simulação numérica depende da qualidade da malha determinada para obtenção dos dados, além de que a simulação é realizada para um número de finito de iterações.

**Figura 53 - Convergência dos Resultados sobre o coeficiente de arrasto dos protótipos**



Fonte: Excel®.



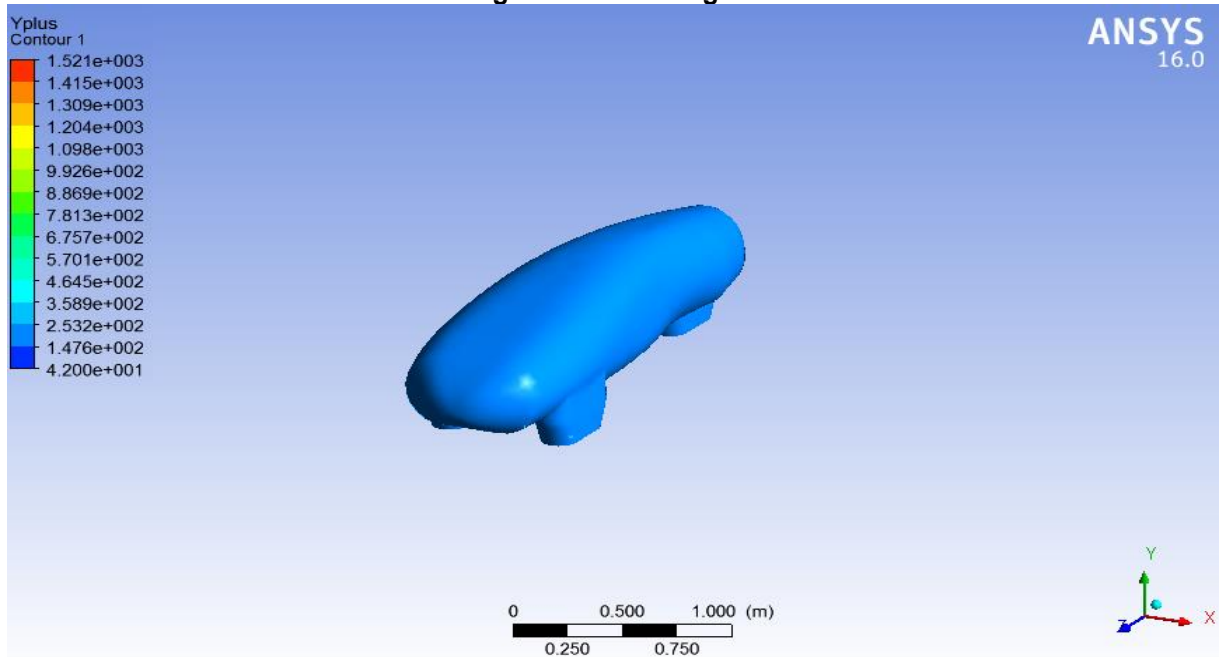
**Figura 54 - Convergência dos Resultados sobre o coeficiente de Sustentação dos protótipos**

Fonte: Excel®.

Em todas as simulações, após notado a convergência do resultado, o valor atribuído para os coeficientes aerodinâmicos foi o correspondente ao encontrado para a última iteração realizada.

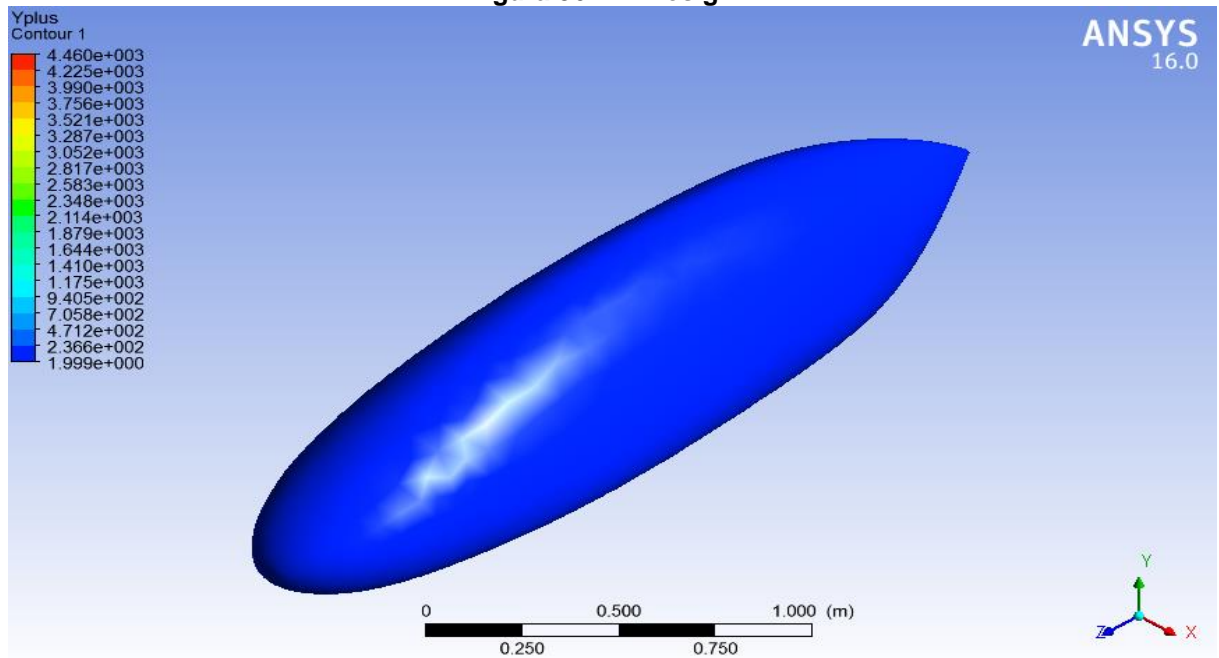
### APÊNDICE B – Verificação do Yplus (y+) para o Modelo de Turbulência $\kappa$ - $\epsilon$

Figura 55 - Y+ Design 1



Fonte: ANSYS v16.0®.

Figura 56 - Y+ Design 2



Fonte: ANSYS v16.0®.