

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

SAULO LEONARDO DA ROCHA

ANÁLISE NUMÉRICA DO CAMPO DE ESCOAMENTO EXTERNO NA GEOMETRIA
DE REFERÊNCIA AHMED PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS

Joinville
2017

SAULO LEONARDO DA ROCHA

ANÁLISE NUMÉRICA DO CAMPO DE ESCOAMENTO EXTERNO NA GEOMETRIA
DE REFERÊNCIA AHMED PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no curso Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.

Joinville
2017

Análise numérica do campo de escoamento externo na geometria de referência Ahmed
para aplicações automotivas

Saulo Leonardo da Rocha

Esta monografia foi julgada adequada para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, e aprovada em sua forma final pelo Curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 1 de Dezembro de 2017.

Prof. Thiago Antonio Fiorentin, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Vinicius Malatesta, Dr. Eng.
CTJ - UFSC

Prof. Rafael Gigena Cuenca, Dr. Eng.
CTJ - UFSC

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso, reproduz os experimentos realizados por Ahmed em 1986, utilizando outra abordagem, uma análise numérica, com objetivo de analisar o campo de escoamento externo em uma geometria de referência conhecido como corpo de Ahmed, desenhando para estudar aspectos da aerodinâmica veicular de veículos de passeio e comerciais. Originalmente os experimentos efetuados através de métodos empíricos em tuneis de vento, foram reproduzidos com o auxílio de software de mecânica dos fluidos comercial Ansys, para isso o trabalho contém um revisão para melhor compreender os conceitos estudados, incluindo conceitos fundamentais da mecânica dos fluídos, como propriedade dos fluidos, equações e fenômenos básicos envolvidos como camada limite, turbulência e arrastos, equações de bernoulli e navier stokes. Da mesma maneira um breve estudo sobre a teoria de dinâmica veicular necessária para entender a influência do escoamento ao comportamento do veículo, por exemplo a atuação da força de arrasto nas forças resistivas ao movimentos, e capacidade de realizar curvas. Após a revisão teórica, foi demonstrado detalhadamente os conceitos e procedimentos utilizados para realizar o experimentos, a fim de facilitar o entendimento e permitir que o mesmo seja reproduzido pelos leitores. Os resultados foram expostos através de fatores quantitativo como arrasto e sustentação, comparando os com valores de referência e através de elementos visuais conferindo os resultados previstos na literatura com o obtido através da simulação.

Palavras-chave: Aerodinâmica Veicular. Ahmed body. Mecânica dos fluidos computacional.

ABSTRACT

This work of graduation final project, reproduced the experiments performed by Ahmed in 1986, using another approach, a numerical analysis, with the objective of analyzing the external flow field in a reference geometry known as Ahmed's body, design to study the vehicular aerodynamics of commercial and touring vehicles. Originally the experiments performed using empirical methods in wind tunnels, in this work it was performed with the aid of Ansys a commercial computational fluid mechanics software, That's why this the work contains a review, for enhancing the understanding of the introduced concepts, including the fundamentals of fluid mechanics, such as the property of the fluids, basic equations, and phenomena involved as the boundary layer, turbulence and drag, Bernoulli equations and Navier Stokes. In the same idea, a brief study on the theory of vehicular dynamics was brought in, for example, the influence of drag force on resistible forces to the movement and the relation between lift and ability to perform curves. After the theoretical revision, the concepts and procedures to perform the experiments were demonstrated in detail, in order to facilitate the understanding and allow it to be reproduced by the readers. The results were exposed through quantification factors such as drag and lift, comparing the reference values and through visual elements conferring the predicted flow in the literature with that obtained through the simulation.

Keywords: Vehicular aerodynamics. Ahmed Body. Computational Fluids dynamics.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a CNPq que me permitiu realizar a pesquisa que originou esse trabalho, ao meu professor Leonel pela sua paciência, compreensão e, entusiasmo em ensinar os assuntos relacionados a aerodinâmica, também a Universidade Federal de Santa Catarina e seus funcionários.

Aos meus pais que vivem uma vida dedicada aos seus filhos, às minhas irmãs e família que apesar da distância fornecem laços eternos que nos ajudam a seguir em frente.

A Claudia, meu amor, e a todas as horas que estivemos lado a lado focados em nossos trabalhos.

A Deus por fornecer todas essas coisas em minha vida.

"We cannot stay where we are.
We must journey forward. We
must find that which is greater
than fortune or fate. Nothing
can bring us peace but that"

- tree of life.

LISTA DE ABREVIATURAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds-averaged Navier–Stokes Equations
LABMCI	Laboratório de Motores de Combustão Interna - CTJ/UFSC
CJT	Centro Tecnológico de Joinville
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p	Área projetada
a	Aceleração
α	Propriedade genérica
C_d	Coefficiente de Arrasto
λ	Coefficiente de Atrito
C_l	Coefficiente de Sustentação
D	Comprimento Característico
F_d	Força de arrasto
F_l	Força de sustentação
F_p	Força de arrasto por pressão
F	Força
F_x	Força na direção x
F_z	Força na direção z
g	gravidade
m	massa
ρ	Densidade
P	Pressão
Re	Numero de Reynolds
μ	Viscosidade
V_∞	velocidade da corrente livre
V	velocidade
τ	Tensão de cisalhamento

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Demonstração da atuação da força de arrasto e sustentação num corpo/geometria automotiva genérico.	14
Figura 2 – Geometria de referencia de Ahmed para análise de campos de escoamento na industria automotiva.	15
Figura 3 – Parâmetro de análise - Ângulo de inclinação da traseira φ	16
Figura 4 – Histórico do coeficiente de arrasto em veículos de passeio.	17
Figura 5 – Velocidade do escoamento na condição de não escorregamento.	20
Figura 6 – Representação da força de arrasto e sustentação como projeção da força resultante sobre o corpo.	22
Figura 7 – Relação entre o gradiente de pressão, camada limite e, região de recirculação.	24
Figura 8 – Projeção da força resultante do efeito da pressão.	25
Figura 9 – Queda de pressão no escoamento paralelo à um degrau.	26
Figura 10 – Distribuição da pressão sob as superfícies de um corpo.	27
Figura 11 – Demonstração do calculo da área frontal de um veículo.	28
Figura 12 – Variação do coeficiente de arrasto de acordo com a velocidade.	29
Figura 13 – Influencia das forças aerodinâmicas sob um veiculo, de acordo com C_d	30
Figura 14 – Forças atuando no contato entre pneu e solo.	31
Figura 15 – Curvatura e velocidade de curva e acordo com C_l	32
Figura 16 – Desenho construtivo do corpo de Ahmed.	33
Figura 17 – Variação dos valores de C_d com o ângulo φ , obtidos em experimentos.	34
Figura 18 – Valores Obtidos através de modelos reais.	35
Figura 19 – Campos de escoamento na traseira do corpo de Ahmed para dois valores de inclinação da superfície traseira.	36
Figura 20 – Classificação dos modelos de turbulência.	39
Figura 21 – Abordagens dos modelos de turbulência.	40
Figura 22 – Demonstração do domínio da simulação.	41
Figura 23 – Comparação entre o domínio físico e computacional.	41
Figura 24 – Possíveis formas geométricas que podem ser usadas como elementos de uma malha.	42
Figura 25 – Tratamento da malha em regiões de parede de interesse.	43
Figura 26 – Demonstração da influencia da taxa de crescimento sobre a malha.	44
Figura 27 – Volumes de controle para determinação do refinação de malha.	45

Figura 28 – Região de interesse e região aonde ocorre maior perturbação no escoamento.	45
Figura 29 – Divisão do corpo de Ahmed em A. posterior, B. Frente, C. Lateral, D. teto e E. baixo.	49
Figura 30 – Condições de contorno estabelecidas no domínio da simulação. . .	49
Figura 31 – Gráfico mostra residuais para as equações de continuidade, velocidade, κ e ε . Em branco linha mostra o limite de dos valores 10^{-3} . 50	50
Figura 32 – Comparação entre os resultados experimentais obtidos por Ahmed em 1986 e os resultados adquiridos por meio de simulação numérica. 52	52
Figura 33 – Comportamento do C_d e C_l de acordo com a variação do angulo φ . 53	53
Figura 34 – Escoamento no corpo de $\varphi = 0^\circ$	54
Figura 35 – Escoamento no corpo de $\varphi = 10^\circ$	54
Figura 36 – Escoamento no corpo de $\varphi = 20^\circ$	55
Figura 37 – Escoamento no corpo de $\varphi = 25^\circ$	55
Figura 38 – Escoamento no corpo de $\varphi = 30^\circ$	55
Figura 39 – Escoamento no corpo de $\varphi = 35^\circ$	56
Figura 40 – Escoamento no corpo de $\varphi = 40^\circ$	56
Figura 41 – Escoamento no corpo de $\varphi = 50^\circ$	56
Figura 42 – Escoamento no corpo de $\varphi = 60^\circ$	57
Figura 43 – Região de aceleração do escoamento devido a inclinação do angulo φ . 57	57
Figura 44 – A imagem mostra a intensidade de energia cinética turbulenta no escoamento da região posterior ao corpo. A esquerda $\varphi = 30^\circ$ e direita $\varphi = 35^\circ$	59
Figura 45 – Formação de vórtices previsto pela literatura	60
Figura 46 – Perfil de velocidade demonstrando a formação de vórtice, na região posterior ao corpo de prova.	61
Figura 47 – Comparação do resultado previsto na literatura com o simulado. . .	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Redução do consumo de combustível e acordo com a velocidade do veículo no exemplo citado.	30
Tabela 2 – Identificação dos tamanhos da malha nas regiões mostradas na Figura 28 e 27	46
Tabela 3 – Alguns valores com suas respectivas reduções no refino da malha.	47
Tabela 4 – Valores obtidos através de análise visual do gráfico citado.	52

SUMÁRIO

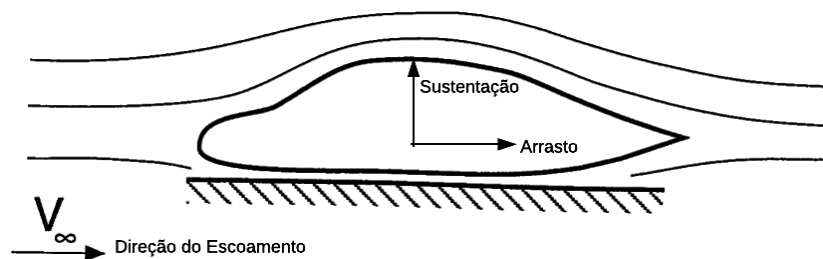
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO TEÓRICA	19
2.1	Propriedades do fluido	19
2.1.1	Densidade	19
2.1.2	Viscosidade	19
2.2	Propriedades do escoamento	20
2.2.1	Condição de não escorregamento	20
2.2.2	Escoamento laminar e turbulento	20
2.2.3	Número de Reynolds	21
2.2.4	Equações básicas	21
2.3	Fenomenologia	22
2.3.1	Arrasto por atrito e camada limite	23
2.3.2	Arrasto por pressão	24
2.4	Aerodinâmica veicular	27
2.4.1	Coeficientes de arrasto e sustentação	27
2.5	Efeitos do arrasto	29
2.6	Efeitos da sustentação	31
2.7	Geometria de referência de Ahmed	32
2.8	Resultados disponíveis	33
3	MÉTODO	37
3.1	Simulação numérica	37
3.1.1	Simplificações	38
3.1.2	Modelos de turbulência	38
3.2	Domínio computacional	40
3.2.1	Tipo de malha	41
3.2.2	Estratégia de geração de malha	43
3.2.3	Estudo de independência de malha	46
3.3	Setup	47
3.3.1	Modelos físicos	48
3.3.2	Condições de contorno	48
3.3.3	Solver	49

4	RESULTADOS	51
4.1	Análise dos resultados	51
4.2	Valores obtidos	51
4.3	Comportamento de C_d e C_l	52
4.4	Análise do escoamento	54
4.4.1	Perfis de velocidade	54
4.5	Força de sustentação	57
4.6	Força de arrasto	58
4.7	Características do escoamento	60
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.1	Trabalhos futuros	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Ao se mover imerso em um fluido um corpo está sujeito a diversos efeitos e forças entre elas o arrasto e sustentação. O arrasto é definido como a componente da força sobre um corpo na direção paralela ao seu movimento, a sustentação é definida de maneira análoga porém com a componente perpendicular ao movimento, podendo ser positiva, nesse caso chamada de *lift* ou negativa apontando para baixo e chamada de *downforce* (FOX, 2014). As direções das forças estão demonstrada na Figura 1 para uma geometria automotiva genérica.

Figura 1 – Demonstração da atuação da força de arrasto e sustentação num corpo/geometria automotiva genérico.



Adaptado de (KATZ, 1995)

A aerodinâmica dos veículos automotores é um assunto complexo devido a interação do escoamento de ar com o chão, partes móveis tais como as rodas e outras formas geométricas complexas. Ela afeta a estabilidade, o consumo de combustível e o desempenho. O consumo de combustível é afetado pela força de arrasto, força resistiva ao movimento, a estabilidade pode ser beneficiada ou prejudicada pela força de sustentação, já o desempenho depende de um bom equilíbrio entre as forças (STONE, 2004).

Em um automóvel vários sistemas podem ser influenciados pela aerodinâmica, por exemplo, a admissão e exaustão de gases, o arrefecimento e até a segurança do veículo, o acúmulo de água, sujeira ou neve em determinados pontos do veículo, geração de ruído, entre outros. (HUCHO, 1986).

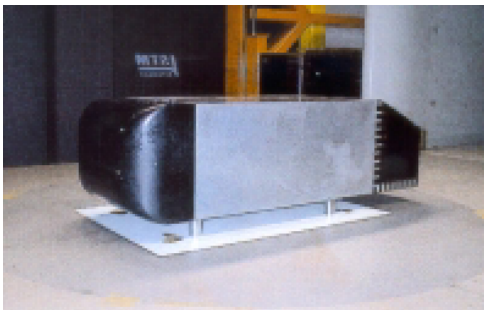
Para possuir uma melhor compreensão a respeito da aerodinâmica veicular, ela precisa ser estudada de duas maneiras, conhecendo o efeito de suas forças sobre veículo e, igualmente importante, entender como e com qual intensidade elas surgem, para isso é necessário entender os diferentes mecanismos de geração de arrasto e sustentação. Ao desenvolver um veículo, é necessário considerar ambos aspectos,

para veículos de passeio e comerciais. No caso dos veículos de competição o foco muda um pouco, dependendo da categoria, mais conservando a essência da influência da aerodinâmica no desempenho do automóvel.

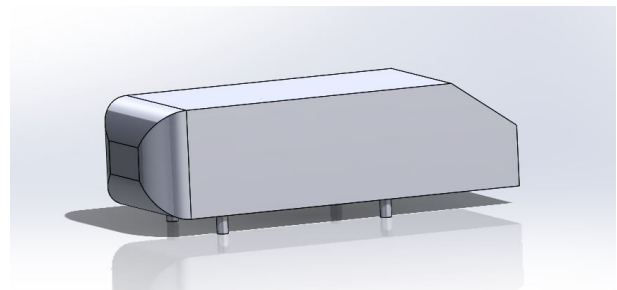
A maior parte dos veículos, ou os veículos de interesse nesse trabalho como carros de passeio, caminhões de transporte, vans, entre outros, são projetados e operam em baixas velocidades, entre 60 km/h e 120 km/h que são definidos pelas leis de trânsito. Nessas condições é possível encontrar uma relação entre os fenômenos mencionados e a geometria do veículo. A relação entre os fenômenos aerodinâmicos e a geometria de um veículo pode ser estudada através de experimentos utilizando a geometria de referência de Ahmed descrito por (HUCHO, 1986).

A geometria de um automóvel geralmente é complexa dificultando a análise da contribuição de cada parte de maneira independente, com o intuito de facilitar esse estudo foi criado o corpo de Ahmed, é a geometria utilizada para realizar o experimento, que pode ter um modelo físico, Figura 2a ou modelada em software CAD Figura 2b no caso de simulações, ela possui diversos aspectos geométricos de um veículo, porém de maneira simplificada permitindo a variação de parâmetros de maneira independente, como a altura do solo, raio de entrada do veículo e ângulo de saída.

Figura 2 – Geometria de referência de Ahmed para análise de campos de escoamento na indústria automotiva.



(a) Modelo físico do corpo de Ahmed.

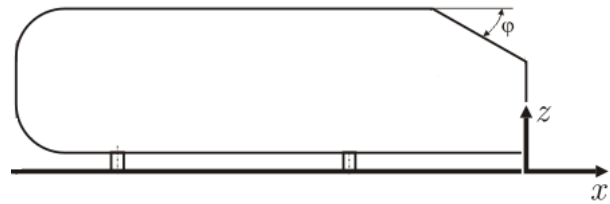


(b) Modelo 3D do corpo de Ahmed.

Fonte: (RESEARCHGATE, 2017).

Foi escolhido para realizar a análise o ângulo de saída do escoamento, formando a superfície inclinada da traseira da geometria do veículo, ou ângulo de inclinação da traseira, que pode ser observado na Figura 3, representado pelo ângulo φ , variando dentro de um intervalo determinado entre 0° e 35° .

Figura 3 – Parâmetro de análise - Ângulo de inclinação da traseira φ .



Fonte: Autor(2017)

De acordo com o descrito na literatura, é esperado que o escoamento apresente campos de velocidade e pressão diferentes a cada variação do ângulo φ , gerando alterações principalmente na distribuição das forças de arrasto e sustentação às quais o corpo está sujeito, logo o trabalho foi definido como o estudo da influência do ângulo de saída (ou superfície inclinada da traseira) sobre as forças de arrasto e sustentação, no corpo de Ahmed.

A análise descrita pode ser realizada de maneira experimental, em um túnel de vento equipado com sensores e balanças capazes de medir variáveis do sistema como velocidade do ar, pressão e forças sobre o veículo/corpo, ou através de métodos numéricos (a abordagem aqui escolhida) também conhecido como simulações numéricas. Por se tratar de análise de escoamento limitando-se à mecânica dos fluidos, é comumente referido como simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*) ou apenas CFD.

Diversos fatores contribuíram para a escolha do método como, por exemplo, os recursos disponíveis para analisar o problema. O fato de que os métodos numéricos como o CFD vêm ganhando cada vez mais importância dentro da indústria, além da disponibilidade do programa ANSYS-FLUENT no [Laboratório de Motores de Combustão Interna](#) - LABMCI/CTJ/UFSC, foram os aspectos que contribuíram para a escolha do método de CFD para realizar as análises.

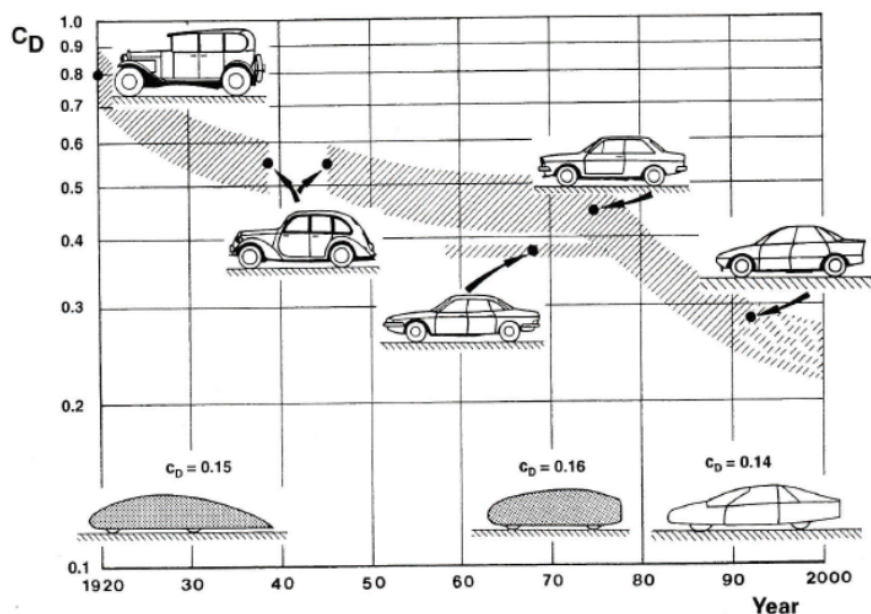
Dentro do escopo do trabalho de engenharia automotiva, o arrasto é considerado prejudicial para o desempenho do veículo, relacionado com o aumento de consumo de combustível, vibrações e ruído, impactado de forma direta na eficiência energética do veículo. Já as forças verticais dependem de sua direção, prejudicam a dinâmica veicular quando positivas (*lift*), mas é benéfica quando empurra o veículo sentido ao solo (*downforce*), melhorando estabilidade, porém seu excesso nem sempre é vantajoso devido sua relação com o arrasto, assunto abordado posteriormente (ÇENGEL, 2015).

1.1 Motivação

A preocupação com a aerodinâmica veicular nunca foi tão grande na indústria automotiva, seja visando veículos de passeio, comerciais ou alto desempenho. Tratando-se de veículos de passeio é possível listar alguns motivos que impulsionaram a busca por melhores resultados, os quais também podem se aplicar às outras categorias.

Em 1908, com a produção dos primeiros veículos, não havia preocupação alguma com a aerodinâmica, simplesmente por não haver necessidade pois eles não eram projetados para circular em altas velocidades. A força de arrasto cresce exponencialmente com a velocidade do veículo, logo surge a relação entre aumento da velocidade e redução do arrasto. A evolução na aerodinâmica dos veículos de passeio pode ser observada através da mudança do coeficiente de arrasto ao longo dos anos, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Histórico do coeficiente de arrasto em veículos de passeio.



Fonte: (HUCHO, 1986)

Assim como a velocidade, o avanço industrial tem influenciado constantemente o desenvolvimento da aerodinâmica, pois no passado muitas vezes mesmo havendo o entendimento sobre melhores técnicas e formas para os automóveis não podiam ser executados devido as dificuldades na manufatura de formas complexas e leves, à custos viáveis para a indústria e consumidor.

Outro fator que vem impulsionando as pesquisas na área é a questão da eficiência energética dos veículos. Diversas crises políticas e ambientais vêm ocorrendo no mundo, relacionadas ao consumo de combustível fóssil, diversas soluções começam a surgir na indústria. Porém todas possuem algo em comum: a necessidade de veículos mais eficientes. É sabido que essa eficiência está relacionada a fatores como eficiência

mecânica dos diferentes componentes, eficiência do motor de combustão interna e/ou motor elétrico, resistência ao rolamento e o arrasto aerodinâmico presente em todos os veículos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise numérica do campo de escoamento ao redor do corpo de referência de Ahmed, e a sua resposta em termos de arrasto e sustentação quando feitas variações no ângulo da superfície inclinada da traseira.

1.2.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, é necessário realizar as seguintes etapas / atividades, descritas aqui como objetivos específicos:

- Compreender a fenomenologia da aerodinâmica do campo de escoamento ao redor do corpo de referência de Ahmed;
- Entender as modificações do campo de escoamento induzidas pela variação do ângulo da superfície inclinada em termos de arrasto e sustentação;
- Conduzir um experimento numérico (simulação) de maneira coerente e confiável, que seja capaz de reproduzir os resultados encontrados na literatura, gerando geometrias e malhas computacionais utilizadas posteriormente em soluções CFD com os modelos fenomenológicos adequados em termos de escoamento.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos básicos associados à aerodinâmica veicular, fundamentais para contextualizar o leitor no intuito de um melhor entendimento deste documento.

2.1 Propriedades do fluido

2.1.1 Densidade

A densidade, ou massa específica, dos materiais é definida como a quantidade de massa por volume. No ar a sua definição não é diferente, apesar dessa propriedade variar de acordo com condições de pressão e temperatura.

Pode se considerar que a variação da densidade do ar (devido ao aumento ou queda da temperatura, por exemplo) é irrelevante no estudo do escoamento ao redor de veículo em movimento, porém a velocidade do ar em um escoamento pode induzir alterações na pressão e conseqüentemente na densidade, este efeito ocorre de maneira proporcional à que o escoamento se encontra. A relação entre a velocidade e pressão em um escoamento é demonstrada na Seção 2.2.4.

Apesar de importante esse efeito não apresenta influencia significativa em velocidades abaixo de aproximadamente 340 km/h equivalente a 1/3 da velocidade do som. Então um escoamento pode ser classificação em dois grupos, incompressível com variações da densidade desprezível e podendo ser considerada $\rho = 1,22 \frac{kg}{m^3}$ nas condições de 1 atm a uma temperatura de 288 K e, o escoamento compressível aonde essa variação deve ser considerada caso queira obter resultados mais acurados (ÇENGEL, 2015).

2.1.2 Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade exclusiva dos fluidos, e possui sua origem na coesão molecular, seu equivalente na mecânica dos sólidos seria tensão de cisalhamento, forças internas que surgem em sentido contrário a deformação, em outras palavras é a medida quantitativa da resistência de um fluido ao escoamento White (2009). Sozinha a viscosidade não explica efeitos como o arrasto e turbulência, porém é um mecanismo necessário para que esses fenômenos ocorram.

Os efeitos viscosos surgem no deslocamento entre as camadas do fluido,

especificamente nas forças que surgem em sentido contrário a esse deslocamento. Muitas vezes esses efeitos irão ser desconsiderados em um escoamento ou parte dele, pois quando não há deslocamento entre as camadas não existem efeitos viscosos.

Em diversas circunstâncias os efeitos viscosos serão desprezados seja em todo um experimento ou apenas parte do escoamento que se deseja resolver, por apresentar condições iguais às mostradas no parágrafo anterior, ou próximas o bastante para não interferir de maneira significativa no fluido (SYMON, 1996).

2.2 Propriedades do escoamento

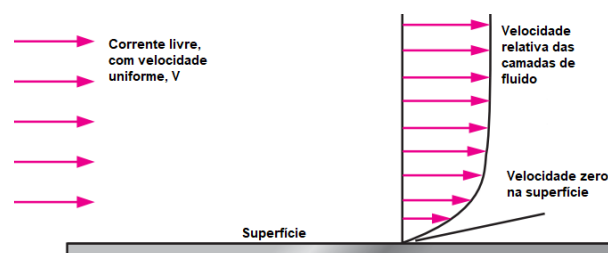
2.2.1 Condição de não escorregamento

A condição de não escorregamento é a suposição mais importante para a compreensão da interface do escoamento de um fluido com um sólido, importante destacar que a maior parte dos escoamentos ocorre em contato com uma superfície como um duto, asa ou veículo.

As evidências experimentais mostram que, conforme o escoamento a uma determinada velocidade, entra em contato alguma superfície, as moléculas ou fração de volume em contato com a parede não se movimentam, ou seja não são capazes de escorregar sobre a superfície devido a efeitos viscosos na interface fluido/sólido (ÇENGEL, 2015).

Tal condição é propagada para as camadas superiores do escoamento devido aos efeitos viscosos, então a velocidade do fluido gradualmente vai se aproximando da de corrente livre, que é considerada a região aonde os efeitos da condição de não escorregamento já não percebidos. Tal perfil de velocidade é descrito na Figura 5.

Figura 5 – Velocidade do escoamento na condição de não escorregamento.



Fonte: Adaptado de (ÇENGEL, 2015)

2.2.2 Escoamento laminar e turbulento

Escoamentos laminares e turbulentos podem ser visualmente identificados através de seu comportamento em situações cotidianas ou experimentos em laboratório. Escoamentos laminares são suaves e com direção bem definida, enquanto o turbulento

é difícil identificar uma única direção já que o fluido se movimenta rapidamente nos três eixos se misturando continuamente.

Aplicando uma definição mais exata, o escoamento laminar é quando todo o deslocamento do fluido ocorre na mesma direção e velocidade. Em decorrência desse efeito, não existem efeitos viscosos consideráveis, pois como já visto na seção 2.1.2 tais efeitos surgem do movimento relativo entre as camadas do fluido, sendo esse escoamento governado pelos efeitos inerciais do fluido.

A turbulência é caracterizada pela grande variação de velocidade e sentido dentro do escoamento, conseqüentemente acentuando os efeitos da viscosidade sobre seu comportamento. A turbulência geralmente é induzida por esses fatores e não o estado natural do escoamento como, por exemplo, uma mudança brusca em na geometria sob qual o escoamento se encontra leva a alterações de sentido e velocidade.

2.2.3 Número de Reynolds

Na seção anterior foi citada as influência dos efeitos viscosos e inerciais no fluido e como isso pode ser usado para classificar um escoamento. Essa relação pode ser descrita pelo número de Reynolds.

Número de Reynolds é um parâmetro adimensional derivado do quociente das forças de inércia ($v\rho$) e pelas forças de viscosidade μ/D , que pode ser calculado através da Equação 2.1. Essa relação é usada amplamente nos estudos de relacionados à mecânica dos fluidos.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

2.2.4 Equações básicas

No ano de 1738 Daniel Bernoulli (1700-1782) publicou a Equação 2.2, conhecida como equação de Bernoulli, uma importante ferramenta na mecânica dos fluidos, que quando usada corretamente é capaz de prever o comportamento de um escoamento (MUNSON; YOUNG, 2009).

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \gamma z = constante \quad (2.2)$$

Para que a equação seja corretamente usada algumas considerações devem ser feitas como, desconsiderar os efeitos viscosos e compressibilidade, escoamento deve possuir regime permanente.

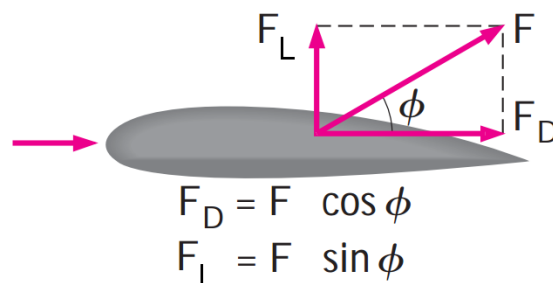
Efeitos viscosos poderão ser desconsiderados em regiões não turbulentas como citado na secção 2.1.2, assim como os efeitos de compressibilidade podem ser negligenciados em baixas velocidades de acordo com o citado na secção 2.1.1.

A pesar das situações do "mundo real" nunca se assemelhar às estipuladas anteriormente, a equação de Bernoulli é capaz de prever o comportamento de um escoamento. Sua interpretação física é que a energia de um escoamento deve se permanecer constante, portanto um ponto de estagnação com velocidade de menor valor no escoamento ou zero, resulta no maior valor possível para a pressão no escoamento. Assim como o ponto com maior velocidade do escoamento, ou simplesmente aumentar a velocidade do escoamento induz zonas de baixa pressão (MUNSON; YOUNG, 2009).

2.3 Fenomenologia

Anteriormente a força de arrasto foi definida como a componente da força do ar sobre o veículo paralela à direção do escoamento e a sustentação perpendicular, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Representação da força de arrasto e sustentação como projeção da força resultante sobre o corpo.



Fonte: (ÇENGEL, 2015)

Apesar de poder ocorrer por diversas causas apenas dois fenômenos são responsáveis pelo surgimento dessas forças: (a) um gradiente de pressão no escoamento sobre o corpo e, (b) a força de atrito entre o ar e a superfície. Então o cálculo dessas forças se dá pela contribuição do gradiente de pressão e atrito no sentido especificado, o cálculo direto se através das Equações 2.3 para o arrasto e 2.4 para a sustentação.

$$F_d = \int_a F_d = \int_a (-P \cos \phi + \tau \sin \phi) dA \quad (2.3)$$

$$F_l = \int_a F_l = \int_a (-P \sin\phi + \tau \cos\phi) dA \quad (2.4)$$

Analicamente é possível calcular as forças sobre uma superfície através das Equações 2.3 e 2.4, porém quando o objetivo é analisar geometrias complexas, as equações acima não são simples de se aplicar e resolver, havendo a necessidade de se resolver o escoamento utilizando simulação de CFD, realizado neste trabalho.

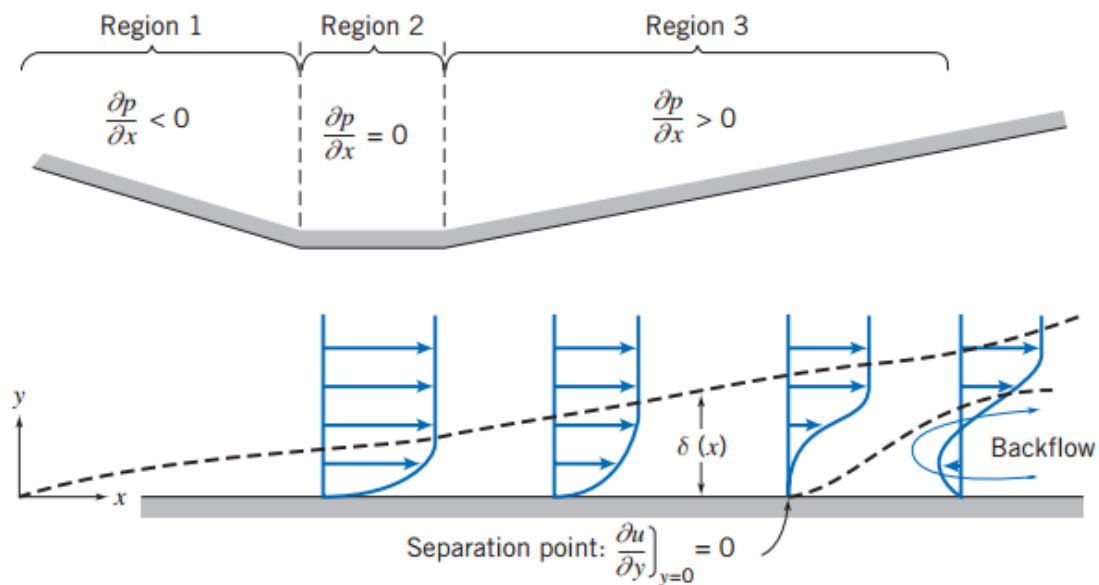
2.3.1 Arrasto por atrito e camada limite

A força de arrasto por atrito possui origem em outro fenômeno conhecido como camada limite, por isso serão abordados juntamente nessa seção. O conceito de camada limite foi primeiramente introduzido em 1904 por Ludwig Prandtl, um pesquisador de aerodinâmica, e foi muito importante na área de pesquisa da mecânica dos fluidos, permitindo o cálculo do arrasto que até então não havia sido matematicamente descrito, apenas observado em experimentos (FOX, 2014).

A camada limite possui origem na interface do escoamento com uma superfície, devido a condição de não escorregamento, citada na Seção 2.2.1, a primeiras camadas possuem velocidade nula e desaceleram as camadas subseqüentes devido aos efeitos da viscosidade, que são acentuados nessa região devido ao gradiente de velocidade na direção y , conforme mostrado na Figura 7. O perfil de velocidade resultante dessa condição é mostrado na Figura 7, sendo zero no contato com a superfície conforme já comentado e aumenta até atingir a velocidade de escoamento livre, região aonde os efeitos viscosos já podem ser desconsiderados.

Porém é preciso considerar que esse perfil muda ao conforme o fluido percorre a superfície, ao gradiente de pressão. Na região 1 é observado um gradiente favorável, seguido da região 2 aonde existe um gradiente nulo. A região 3 é considerada crítica pois apresenta um gradiente de pressão chamado de adverso, pois reduz a velocidade subitamente até estagnar o fluido nessa região, causando o efeito de descolamento da camada limite (FOX, 2014).

Figura 7 – Relação entre o gradiente de pressão, camada limite e, região de recirculação.



Fonte: (FOX, 2014)

É importante também considerar que o descolamento da camada limite pode ser induzido pela geometria da superfície, como imperfeições, mudança de brusca, por exemplo o degrau mostrado na Figura 9. Nesses casos o arrasto pode ser melhor explicado pelo arrasto por pressão, explorado na próxima Seção 2.3.2.

A força de arrasto por atrito é a resultante do cisalhamento que ocorre na camada limite, que depende diretamente do cisalhamento τ e da inclinação da superfície em relação ao corpo, representado na Equação 2.3, pelo termo $\tau \sin \phi$, logo as partes de um corpo perpendiculares ao sentido do movimento não sofrem arrasto por atrito.

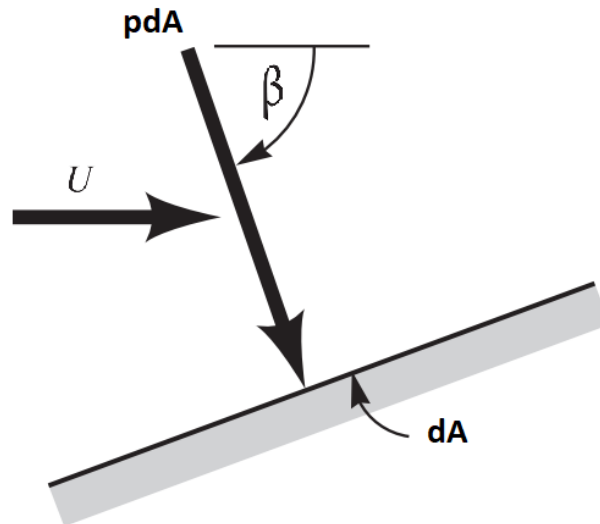
2.3.2 Arrasto por pressão

Arrasto por pressão, é causado pela resultante de pressão do escoamento atuando sobre as superfícies de um corpo, por isso também é conhecida como arrasto de forma já que depende da geometria do corpo.

Anteriormente as Equações 2.3 e 2.4 foi mostrado o cálculo das forças totais atuando em um corpo, na Equação 2.5 foi isolado apenas a contribuição da pressão em uma superfície, com sua aplicação demonstrada na Figura 8, que mostra a projeção da força em relação ao ângulo entre a superfície indicada como dA e direção do escoamento mostrado pelo vetor U . Com essas informações é possível interpretar a ação da pressão em um corpo (MUNSON; YOUNG, 2009).

$$F_p = \int_a -P \cos \phi dA \quad (2.5)$$

Figura 8 – Projeção da força resultante do efeito da pressão.



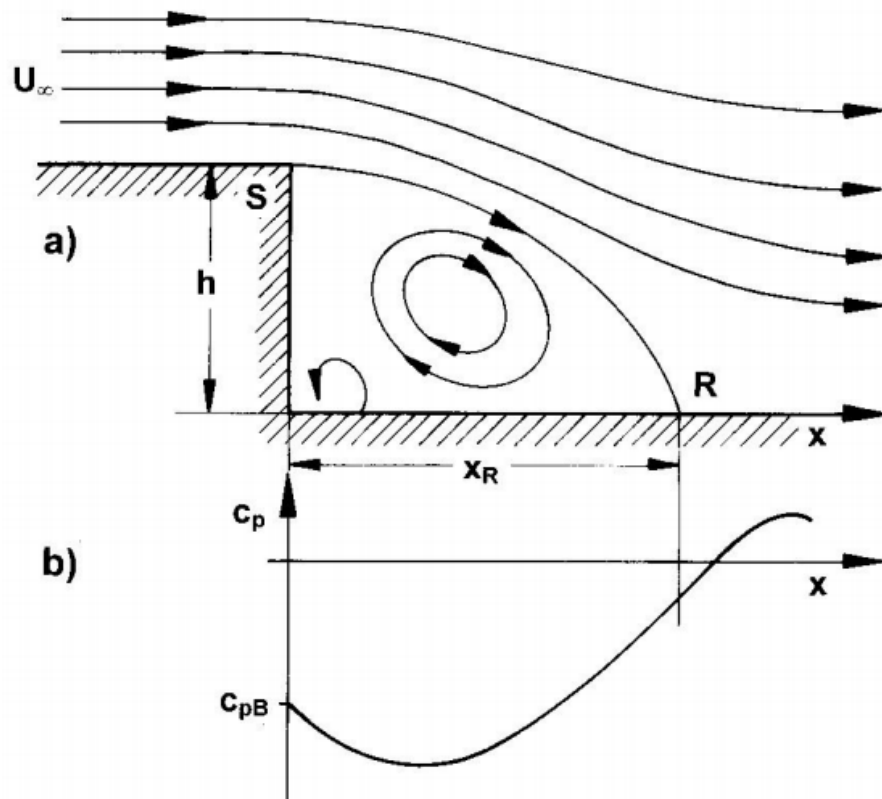
Fonte: Adaptado de (MUNSON; YOUNG, 2009)

Seguindo com a análise do arrasto por pressão através da Equação 2.5 e Figura 8, a força gerada pelo escoamento sob uma superfície depende da projeção do ângulo β , portanto se considerarmos uma placa paralela ao escoamento, o valor de β será de 90° , tornando o valor do arrasto por pressão nulo, pois $\cos 90^\circ$ é zero. Logo é possível concluir que as superfícies de um corpo paralelas ao escoamento apenas estão sujeitas a arrasto por atrito e camada limite. Outra condição é uma superfície perpendicular ao escoamento, onde β vale 0° ou 180° , que resulta na maior força possível pela pressão na superfície já que, cosseno desses ângulos é 1,0.

No parágrafo anterior apenas foi citado os valores máximo e nulos da força de arrasto, porém é necessário considerar, que irão existir pontos intermediários, por exemplo, considerando $\beta = 60^\circ$, se obtém $F_d = F \cdot \cos 60^\circ$ que é equivalente a $F_d = F \cdot 0,5$, assim sucessivamente para os demais ângulos.

Além da inclinação da superfície o sentido da força irá se determinado pela parcela da força de pressão, representada na Equação 2.5 pelo termo pdA , que pode possuir um valor negativo ou positivo. Um exemplo de região de sucção, é mostrado na Figura 9 (a) um escoamento paralelo a um degrau, que resulta em uma região aonde o coeficiente de pressão é menor que zero, conforme mostrado pelo gráfico em (b).

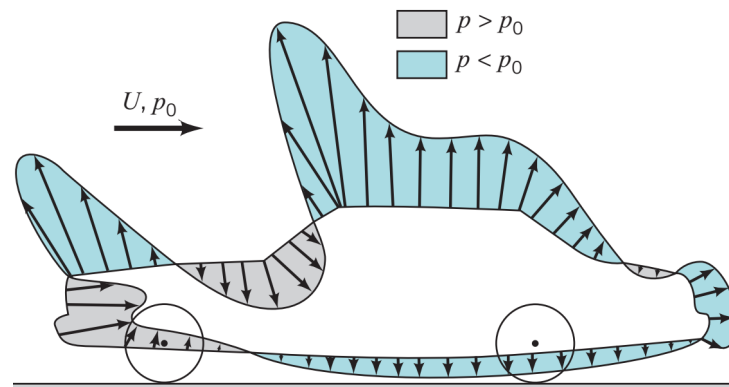
Figura 9 – Queda de pressão no escoamento paralelo à um degrau.



Fonte: (HUCHO, 2003)

A definição de arrasto por pressão foi dada para uma superfície específica, porém ao calcular o arrasto total em um corpo ou veículo é importante considerar a somatória das forças atuando em todas as superfícies, conforme mostrado na Figura 10, onde as regiões em cinza representam as zonas de alta pressão que criam uma força no sentido da superfície, em azul as regiões de baixa pressão gerando força no sentido oposto (MUNSON; YOUNG, 2009).

Figura 10 – Distribuição da pressão sob as superfícies de um corpo.



Fonte: Adaptado de (MUNSON; YOUNG, 2009)

2.4 Aerodinâmica veicular

Nessa seção será discutida a influência dos fenômenos comentados sob a dinâmica veicular

2.4.1 Coeficientes de arrasto e sustentação

Usualmente o arrasto e a sustentação não são representadas através de uma força em Newtons e sim pelos coeficientes adimensionais C_d (Coeficiente de arrasto) e C_l (Coeficiente de sustentação). Essa abordagem possui o objetivo de tornar os resultados mais genéricos, já que não dependem da escala do veículo, como será demonstrado mais à frente, facilitando a comparação entre os coeficientes de diferentes veículos.

Os coeficientes C_d e C_l são calculados através das Equações 2.6 e 2.7 respectivamente, a força de arrasto F_d e sustentação F_l utilizados na formula podem ser adquiridos através de medições ou por simulação numéricas, como proposto pelo trabalho, a velocidade de corrente livre pode ser entendida como a velocidade em que o veículo está se movendo ou a velocidade do fluxo de ar o qual o corpo está sujeito, densidade do ar, uma propriedade do fluido e a área projetada (KATZ, 1995).

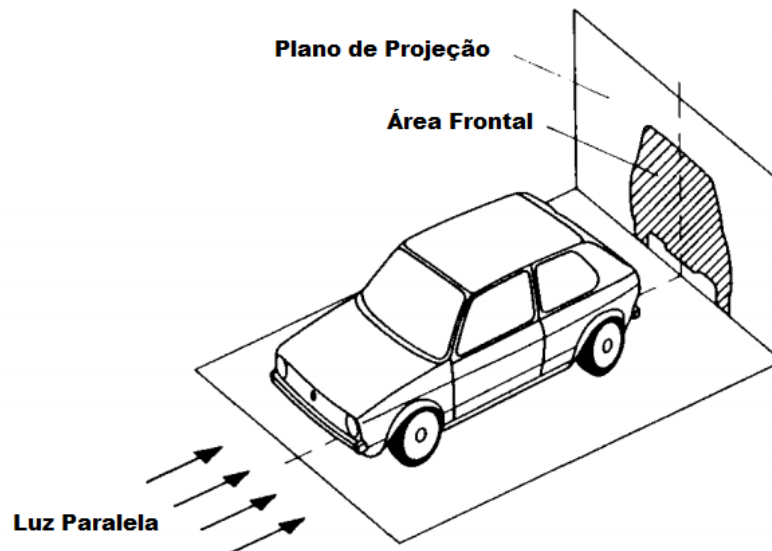
$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A_p} \quad (2.6)$$

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A_p} \quad (2.7)$$

Para as duas equações a área projetada deve ser definida conforme é mostrado na Figura 11. Utilizar a grandeza da força, seja arrasto ou sustentação dividida pela área frontal, implica que os coeficientes não dependem da escala, portanto

pode-se concluir que dois corpos de mesma geometria porém diferentes escalas, devem apresentar os mesmos coeficientes. Esse fato é reforçado no parágrafo seguinte.

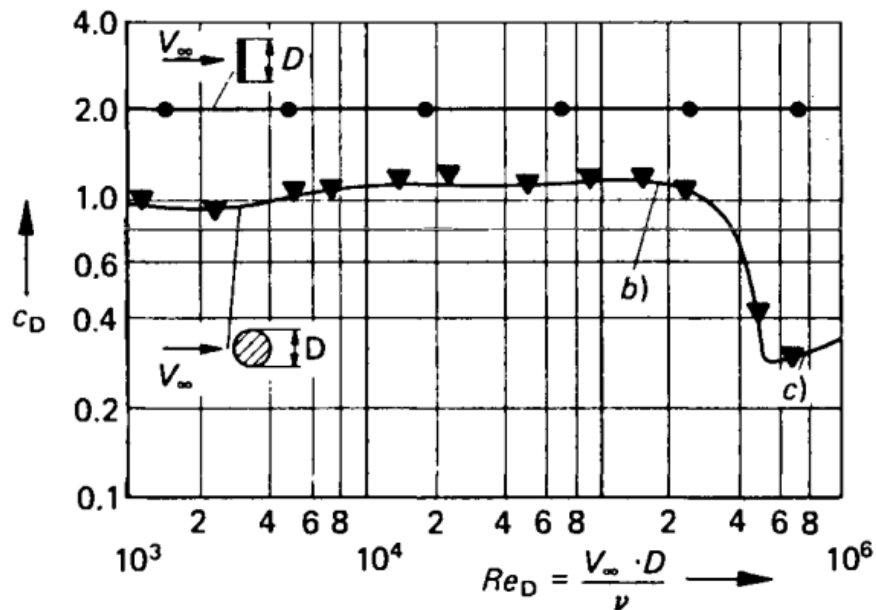
Figura 11 – Demonstração do cálculo da área frontal de um veículo.



Fonte: Adaptado (GILLESPIE, 2004)

O gráfico da Figura 12, mostra a variação do coeficiente de arrasto pelo número de Reynolds para dois corpos, uma parede plana onde o arrasto por atrito predomina e um cilíndrico aonde o arrasto por pressão é o principal, assim como nos veículos e corpo de prova de Ahmed. Excluindo os baixos valores de Reynolds, é possível notar que a variação do C_d é nula ou desprezível principalmente no caso do prisma, não dependendo do número de Reynolds, logo não depende da velocidade, e sim apenas da geometria conforme foi citado no parágrafo anterior Hucho (1986).

Figura 12 – Variação do coeficiente de arrasto de acordo com a velocidade.



Fonte: Adaptado de (GILLESPIE, 2004)

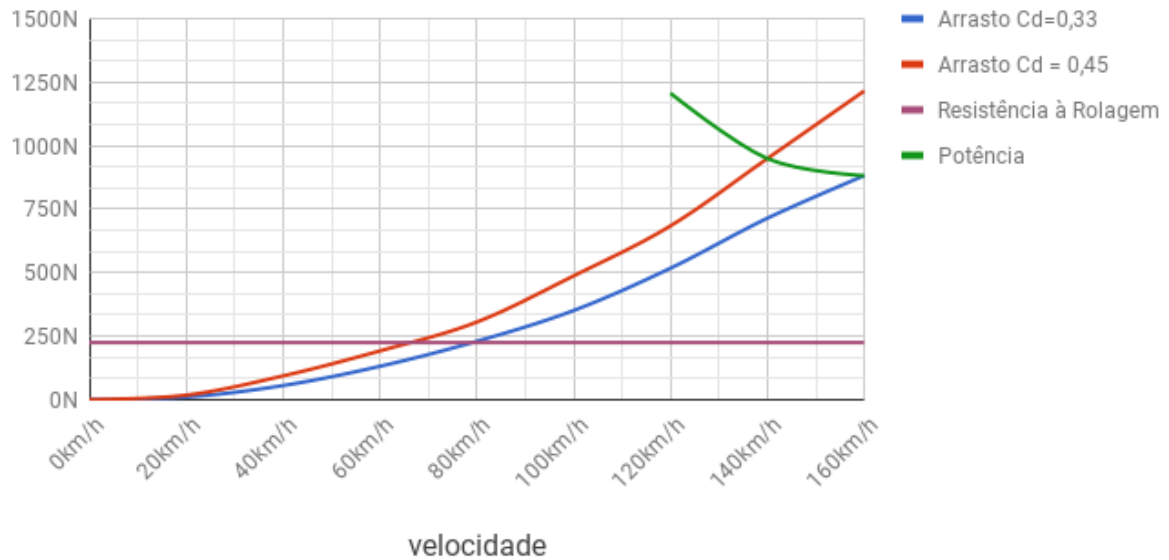
2.5 Efeitos do arrasto

Nas secções anteriores já foram fornecido conceitos e explicações suficientes para entender a força de arrasto, porém ainda falta discutir seu impacto sob o veículo, principalmente os impactos ao desempenho e consumo de combustível.

Sendo o arrasto uma força que opõem o movimento é conveniente compará-la com a resistência a rolagem, considerando uma resistência de rolagem de 225 N e forças de arrasto de acordo com o mostrado na Figura 13 para os casos de um $C_d = 0,33$ e $C_d = 0,45$, assumindo a mesma área frontal de $2,25 \text{ m}^2$, valores característicos de veículo pequenos da década de 90.

Analisando a Equação 2.6, a grandeza do arrasto aumenta com a velocidade, então quando comparada à resistência a rolagem na Figura 13, apresenta valores menores até aproximadamente 70 km/h, porém em velocidades próximas de 160 km/h possui valor até cinco vezes maior que a resistência a rolagem. Conseqüentemente a força de arrasto possui papel determinante no desempenho e consumo de combustível de um veículo, principalmente em velocidade elevada (STONE, 2004).

Figura 13 – Influencia das forças aerodinâmicas sob um veículo, de acordo com C_d .



Fonte: Adaptado de (STONE, 2004)

O impacto no desempenho pode ser analisado através do gráfico na Figura 13, considerando que os dois veículos possuem a mesma potência de 49 kW ou 65 hp, devido a maior resistência do ar o veículo de $C_d = 0,45$ consegue alcançar a velocidade máxima de 140 km/h enquanto o veículo de $C_d = 0,33$ é capaz de alcançar 160 km/h.

A redução no consumo de combustível pode ser calculada diretamente pela redução nas forças de resistência ao movimento no veículo, portanto considerando a diferença entre as forças de arrasto do exemplo, podemos calcular a redução no gasto de combustível entre os veículos, na Tabela 1.

Tabela 1 – Redução do consumo de combustível e acordo com a velocidade do veículo no exemplo citado.

Velocidade	Redução no consumo
50 km/h	6,7 %
80 km/h	15,2 %
120 km/h	20 %
160 km/h	22,5 %

Fonte: Adaptado de (STONE, 2004)

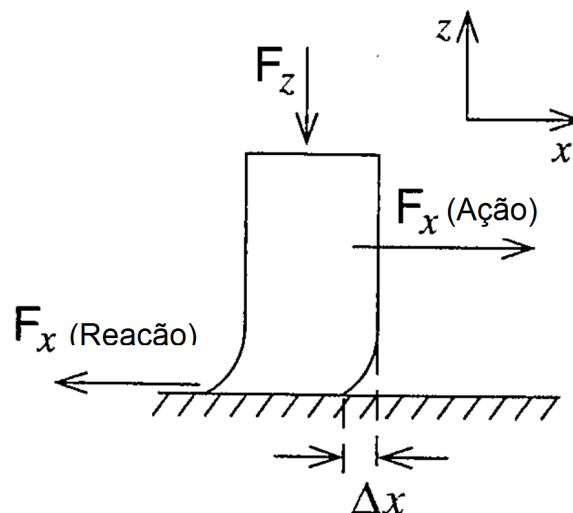
A redução da força de arrasto permite algumas modificações que aumentariam ainda mais a eficiência energética de um veículo como reduzir a potência do motor, devido a menor exigência, consequentemente diminuindo tamanho e peso, uso de uma melhor relação de transmissão já que menor torque irá ser exigido (STONE, 2004).

2.6 Efeitos da sustentação

Os impactos da força de sustentação sobre um veículo estão relacionados com a estabilidade, principalmente em curvas como será demonstrado nessa secção, nessa questão seu efeito pode ser positivo ou negativo dependendo de seus valores, embora a força de sustentação possua uma importância maior em veículos de competição e melhores resultados são buscados de maneira extensiva, em automóveis de passeio e comerciais seus resultados deve necessitam ser avaliados a fim que não prejudiquem a dirigibilidade.

Apesar de um veículo ser um sistema complexo, formado por diversos outros subsistemas que determinam seu comportamento, todo seu contato com o solo é realizado através dos pneus, portanto é possível fazer uma análise qualitativa de sua capacidade de realizar curvas e suportar cargas laterais apenas pela interação pneu solo.

Figura 14 – Forças atuando no contato entre pneu e solo.



Fonte: Adaptado (GILLESPIE, 2004)

A Figura 14 demonstra um esquema de como acontece a interação entre o pneu solo e a carga lateral. F_z representa a força normal sobre os pneus, que desconsiderando os efeitos de sustentação equivale somente ao peso do veículo dividido entre as rodas, δx é a deformação resultante no pneu, que gera, F_x a força de ação, ela determina a capacidade do veículo de realizar curvas ou cargas laterais, por exemplo ventos cruzados, criadas pelo ambiente ou outros veículos.

O valor de de F_x pode ser definido através da Equação 2.8, onde λ é o coeficiente de atrito entre o pneu e o solo, e a força normal F_z . Considerando que λ é constante, pois resultado da combinação do pneu com o tipo de solo, molhado, asfalto, terra etc. Logo analisando esses aspectos a carga lateral é determinada pela força

normal,

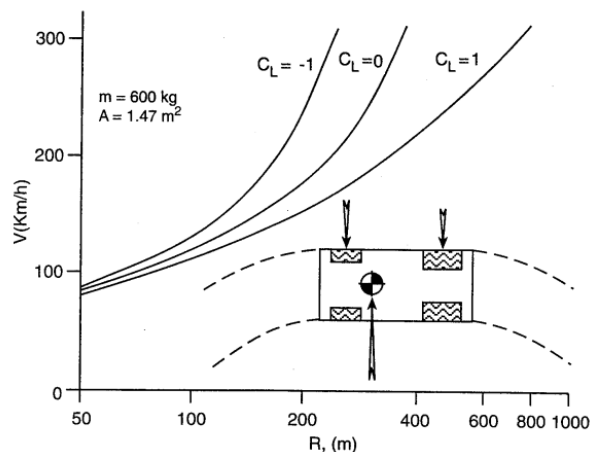
$$\lambda = \frac{F_x}{F_z} \quad (2.8)$$

Porém apesar da conclusão a respeito de F_x , é necessário atentar que embora aumentar a massa de um veículo resulte em um maior F_y , também eleva a carga lateral necessária para que o veículo possa realizar uma curva, a Equação 2.9, mostra que a força necessária para mover um corpo é proporcional a massa.

$$F = m \cdot a \quad (2.9)$$

A maneira encontrada para contornar o problema e aumentar a força normal nos pneus sem aumentar a massa do veículo, é projetá-los de maneira que possuam um coeficiente de sustentação negativos, aumentando a capacidade de realizar curvas, como é demonstrado na Figura 15. O gráfico mostra que C_l limita a velocidade com que o automóvel consegue realizar curvas. Outro ponto importante é que assim como o arrasto o efeito da sustentação é intensificado em altas velocidades (KATZ, 1995).

Figura 15 – Curvatura e velocidade de curva e acordo com C_l .



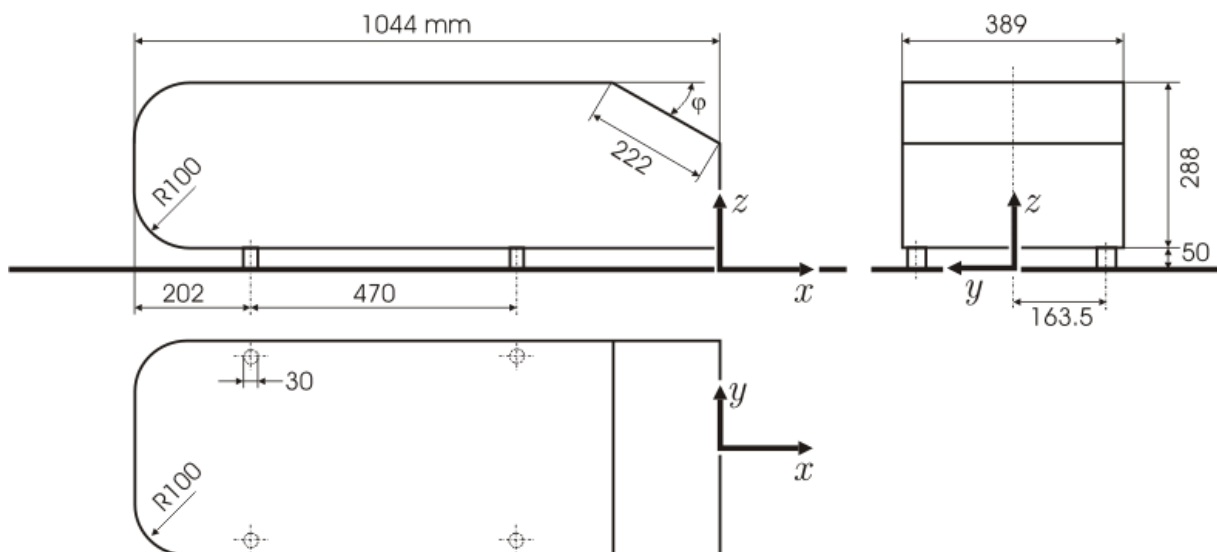
Fonte: Adaptado de (GILLESPIE, 2004)

2.7 Geometria de referência de Ahmed

Também conhecido como corpo Ahmed, uma geometria simplificada de um veículo de passeio, que busca ressaltar características importantes para estudos aerodinâmicos. Como o ângulo φ , essa geometria foi proposta por Syed R. Ahmed, e recentemente tem sido foco de vários testes numéricos. A principal característica do corpo de prova e a usada na investigação feita nesse trabalho é o ângulo de saída

mostrado no desenho construtivo da Figura 16 com o ângulo φ .

Figura 16 – Desenho construtivo do corpo de Ahmed.



Fonte: Retirado do Site (ONLINE, 2017a)

Embora seja uma geometria simplificada o ângulo φ representa de maneira satisfatória condições do escoamento em veículos do estilo *hatchback*, assim como em veículos de carga como ônibus e caminhões presente na maior parte da indústria automotiva. A importância desse parâmetro é sua influência sobre o comportamento aerodinâmico do veículo, sendo responsável por influenciar grandemente as forças de arrasto, sustentação e momento de guinada.

Este trabalho analisa a geometria em diversos ângulos usando variações numa faixa entre 0° e 60° , a velocidade usada pelos experimentos é de 40 m/s. Se pretende analisar principalmente a diferença do arrasto e sustentação em cada ângulo de inclinação da superfície traseira. Além de realizar comparações visuais sobre o comportamento do escoamento e formação de vórtice em cada caso através da ferramenta computacional de pós-processamento, que será melhor explicada nas seções seguintes.

2.8 Resultados disponíveis

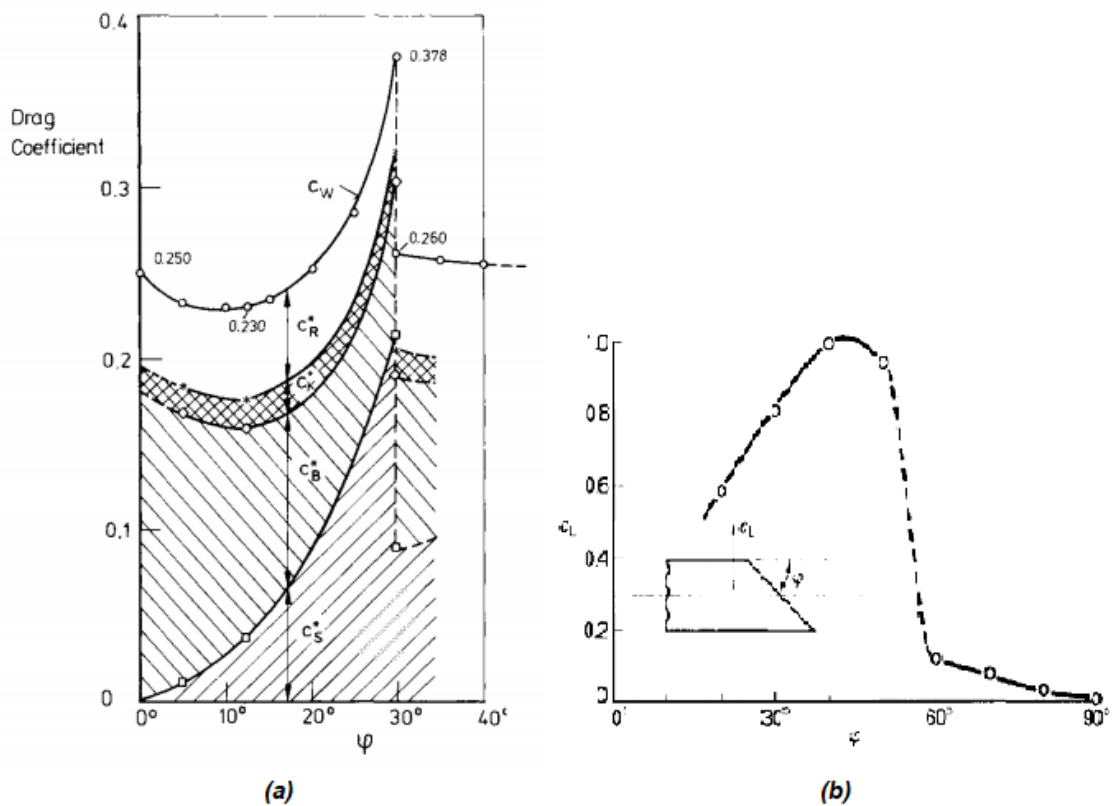
Pelo motivo do corpo de Ahmed se tratar de uma geometria amplamente estudada e com diversos resultados disponíveis, é usada por muitos alunos para testar a capacidade de simular escoamentos complexos e comparar os resultados obtidos com os disponíveis na literatura.

Como referência para os resultados obtidos nas simulações serão utilizados, experimentos realizados nessa geometria, através de testes em túneis de vento, cujo

os resultados obtidos são encontrados em (HUCHO, 1986), incluindo valores do arrasto e sustentação e características descritivas do escoamento.

Parte dos resultados quantitativos obtidos por Ahmed podem ser encontrados na Figura 17 mostrando a variação do coeficiente de arrasto de acordo com a variação do ângulo φ . O comportamento observado são baixos valores de coeficiente de arrasto na região de $\varphi = 15^\circ$, atingindo o menor valor de $C_d = 0,23$. Após essa região de baixa há um aumento no coeficiente de arrasto atingindo o valor máximo de $C_d = 0,378$ na região de $\varphi = 30^\circ$, seguido de uma queda acentuada até o valor de $C_d = 0,25$.

Figura 17 – Variação dos valores de C_d com o ângulo φ , obtidos em experimentos.



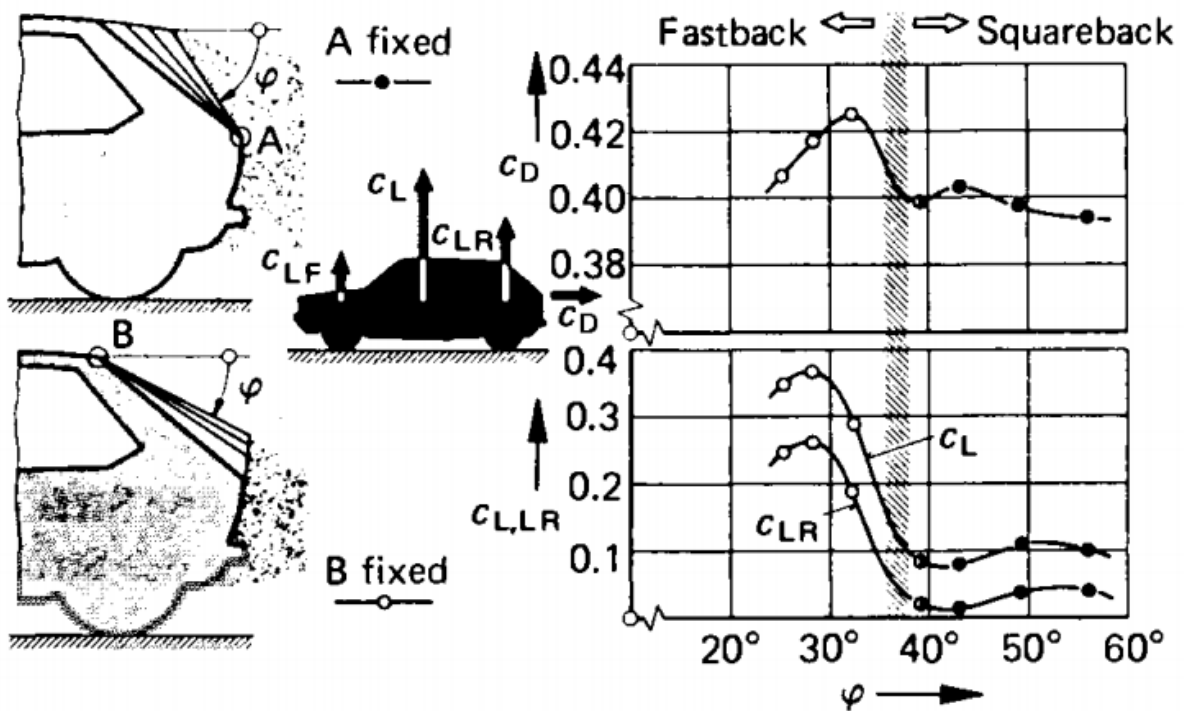
Fonte: Retirado de (HUCHO, 1986)

Analisando a Figura 17 que mostra o coeficiente de sustentação da geometria, é possível identificar um comportamento similar, porém com a região de máxima deslocada para ângulos maiores sendo o valor máximo de $C_l = 1,0$ na configuração de $\varphi = 45^\circ$, seguido igualmente de uma queda acelerada a medida que o ângulo de inclinação aumenta.

O resultado obtido também pode ser comparado com os obtidos em experimentos em veículo reais como os mostrados na Figura 18, resultados obtidos em testes no desenvolvimento do VW golf I. Apesar de quantitativamente não estarem próximos, apresenta o comportamento previsto por Ahmed, mostrando que os

conceitos aprendidos através dessa geometria são escaláveis para veículos reais.

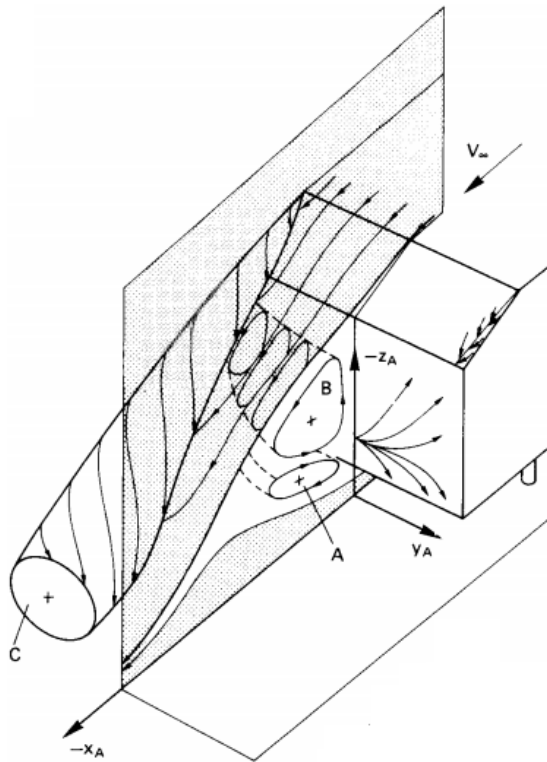
Figura 18 – Valores Obtidos através de modelos reais.



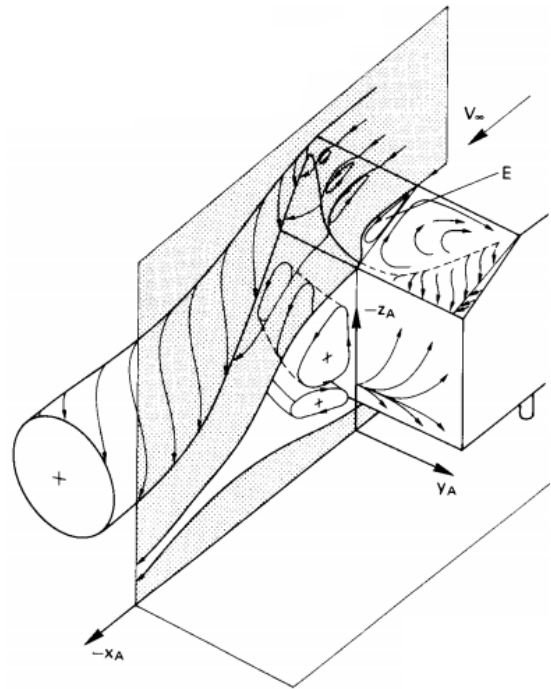
Fonte: Retirado de (HUCHO, 1986)

Existem também resultados qualitativos que descrevem o fluxo de ar através da geometria, que podem ser analisados pela Figura 19. A formação de vórtice ocorre principalmente por um conceito já explorado na secção sobre turbulência, o contato do escoamento a baixa velocidade na parte traseira do veículo com a o escoamento à alta velocidade pelas laterais e tetos, cria uma região com diferença de velocidade relativa alta, induzindo os efeitos viscosos, turbulência e vórtice.

Figura 19 – Campos de escoamento na traseira do corpo de Ahmed para dois valores de inclinação da superfície traseira.



(a) Escoamento com baixo arrasto, ângulo da superfície inclinada $\varphi = 15^\circ$, três vórtices na traseira do corpo de Ahmed.



(b) Escoamento com alto arrasto, ângulo da superfície inclinada $\varphi = 30^\circ$, quatro vórtices na traseira do corpo de Ahmed.

Fonte: (HUCHO, 1986).

3 MÉTODO

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

3.1 Simulação numérica

Conforme já discutido nas seções anteriores, são grandes os esforços da indústria automotiva para compreender o escoamento ao redor de veículos, existindo uma tendência cada vez maior de substituir os testes em túneis de vento por simulações. A simulação numérica usada é baseada em mecânica dos fluidos, e por ser realizada usando ferramentas computacionais, é chamada de mecânica dos fluidos computacional ou simplesmente CFD. Esse tipo de simulação se baseia em calcular os campos de escoamento ao redor do veículo ou qualquer outro corpo, através de conceitos da mecânica dos fluidos devidamente implementados em um código computacional.

De acordo com o que já foi visto para determinar as forças aerodinâmicas em um veículo, é necessário calcular o campo de pressão e velocidades do escoamento em seu redor, que podem ser resolvidos através de equações, usualmente representados por equações diferenciais.

Dentre as equações usadas para descrever o escoamento, as mais comuns são as Equações 3.1 de Navier-Stokes, capazes de oferecer uma relação entre pressão, conservação do momento e forças viscosas, nas três dimensões.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3.1)$$

Outra equação que auxilia à resolver matematicamente um escoamento é a Equação 3.2 da continuidade, mostrada em sua forma genérica, representando a variação de uma propriedade do fluido α , de acordo com o fluxo dentro de um volume de controle, mostrado no termo $\nabla \cdot (\alpha \vec{v})$.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{v}) = s \quad (3.2)$$

Juntamente essas equações são capazes de fornecer os valores da pressão e velocidade em qualquer ponto do escoamento, porém, para serem aplicadas através

de métodos numéricos precisam ser discretizadas, usando por exemplo, o método dos volumes finitos, como será mostrado na Secção 3.2 (BARNARD, 2010). Desta forma, o conjunto das equações descritas acima juntamente com os métodos numéricos podem implementados em códigos ou programas computacionais, conhecidos como programas de CFD, capazes de resolver o escoamento de forma discreta, ou seja, fornecer informações de velocidade pressão em todos os pontos do domínio computacional, além das forças resultantes.

3.1.1 Simplificações

Na maioria dos casos algumas simplificações podem ou até mesmo devem ser assumidas para que seja possível solucionar o escoamento, isso ocorre por dois motivos, primeiro nem sempre há poder de processamento computacional suficiente para resolver o problema sem eliminar algumas variáveis, além deste outro motivo que incentiva essa pratica é que nem sempre existe a necessidade de considerar todos fatores para chegar ao resultado próximo o suficiente do real.

Uma grande simplificação utilizada é a remoção dos termos da viscosidade, que quando aplicada nas equações de Navier-Stokes resulta na equação de Euler, porém essa abordagem é incapaz de reproduzir o escoamento em regiões aonde os efeitos da viscosidade são relevantes, como na camada limite e regiões aonde existem gradientes de velocidades acentuados, como nas regiões turbulentas. Para contornar esse problema o escoamento é solucionado em duas etapas, na região aonde o escoamento é não víscido, e através de métodos especiais nas regiões aonde a simplificação não é possível. Demais simplificações utilizadas são, por exemplo, consideração de fluido incompressível. Esta consideração poderá ser feita de acordo com a velocidade do escoamento (ou variação da massa específica), conforme já mencionado na Secção 2.1.1. A última simplificação listada é a de regime permanente, que ignora os fenômenos transientes, matematicamente isso significa que a variação da massa dentro de um volume de controle deve ser zero, na Equação 3.2 para a massa o termo $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$ é constante.

3.1.2 Modelos de turbulência

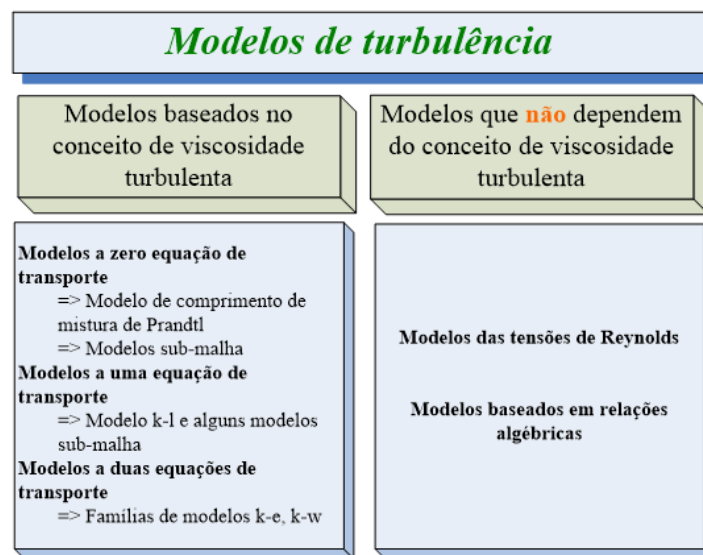
Foi citado na Secção 3.1.1, que em regiões especiais aonde os efeitos viscosos são importantes métodos secundários podem ser aplicados para resolver o escoamento, uma dessas regiões são as turbulentas, e os métodos alternativos são os modelos de turbulência.

Os modelos de turbulência são uma alternativa de baixo custo computacional uma vez que os modelos não víscido não são capazes de modelar o escoamento nessas regiões. A outra alternativa é o uso de *Direct Numerical Simulation* (DNS),

que resolve as equações em todas as escalas do escoamento exigindo uma malha extremamente refinada, o que representa grandes recursos computacionais, conforme mostrado na Figura 21a DNS é utilizado para resolver todas as escalas do escoamento. Existem métodos intermediários conhecidos como *Large Eddy Simulation* (LES) que apenas resolvem as maiores escalas conforme mostrado na Figura 21b aproximando as menores escalas de turbulência através de constantes matemáticas ou submodelos. A técnica de resolução DNS e LES torna-se muitas vezes inviável ou desnecessária uma vez que modelos de turbulência são capazes de fornecer resultados, bons o suficiente para a solução de muitos problemas a um custo computacional muito menor.

Em termos de modelagem da turbulência, existem dois grandes grupos de modelos, aqueles baseados no conceito de viscosidade turbulenta, e aqueles que não dependem do conceito de viscosidade turbulenta, conforme mostrado na Figura 20, Cancino (2016¹)

Figura 20 – Classificação dos modelos de turbulência.

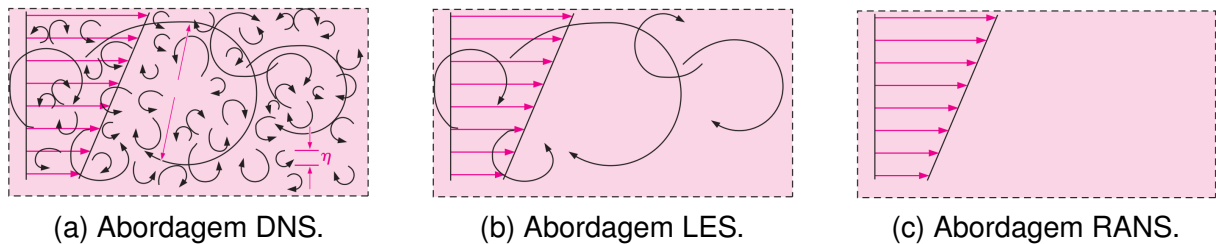


Fonte: Cancino (2016)

Dependendo da resolução da malha computacional, o conjunto de equações discretizado poderá capturar (ou não) as diferentes escalas de turbulência, dependendo da metodologia utilizada, conforme mostrado na Figura 21c.

¹ CANCINO, L. R. Notas de Aula. Aerodinâmica Veicular. Curso de Engenharia Automotiva. Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville. 2016.

Figura 21 – Abordagens dos modelos de turbulência.



Fonte: (ÇENGEL, 2015)

Existem vários modelos de turbulência disponíveis, classificados de acordo com o método utilizado para representar as diferentes escalas de comprimento, modelos a uma ou duas equações de transporte ($k - \varepsilon$ e $k - \omega$ e as suas variantes), modelo das tensões de Reynolds, etc. Nesses modelos as equações propostas servem para calcular a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta principalmente

É importante enfatizar que o desenvolvimento desses modelos utilizou várias constantes matemáticas calibradas através de DNS e testes empíricos, em escoamentos característicos, portanto nenhum modelo de turbulência é universal, isso significa que os modelos irão funcionar bem para as situações próximas das quais foram calibrados (ÇENGEL, 2015).

O modelo de turbulência aqui escolhido é o modelo $k - \varepsilon$ Realizável, uma variação da versão padrão que é considerada uma das mais utilizadas. Nesse modelo as duas equações servem para calcular a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação da energia cinética, com boa precisão em escoamentos com baixos gradientes de pressão (ONLINE, 2017b).

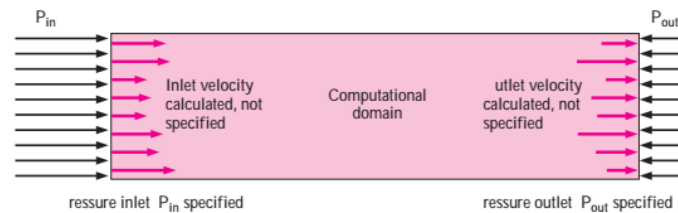
O modelo escolhido, pode ser encontrado descrito como RNG $k - \varepsilon$, possui novas equações para a turbulência viscosa permitindo melhores resultados em situações com escoamentos rotacionais, camadas limites com gradiente de pressão adverso, separação e recirculação (ANSYS,INC, 2015).

3.2 Domínio computacional

Os fenômenos e equações apresentados até então, foram descritos para o meio contínuo, pois é a maneira que ocorrem nos casos reais, porém ao realizar uma simulação é preciso definir o domínio computacional, o qual representa a região no espaço na qual irão ser resolvidas de forma discreta o conjunto de equações de transporte. Esta região é então dividida em pequenas porções (volumes de controle) nas quais são resolvidas de forma algébrica as equações de conservação previamente discretizadas. O domínio computacional depende fortemente do fenômeno que se pretende analisar, no caso da aerodinâmica veicular o domínio computacional

representa o próprio túnel de vento, conforme mostrado na Figura 22.

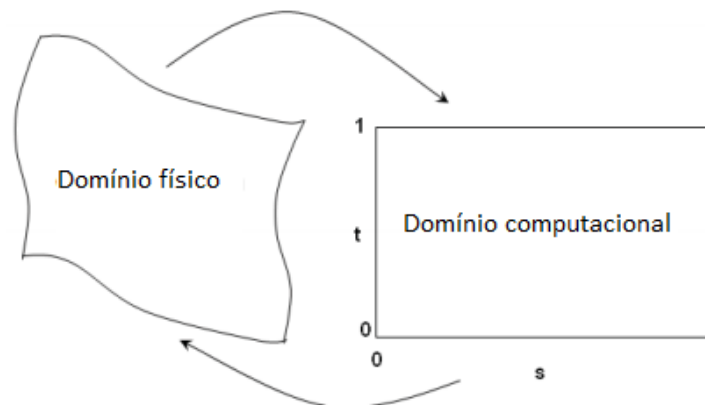
Figura 22 – Demonstração do domínio da simulação.



Fonte: (ÇENGEL, 2015)

Desta forma o domínio da simulação requer além da determinação do espaço, uma discretização do espaço, que constitui em dividir o meio contínuo em blocos, ou como escrito anteriormente, em volumes de controle. Essa divisão pode ser descrita como domínio computacional conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Comparação entre o domínio físico e computacional.



Fonte: Adaptado de (SAYMA, 2009)

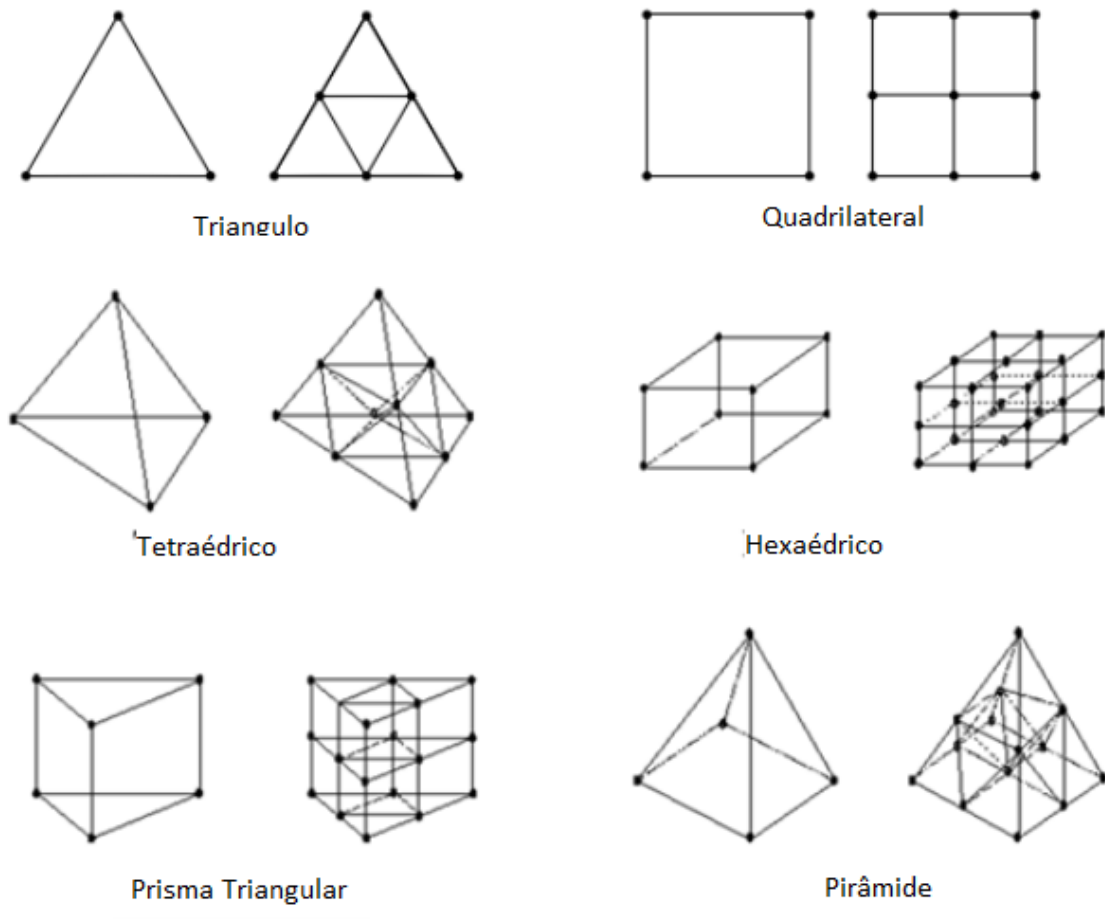
Esta discretização, descrita no paragrafo anterior, se chama malha e é um dos fatores mais importantes em uma simulação numérica, ela pode definir entre bons resultados e resultados incoerentes e ainda mais a geração de malha está relacionada diretamente com o custo computacional necessário para realizar a simulação e considerando que para essa etapa não existem muitas normas, dependendo grandemente da experiência e criatividade do usuário, sabendo que tempo computacional é um recurso finito em diversos casos.

3.2.1 Tipo de malha

Diversos tipos de elementos podem ser utilizados para efetuar o procedimento descrito como geração de malha. Entre os tipos de elementos mais conhecidos para

os casos 3D temos tetraédricos, hexaédricos e prismáticos, mostrados na Figura 24.

Figura 24 – Possíveis formas geométricas que podem ser usadas como elementos de uma malha.



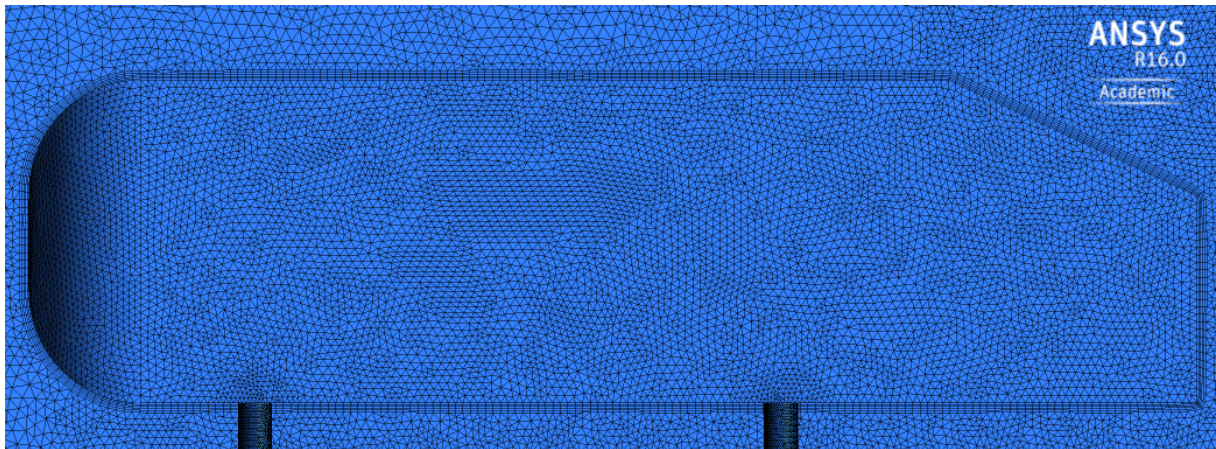
Adaptado de (ANSYS,INC, 2015)

O tipo de elemento escolhido para as simulações foi o tetraédrico, por estar associado a um custo computacional menor quando comparado aos outros, estando de acordo com os recursos computacionais disponíveis e o grande número de simulações.

Quando é necessária uma malha de alta resolução em alguma parte do domínio, como as camadas limites, é possível obter uma melhor eficiência e qualidade, aplicando nessa região uma malha prismática, enquanto no restante outro elemento é aplicado, essa estratégia foi adotada conforme mostrado na Figura 25. Essa técnica está associada a dois fatores, que os efeitos estudados possuem origem da interação do fluido com a superfície da geometria de referência e, interface do fluido com o sólido geram condições mais complexas de serem previstas, portanto os modelos de turbulência deixam de ser aplicados e, passam a ser usados métodos mais eficazes

para a condição de não escorregamento e camada limite presentes (ANSYS, INC, 2015).

Figura 25 – Tratamento da malha em regiões de parede de interesse.



Autor (2017)

3.2.2 Estratégia de geração de malha

Todo problema a ser analisado, em seu domínio possui sua região de interesse. Essa região é caracterizada tanto por conter o local de onde se pretende realizar as análises, quanto por apresentar um comportamento mais complexo que o restante, por tanto a malha deve ser pequena o bastante nessa região para descrever todos os efeitos físicos que ocorrem nela, o quão pequeno ela precisa ser irá ser abordado na secção sobre o estudo de independência de malha.

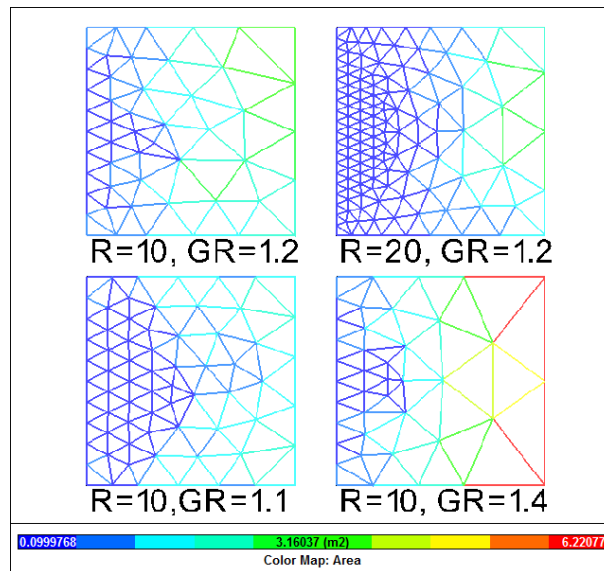
A questão que precisa ser levantada é que sabendo que quanto maior o refino consequentemente maior o número de elementos e o custo computacional envolvido. Portanto refinar todo o domínio computacional, no mesmo tamanho de malha que a região de interesse, torna-se o problema inexecutável ou incapaz de atingir os resultados esperados.

A necessidade de refinar a região de interesse, não ocorre apenas pela necessidade de obter informações mais precisas nela. Porém pela própria natureza do escoamento que no campo distante ao corpo apresenta comportamento pouco ou não turbulento, que pode mais facilmente ser descrito por uma malha menos refinada.

Os softwares utilizados neste trabalho, assim como a maioria dos geradores de malha disponíveis, apresentam alguns modos de realizar essa tarefa, a taxa de crescimento se refere à proporção máxima que elementos vizinhos podem possuir de diferença em área ou volume no caso tridimensional, significa que analisando uma malha aonde a taxa foi definida como 1,1, olhando para um elemento de volume 1 mm^3 , o maior tamanho permitido para elementos vizinhos a ele seria de $1,1 \text{ mm}^3$. E

assim conseqüentemente de forma que toda transição entre regiões com tamanhos de malha especificados sejam limitados por essa taxa, assim como mostrado na Figura 26 Lanfrit (2005).

Figura 26 – Demonstração da influencia da taxa de crescimento sobre a malha.



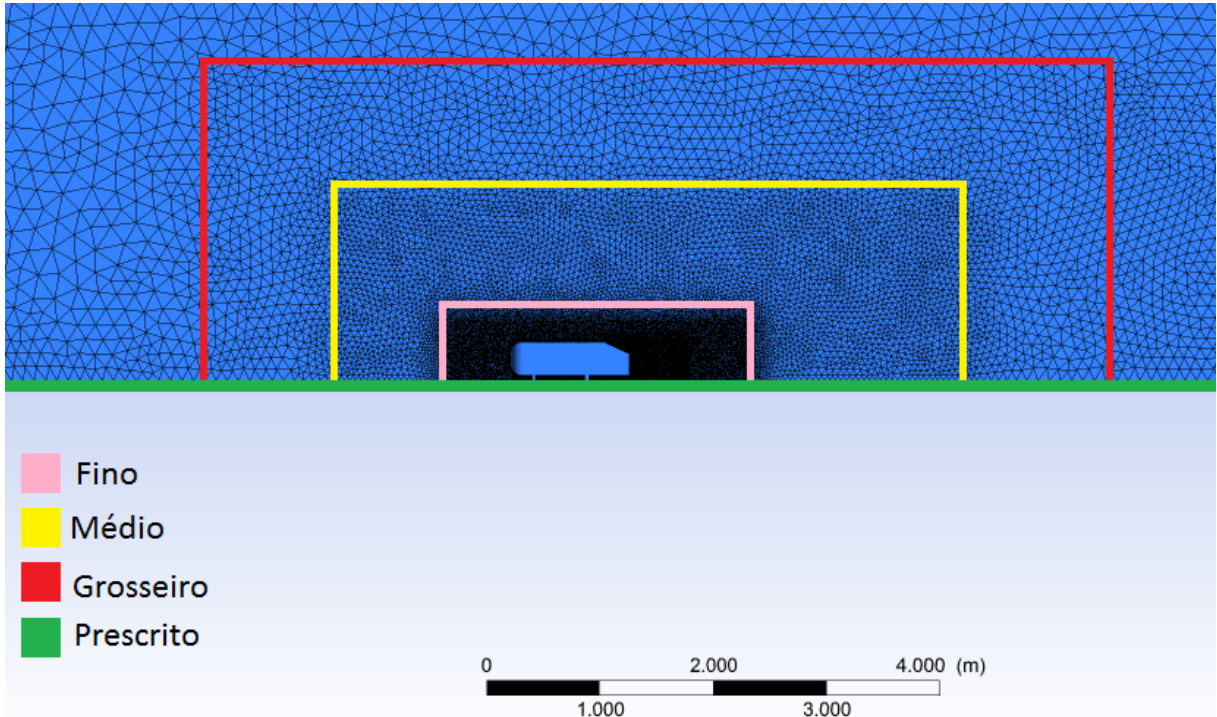
Fonte: (SYMSCAPE, 2017)

Este tipo de controle é muito importante, porém apenas em casos simples ele é o suficiente para resolver o problema. Durante os experimentos ele foi mantido na configuração padrão apenas para evitar erros que podem ocorrer nessas transições de tamanho.

O controle do tamanho da malha nos experimentos, se deu basicamente prescrevendo tamanhos de grãos à volumes de controle e superfícies. Estes volumes de controle são blocos adicionados à geometria do veículo, porém determinados como regiões vazias que não influenciam o domínio fluido, portanto invisíveis ao escoamento, porém eficientes para determinar o tamanho e tipo de malha gerada em seus interiores. Esse tamanho atua como um alvo nem todos os elementos dentro da região ou superfície possuem o mesmo tamanho, pois outras regras precisam ser obedecidas como a taxa de crescimento.

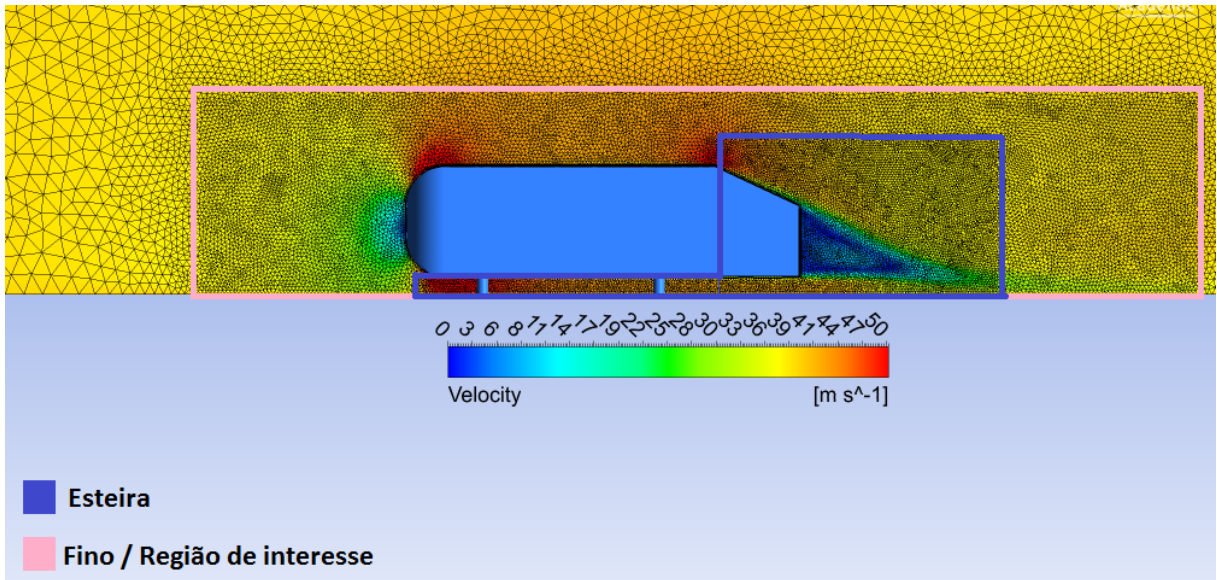
Os volumes e superfície prescrito estão mostrados nas Figuras 27 de uma maneira global e na região de interesse na Figura ?? nesta imagem é possível ver o resultado de uma simulação mostrando o perfil de velocidade sobre a malha. Desta maneira é possível analisar que a malha mais refinada se restringe à região de maior perturbação, é importante lembrar que os níveis de refinação foram definidos através do estudo de independência de malha, o tamanho dos elementos de malha obtidos estão dispostos na Tabela 2.

Figura 27 – Volumes de controle para determinação do refinação de malha.



Fonte: O Autor

Figura 28 – Região de interesse e região aonde ocorre maior perturbação no escoamento.



Fonte: O Autor

Tabela 2 – Identificação dos tamanhos da malha nas regiões mostradas na Figura ?? e 27

Região	Refinamento(tamanho de elemento)
Grossoiro	100mm
Médio	50mm
Fino	10mm
Esteira	6,7mm
Corpo de Ahmed	6,7mm

Fonte: O Autor

3.2.3 Estudo de independência de malha

Como o esperado, uma simulação não fornece (usualmente) um resultado idêntico ao medido experimentalmente. Os erros surgem de diversas maneiras como as aproximações dos modelos de turbulência, erros numéricos e relativos à discretização, entre outros. A fim de minimizar esses erros, ao menos os relativos à discretização, realiza-se um estudo de independência de malha.

O método baseia-se em aumentar o refinação da malha, através de um fator de redução e executar as simulações, determina-se o resultado de interesse que pode ser uma pressão em um ponto ou velocidade, variando de acordo com o escopo do experimento. Naturalmente os resultados seguirão a tendência de mudança convergindo para um valor, caso haja um valor de referência ele pode auxiliar a conduzir o estudo. Sabendo que refinar a malha implica em aumento do número dos elementos de maneira exponencial x^3 segundo Çengel (2015), se define um alvo para ser alcançado. Esse alvo pode ser um erro em relação à referência ou um erro em relação ao estado anterior mostrando que mesmo com refinação adicionais os resultados não irão mudar significativamente em relação ao erro estabelecido pelo usuário.

Ao aplicar o método algumas considerações foram feitas, a maioria delas baseadas no fato de que os experimentos foram realizados no limite da capacidade computacional disponível, o refinamento do campo distante não foi alterado. Apesar de muitas fontes citarem um fator adequado como sendo 2, este aumenta o custo computacional em 8 vezes, tornando as simulações impraticáveis muito rápido, portanto o fator de 1,5 foi adotado. O parâmetro ou resultado de referência é o experimental, mostrado em na Tabela 3, entretanto utilizado apenas como guia, sendo principal critério o erro em relações a interações anteriores (NASA, 2016).

Outro aspecto importante do estudo de independência de malha nesse trabalho é que diversas geometrias e condições de escoamento serão analisadas, caso malhas diferentes fossem utilizadas não poderíamos distinguir entre diferenças nos valores oriundo das diferenças geométrica ou de malha, portanto foi tido a preocupação de realizar o estudo para duas geometrias $\varphi = 20^\circ$ e $\varphi = 35^\circ$ e teoricamente descrevem

dois escoamentos em condições diferentes.

Tabela 3 – Alguns valores com suas respectivas reduções no refino da malha.

Dimensão	$C_d \varphi = 20^\circ$	$C_l \varphi = 20^\circ$	$C_d \varphi = 35^\circ$	$C_l \varphi = 35^\circ$
15mm	0,271	0,233	0,327	0,237
10mm	0,252	0,234	0,275	0,110
6,7mm	0,247	0,239	0,279	0,080

Fonte: O Autor

Malhas foram geradas utilizando as duas geometrias mencionadas, e obtiveram sua refinação de acordo com a escala descrita na Tabela 3 obedecendo o padrão de 1,5 vezes o tamanho entre elas, podendo ser observado que conforme o tamanho da malha foi sendo reduzido o resultado se aproximavam dos resultados experimentais conhecidos, e se tornaram menores entre si, o erro foi definido como a diferença entre os valores medidos de uma malha para outra ficando a baixo de 5 % para todos os casos exceto para o coeficiente de sustentação da geometria de $\varphi = 35^\circ$ que permaneceu em torno de 20 %, apesar de apresentar esse erro, os resultados foram considerados satisfatórios devido a proximidade com os resultados experimentais foi decidido prosseguir com os experimentos, utilizando a malha de 6,7 mm na região mais refinada.

3.3 Setup

Apesar de alguns resultados já haverem sido mostrados nas secções anteriores, nada foi comentado sobre o modulo de solução do ANSYS-FLUENT utilizado e a configuração adotada para a realização das simulações como já comentado por ser um software comercial, oferece uma facilidade maior para o processo de definir o tipo, configurações e parâmetros de uma simulação. A escolha do software foi devido à disponibilidade através da universidade e do amplo material disponível a respeito em artigos e manuais.

Alguns requisitos, simplificações e características da simulação já foram apresentados de modo geral, porém o processo de detalhar a configuração feita no software é importante para facilitar a compreensão ou até mesmo reprodução dos experimentos realizados. Fazem parte das etapas da solução escolha de modelos e considerações físicas, definição de condições de contorno, esquemas de solução e pós-processamento.

3.3.1 Modelos físicos

Com os modelos de energia e acústica entre outros desligados o único modelo utilizado foi para a viscosidade e conseqüentemente turbulência do problema, o modelo $k-\epsilon$ realizável com funções de parede de não equilíbrio. Os materiais utilizados foram os padrões para testes aerodinâmicos, ar em condições ambientes, nos sólidos a única propriedade que influenciaria os resultados são a rugosidade que foi mantida como padrão, similar às dos corpos de prova.

Para resolver o escoamento na região de parede, foi utilizado funções de parede com a opção de não equilíbrio, as quais usam funções que definem o perfil de velocidade na região de parede, permitindo que o primeiro ponto ou nodo da malha computacional fique um pouco “ afastado ” da parede, diminuindo de esta forma a demanda de recursos computacionais na região da parede. Escolheu-se a opção de função de parede em não equilíbrio, pois são utilizadas para escoamentos com forte separação e gradientes adversos de pressão elevados. Cancino (2017²).

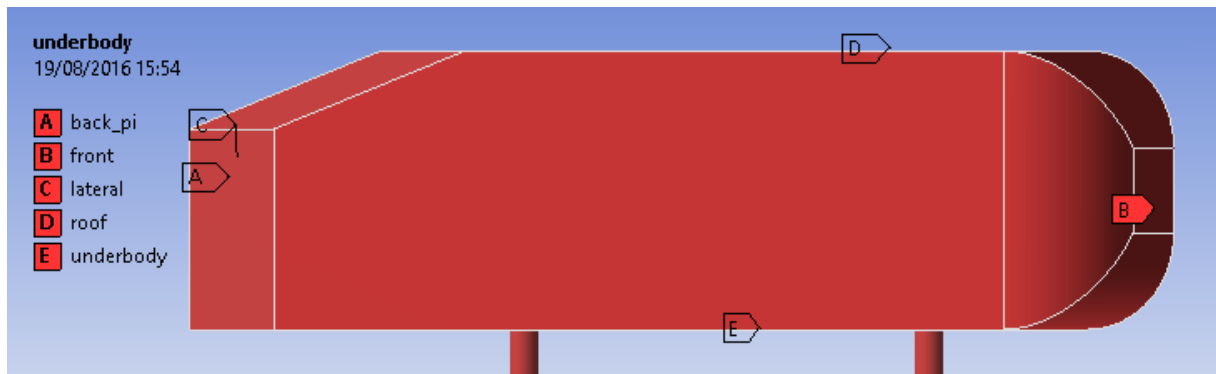
3.3.2 Condições de contorno

As condições de contorno definidas foram, parede com condição de escorregamento para o corpo de prova ressaltando que ele foi partido em diversas faces como mostrado na Figura 29, a fim de possibilitar aferir as propriedades do escoamento em cada uma delas, no solo usualmente se usa uma condição chamada de parede em movimento com velocidade igual a de corrente livre, essa manobra torna nula a diferença de velocidade entre a face e o fluido, impedindo que efeitos relacionados ao desenvolvimento da camada limite se propaguem.

A corrente livre é definida pela entrada do fluido no domínio, que nesse caso é ar a 40 m/s perpendicular a face de saída com uma intensidade turbulenta de 10 %, esse nível é equivalente a uma condição atmosférica que encontramos em ruas ou estradas, (HUCHO, 1986). Demais condições de contorno não apresentam diferenças da usual saída do fluxo a pressão manométrica nula e simetria nas faces laterais conforme mostrado na Figura 30.

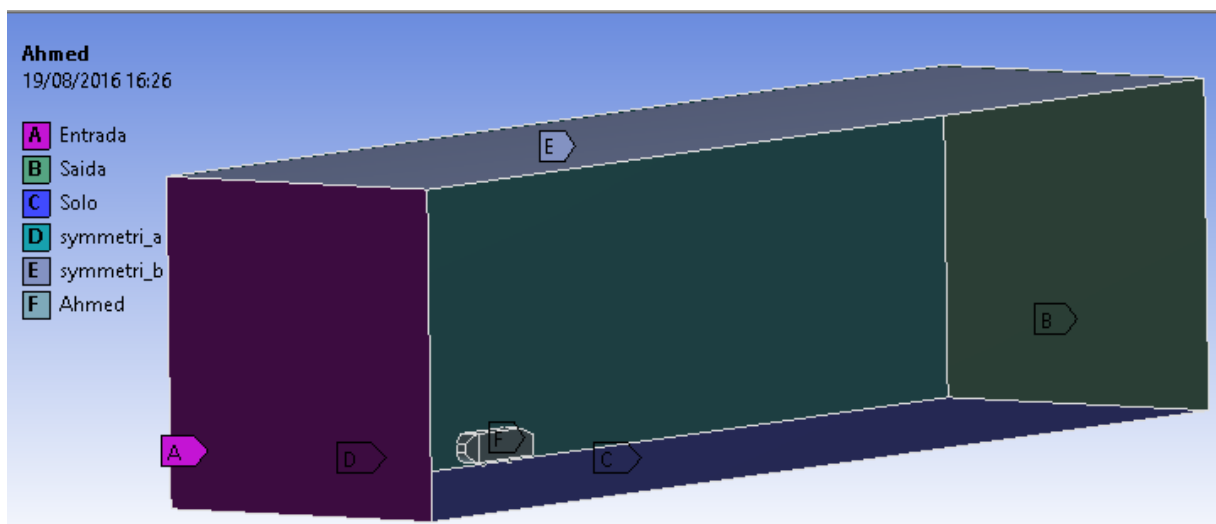
² CANCINO, L. R. Notas de Aula. Dinâmica de fluidos computacional aplicada. Curso de Engenharia Automotiva. Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville. 30 out. 2017.

Figura 29 – Divisão do corpo de Ahmed em A. posterior, B. Frente, C. Lateral, D. teto e E. baixo.



Fonte: O Autor

Figura 30 – Condições de contorno estabelecidas no domínio da simulação.



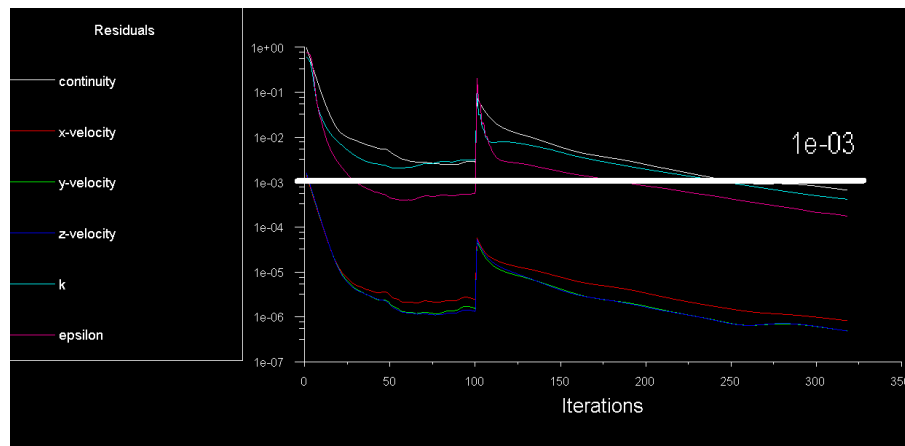
Fonte: O Autor

3.3.3 Solver

Sobre os métodos de solução é importante dar ênfase naqueles que podem influenciar os resultados finais, durante as soluções foi empregada a manobra de utilizar um método mais simples de resolução nas primeiras 100 interações seguido de um método mais complexo até a convergência, o efeito desse procedimento pode ser visto no gráfico de residuais. A resolução de primeira ordem é menos precisa, porém boa o bastante para um chute inicial, assim quando a solução é passada para uma de segunda ordem existe apenas a necessidade de realizar um refinamento dos resultados até a convergência.

A respeito dos critérios de convergência, como já comentado devido a precisão alta esperada dos resultados, foi necessário utilizar critérios rigorosos através de testes que compararam a variação dos parâmetros de C_d e C_l a cada interação com os erros esperados nos experimentos, para certificar que os erros resultantes da convergência não afetassem os resultados e estudo de independência de malha, sendo determinado como convergência todos os resultados abaixo de 10^{-3} como mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Gráfico mostra residuais para as equações de continuidade, velocidade, κ e ε . Em branco linha mostra o limite de dos valores 10^{-3} .



Fonte: O Autor

4 RESULTADOS

4.1 Análise dos resultados

Nessa seção serão discutidos os resultados das grandezas medidas durante os experimentos sendo, elas a força de arrasto e de sustentação do veículo, apresentadas na sua forma adimensional dos já explicados C_d e C_l , lembrando que estão ligados diretamente com a eficiência energética de um veículo e sua estabilidade em pista, devendo ser levados em conta em um projeto veicular de acordo com as prioridades do veículo em questão.

Os valores que serão usados para realizar as considerações estão disponíveis por forma de dois gráficos que trazem os valores de C_d e C_l conforme o ângulo φ do corpo de Ahmed, os resultados obtidos estão expressos através dos pontos porém uma interpolação entre eles foi utilizada para uma melhor compreensão da tendência do comportamento.

4.2 Valores obtidos

O primeiro gráfico mostrado na figura 32 possui os resultados experimentais realizados em túnel de vento por Ahmed em 1986 e os resultados obtidos através das simulações, esse gráfico é importante pois apesar das diferenças entre o experimental e o numérico é possível fazer duas observações, primeiramente que os resultados obtidos são razoáveis uma vez que essa diferença não é incoerente, inclusive são desprezíveis na faixa entre $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 25^\circ$. A segunda observação é que a tendência se manteve, fato de extrema importância já que garante um estudo qualitativo.

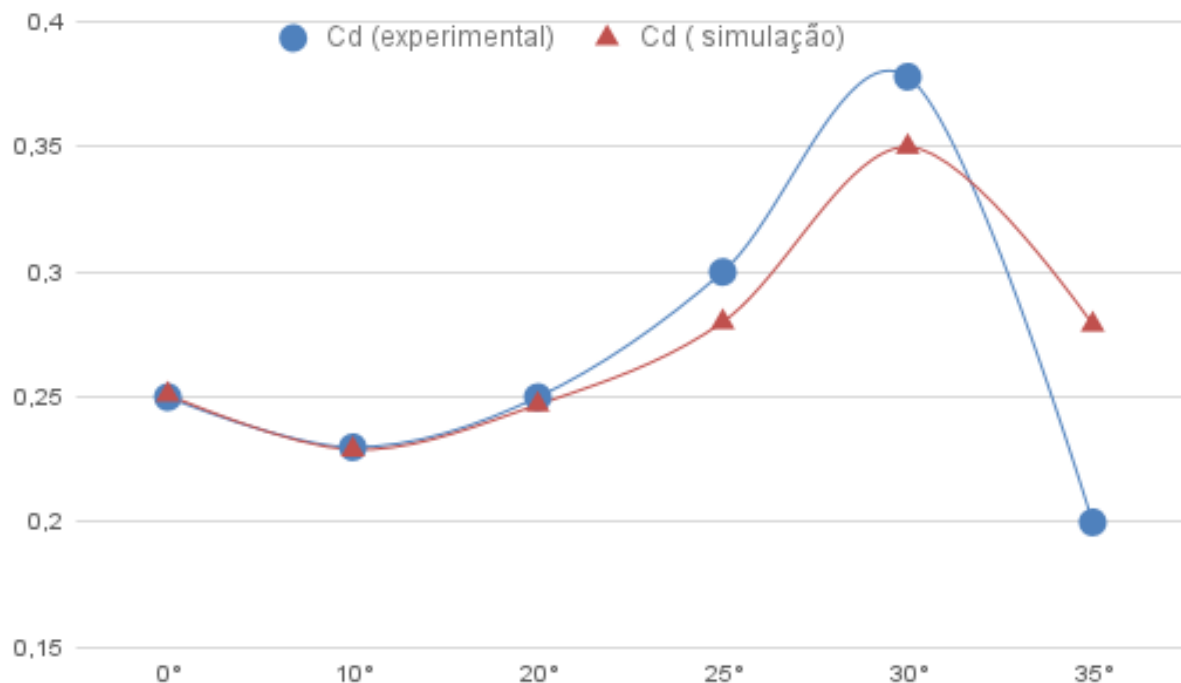
As diferenças constatadas entre os resultados em túnel de vento e numéricos podem ter origem na simulação como erros numéricos, erros devido a malha e modelagem entre outros. Porém acompanhado dos erros citados essa discordância possui outra explicação, que é a imprecisão do próprio experimento, teste em túneis de vento podem apresentar resultados diferentes de acordo com equipamentos usados, condições de operação, porém esse tipo de informação sobre o erro que os dados experimentais poderiam apresentar não estavam disponíveis na literatura.

Os dados dos experimentos estão disponíveis em forma de um gráfico disponível em Hucho (1986). Os valores que foram admitidos após a leitura do gráfico estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores obtidos através de análise visual do gráfico citado.

φ	C_d Tunel de vento	C_d Simulação	erro(%)
0°	0,250	0,251	0,40
10°	0,230	0,229	0,43
20°	0,250	0,247	1,20
25°	0,280	0,280	6,66
30°	0,378	0,350	7,40
35°	0,260	0,279	39,50

Figura 32 – Comparação entre os resultados experimentais obtidos por Ahmed em 1986 e os resultados adquiridos por meio de simulação numérica.



Fonte: Autor (2017).

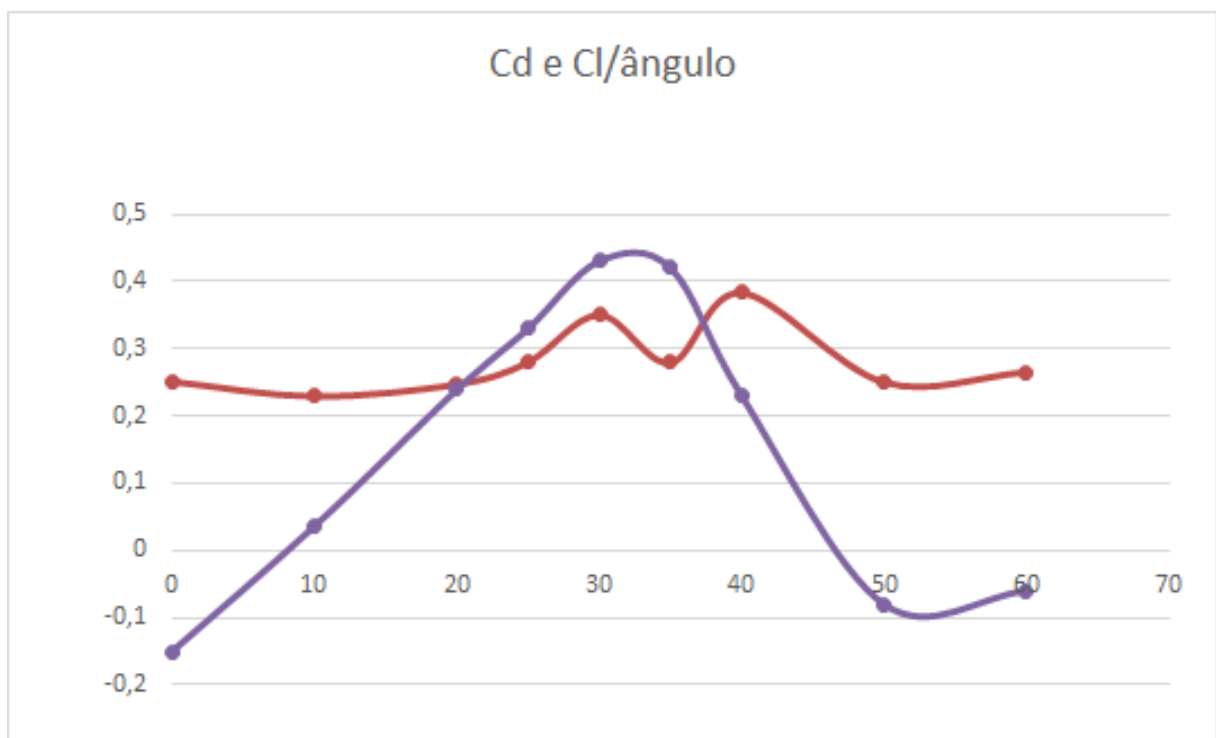
4.3 Comportamento de C_d e C_l

O segundo gráfico mostrado na figura 33, mostra todos os resultados obtidos por meio de simulação contendo na mesma imagem tanto o C_d como o C_l . A respeito do coeficiente de sustentação a primeira afirmação é a respeito da sua sensibilidade à variação geométrica facilmente se nota que a variação entre C_l é de 0,57 entre o ângulo $\varphi = 0^\circ$ a $\varphi = 35^\circ$ sendo no C_d a maior variação de 0,15, isso demonstra a importância de mesmo pequenas mudanças geométricas sobre o comportamento de um veículo. O projeto deverá considerar a importância de um baixo coeficiente de sustentação, terá no comportamento do veículo e escolher o ângulo baseado nessa decisão.

Analisando a variação do C_d observa que possui uma particularidade em relação à variação do C_l , excluindo o valor obtido em φ seria possível observar um comportamento muito mais parecido com o C_l se mantendo baixo nos ângulos próximos de 0° e 60° com um pico por volta do ângulo de 35° . Os fenômenos que resultam nisto serão discutidos na seção 4.4, o que podemos afirmar que utilizar veículos com ângulos φ pode ser perigoso pois qualquer outra pequena alteração pode fazer com que saia dessa região de baixo arrasto novamente para uma região de alto arrasto.

Analisando as duas informações em conjunto, não é possível afirmar que exista um ponto ideal, pois cada veículo possui necessidades diferentes, usualmente podemos afirmar que um veículo deseja um baixo índice de sustentação e arrasto, porém isso pode não ser verdade em alguns casos. Ficando em destaque a inclinação de $\varphi = 35^\circ$ pela sua potencial redução no arrasto, principalmente em casos aonde o alto C_l pode ser tolerado ou contornado de outras maneiras. Também podemos considerar ser uma geometria que mais se assemelha com veículos de passeio, já os ângulos de 0° , 10° , 50° e 60° possuem aplicação em veículos de transporte como ônibus e caminhões.

Figura 33 – Comportamento do C_d e C_l de acordo com a variação do ângulo φ .



Fonte: Autor (2017).

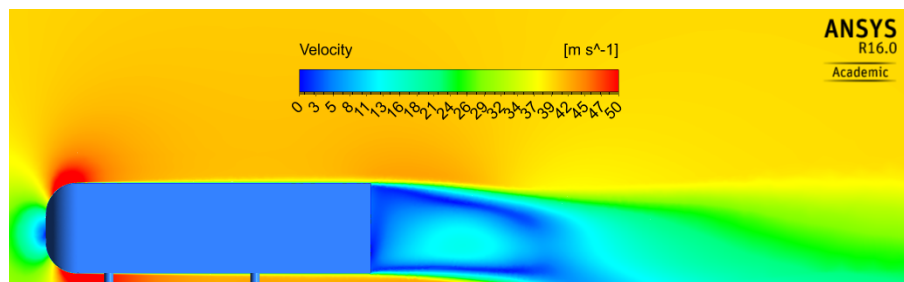
4.4 Análise do escoamento

Se tratando de uma análise visual, existem várias abordagens que poderiam ser utilizadas para estudar o escoamento tais como, o campo de pressão, velocidade, através dos vetores de velocidade, escala da energia cinética da turbulência, além de dispor em diversos ângulos e planos. Levando em conta o grande número de figuras que isso poderia criar o modo escolhido foi o campo de velocidade mostrados nas Figuras 34 a 42, expresso no plano de simetria XY. Conforme pode se observar os campos de velocidades estão representados de acordo com uma escala em m/s, variando entre 0° e 50° de acordo com o especificado nas figuras.

4.4.1 Perfis de velocidade

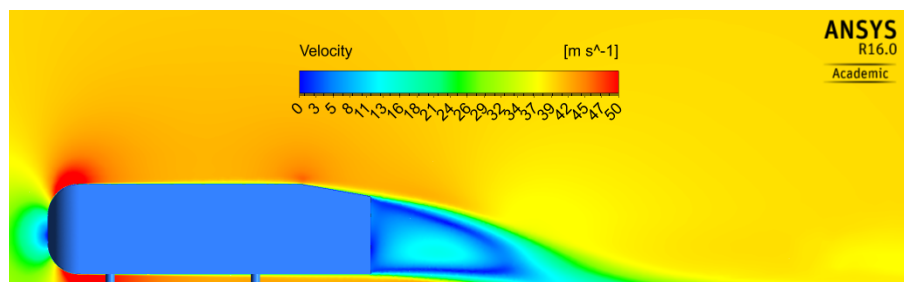
Essa seção apresenta as imagens que foram utilizadas durante as discussões.

Figura 34 – Escoamento no corpo de $\varphi = 0^\circ$.

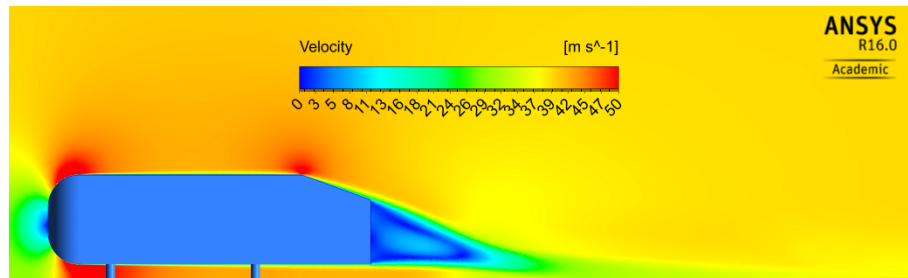


Fonte: Autor (2017).

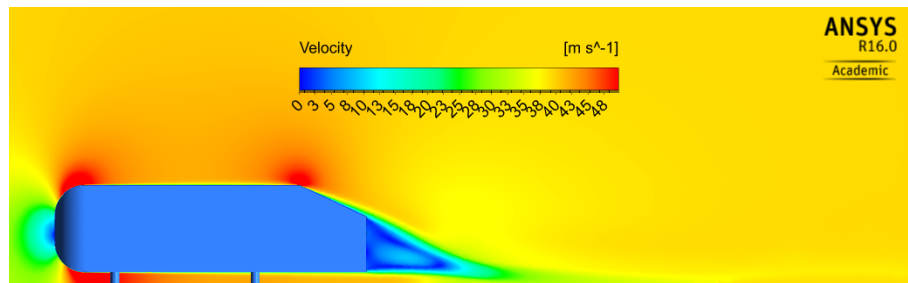
Figura 35 – Escoamento no corpo de $\varphi = 10^\circ$.



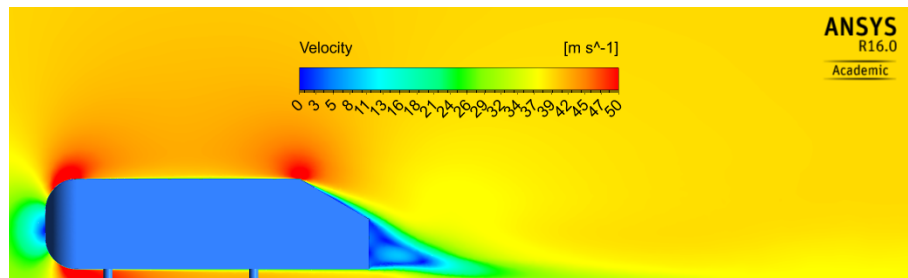
Fonte: Autor (2017).

Figura 36 – Escoamento no corpo de $\varphi = 20^\circ$.

Fonte: Autor (2017).

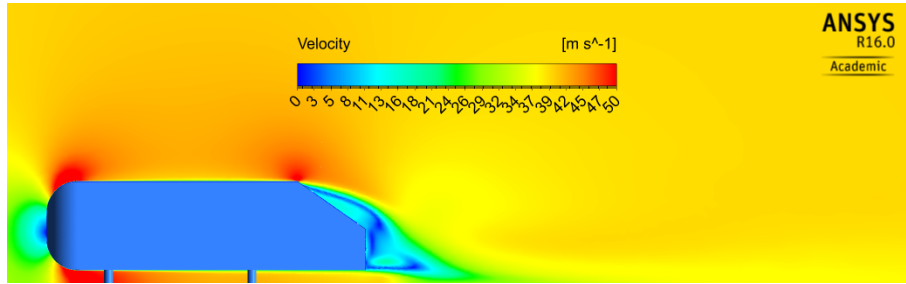
Figura 37 – Escoamento no corpo de $\varphi = 25^\circ$.

Fonte: Autor (2017).

Figura 38 – Escoamento no corpo de $\varphi = 30^\circ$.

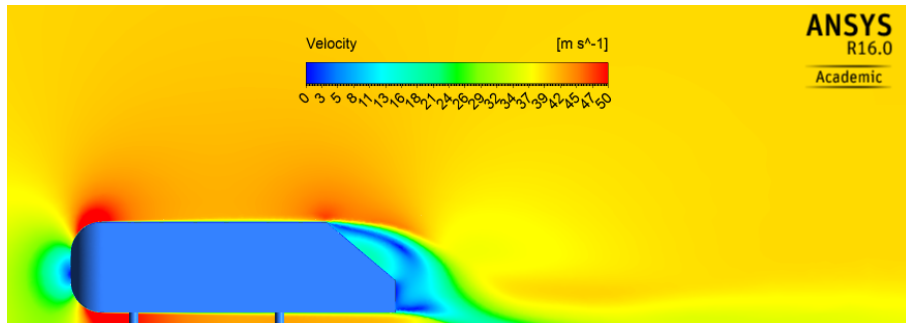
Fonte: Autor (2017).

Figura 39 – Escoamento no corpo de $\varphi = 35^\circ$.



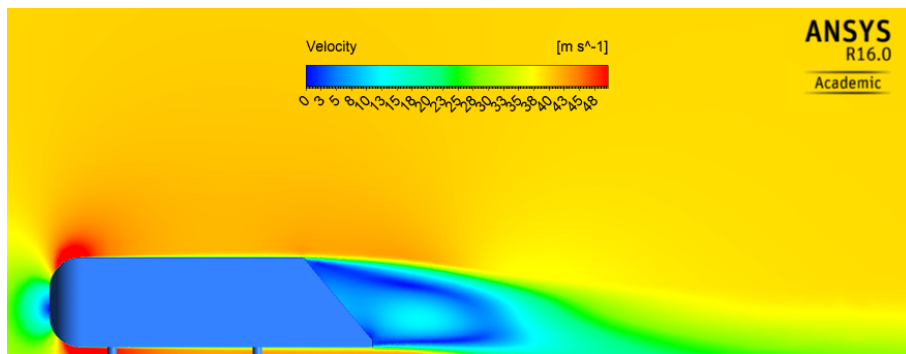
Fonte: Autor (2017).

Figura 40 – Escoamento no corpo de $\varphi = 40^\circ$.



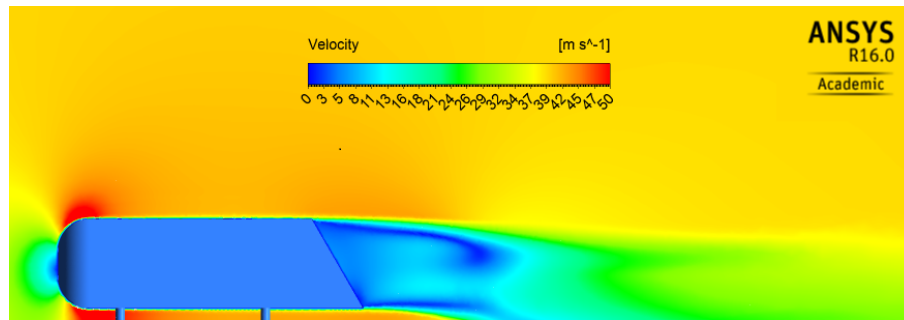
Fonte: Autor (2017).

Figura 41 – Escoamento no corpo de $\varphi = 50^\circ$.



Fonte: Autor (2017).

Figura 42 – Escoamento no corpo de $\varphi = 60^\circ$.



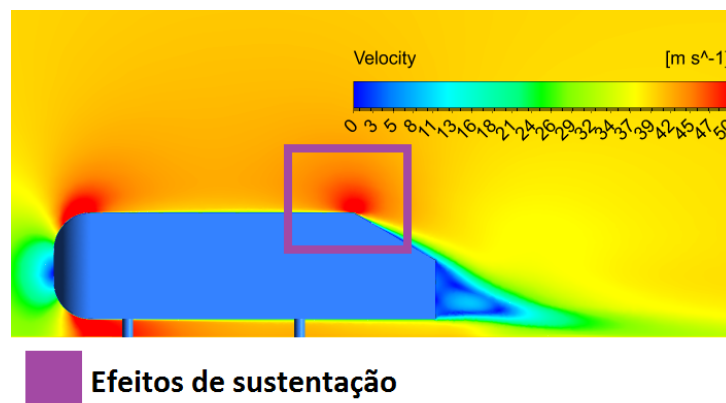
Fonte: Autor (2017).

4.5 Força de sustentação

É possível associar o campo de velocidade com as forças que ocorrem no escoamento, como é o caso da força de sustentação, através do gráfico na figura 33 nota-se que os ângulos de $\varphi = 20^\circ$ a $\varphi = 40^\circ$ possuem os maiores c_l , analisando os escoamento nesses ângulos é observado um padrão, a presença de um escoamento em alta velocidade sobre o veículo, exatamente no ponto aonde inicia a superfície de saída, como mostrado na Figura 43 indica uma região de baixa pressão contribuindo para a sustentação do veículo.

Contudo não é possível descrever toda a sustentação do veículo através desse efeito, porém ele explica o como a variação do ângulo φ altera o escoamento, estabelecendo que durante um projeto, aonde há preocupação com sustentação deve-se estar atento aos fatores que criam o aumento da velocidade do escoamento sob o veículo.

Figura 43 – Região de aceleração do escoamento devido a inclinação do angulo φ .



Fonte: Autor (2017).

4.6 Força de arrasto

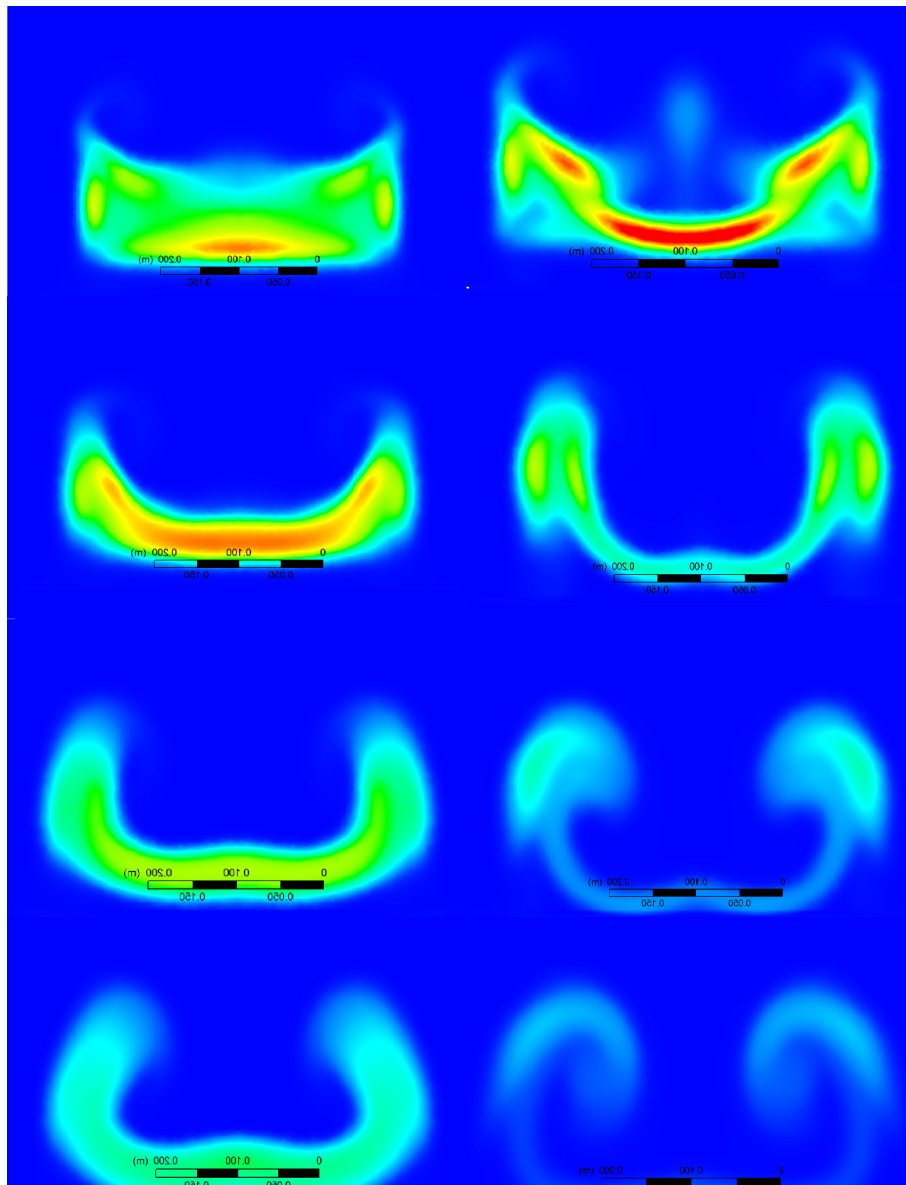
Análogo à análise do mecanismo de geração de força de sustentação, o foco do trabalho não está em explicar o fenômeno de geração do arrasto, mas sim a influência da variação do ângulo φ sobre ele, contudo no caso estudado a variação do C_d aparenta ser algo mais complexo devido à própria descontinuidade em sua variação quando comparado ao C_l , especificamente falando do ângulo $\varphi = 35^\circ$. Primeiramente foi observado que o escoamento quase não se modifica na região anterior ao corpo, contendo as principais mudanças no comportamento na região posterior.

As cores nos tons de azul dessa região indicam uma velocidade baixa ou nula, no entanto se trata de uma simulação de um ensaio de túnel de vento, em um caso real o modo mais simples de discernir o fenômeno é que essa massa de ar está sendo levada pelo veículo, como uma esteira de ar estagnado. Todavia existe mais um fenômeno que possui grande influência, a geração de vórtice na região traseira do veículo.

Com atenção voltada para o desenvolvimento do escoamento é possível identificar duas situações, sendo a primeira aonde o fluxo de ar da face superior está totalmente desassociado da inferior, esse estado é evidente se analisarmos o ângulo de $\varphi = 0^\circ$, mostrando uma tendência de se unir ao escoamento da face inferior, condição que pode ser facilmente identificada no ângulo de $\varphi = 30^\circ$. Retornando de maneira abrupta para sua condição inicial no ângulo de $\varphi = 35^\circ$, observamos pelos perfis de velocidade que esse desacoplamento pouco afeta o tamanho da esteira do veículo, contudo neste caso a queda na força de arrasto está mais relacionada com a presença de vórtice.

A fim de averiguar se geração de vórtice no escoamento estaria associado com o aumento da força de arrasto uma análise detalhada do da região posterior do veículo foi executado, através da projeção da energia cinética turbulenta, parâmetro associado à presença de vórtice, em quatro seções paralelas ao plano YZ, dado que a primeira seção se encontra à 10 cm da extremidade posterior do corpo se afastando em passos de 10 cm, estando a última seção conseqüentemente a 40 cm do corpo. Sendo importante destacar que a régua mostrada na figura possui tamanho de 20 cm, o esquema montado pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 – A imagem mostra a intensidade de energia cinética turbulenta no escoamento da região posterior ao corpo. A esquerda $\varphi = 30^\circ$ e direita $\varphi = 35^\circ$.



Fonte: Autor(2017).

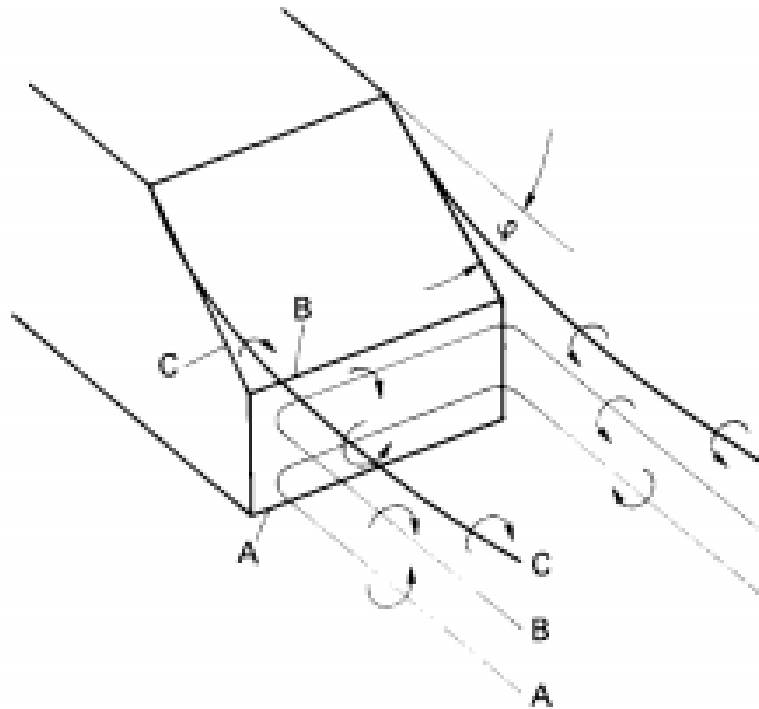
Conforme mencionado por Lienhart (2000), que realizou experimentos em túneis de vento com a geometria, o acoplamento do escoamento inclinação de saída, induz a geração de vórtice, responsáveis pelo aumento do arrasto.

A investigação proposta foi capaz de identificar esse fenômeno no escoamento. Foi constatado que a presença de vórtice cai significativamente durante passagem do ângulo $\varphi = 30^\circ$ para $\varphi = 35^\circ$, como mostrado na Figura 44, nos primeiros instantes ambas geometrias possuem intensidades que aparentam ser iguais, porém a medida que se afasta do corpo claramente se torna muito menor em $\varphi = 35^\circ$.

4.7 Características do escoamento

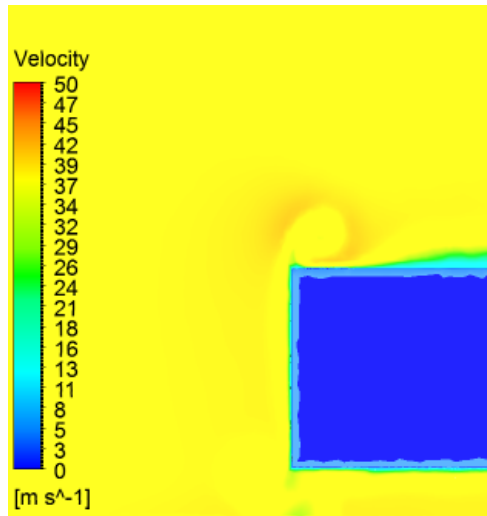
As secções anteriores compararam os resultados quantitativos obtidos na simulação, essa secção busca comparar se o escoamento encontrado é similar ao predito pela literatura. E como podemos ver na Figura 46, foi observado os mesmos vórtice apontando para o interior do corpo, como o previsto na Figura 45. A Figura 47, também mostra as semelhanças entre os dois escoamentos em perspectiva.

Figura 45 – Formação de vórtices previsto pela literatura

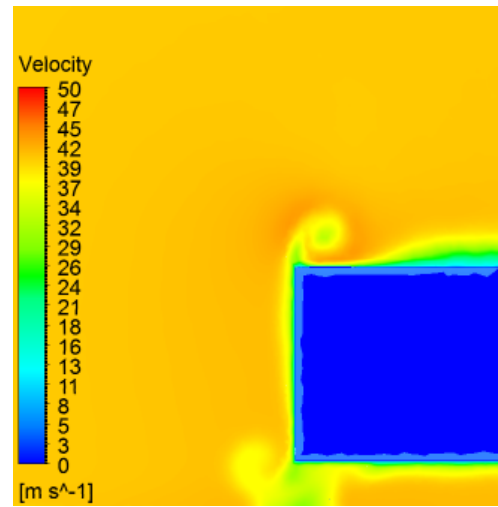


Fonte: (HUCHO, 1986).

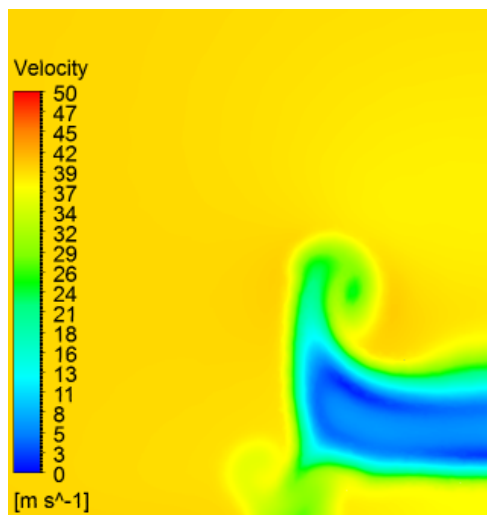
Figura 46 – Perfil de velocidade demonstrando a formação de vórtice, na região posterior ao corpo de prova.



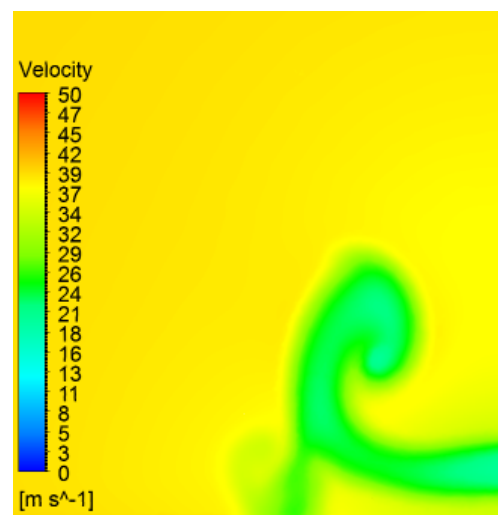
(a)



(b)



(c)



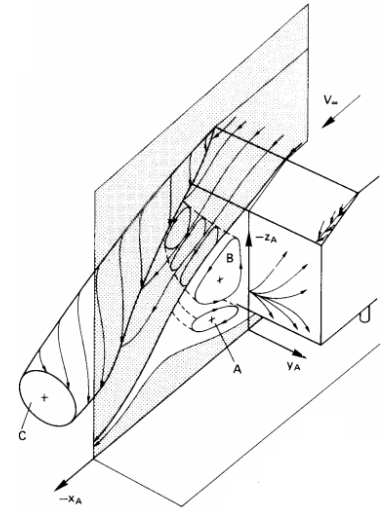
(d)

Autor(2017).

Figura 47 – Comparação do resultado previsto na literatura com o simulado.



(a) Escoamento simulado.



(b) Escoamento previsto.

Autor(2017).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou obter resultados numéricos de simulação em CFD, condicentes com os resultados experimentais em túnel de vento. Os mesmos permitiram a identificação da variação dos efeitos aerodinâmicos na geometria de referência de Ahmed, conforme a variação de um de seus parâmetros, no caso, o ângulo de inclinação da superfície inclinada φ . A fim de que os objetivos fossem atingidos, o trabalho não limitou-se apenas ao CFD, abordando na revisão bibliográfica os principais temas da mecânica dos fluidos, fornecendo base para a compreensão de fenômenos físicos envolvidos e a teoria por trás da simulação numérica, apresentando tópicos sobre aerodinâmica veicular que mostraram as implicações do assunto na engenharia automotiva e mostrando a importância do tema. A respeito da relevância do tema, o trabalho não se trata de uma aplicação direta dos conceitos, tal como em um estudo de caso. Entretanto, revela a base do conhecimento que pode então ser aplicado em casos específicos de acordo com a necessidade, contribuindo para o design automotivo que, conforme demonstrado, colabora para melhorar a eficiência energética. Essa melhora é o resultado buscado pela indústria, independente da matriz energética utilizada, além da segurança veicular por meio da melhor estabilidade em altas velocidades, melhorando a capacidade de realizar curvas e suportar ventos laterais. O método utilizado é extenso e bem explorado pela literatura, entretanto o trabalho buscou apenas referir-se aos tópicos necessários para compreender as considerações utilizadas, como simplificações, modelos de escoamento e modos de solução, buscando sempre fornecer informações suficientes para a reprodução do experimento. Os resultados quantitativos foram expostos de modo claro, facilitando a comparação com trabalhos já existentes ou futuros. Outra ferramenta utilizada nos resultados, foi o pós-processamento das simulações, empregado para fazer comparação entre as mesmas em diferentes condições, como os diferentes padrões de turbulência em escoamentos com diferentes φ e paralelos com os aspectos do escoamento previsto pela literatura. A simulação foi conduzida de maneira coerente, baseada em uma análise que decidiu quais considerações e modelos deveriam ser adotados para garantir a integridade dos dados obtidos. Etapas de verificação foram realizadas, como o estudo de independência de malha, que demonstrou coerência nos procedimentos empregados. As consequências dessa verificação podem ser vistas por meio dos resultados que foram condizentes com os previstos pela literatura, principalmente quando analisamos o comportamento do coeficiente de arrasto. Contudo,

faz parte do trabalho entender que não há resultados exatos, mesmo experimentos em túneis de ventos possuem incertezas e devem ser minimizadas através do estudo de independência de malha, por exemplo. Outras fontes de erro podem ter origem nas simplificações adotadas e na própria incerteza da solução. Essas incertezas poderiam ter sido mitigadas se não houvesse a limitação da capacidade computacional, porém isso não significa necessariamente que os resultados das simulações aproximassem-se dos mostrados na literatura. O trabalho termina mostrando a influência que um pequeno parâmetro pode ter sobre a aerodinâmica de um veículo, influenciando aspectos importantes que impactam a vida de todos como o consumo de combustível e segurança na estrada. Fornecendo também informações suficientes para que trabalhos futuros desenvolvam o design de um veículo ou aprofundem o conhecimento na geometria de referência de Ahmed.

5.1 Trabalhos futuros

Considerando a abrangência do tema da aerodinâmica veicular e as inúmeras análises possíveis oferecidas pela geometria de referência de Ahmed, é evidente que existem diversas oportunidades de melhorias e continuação do presente trabalho, seja aprofundando o estudo sobre os efeitos da turbulência, uso de novos parâmetros como o raio de entrada e altura do solo, ou aplicar novos conhecimentos a partir dos resultados já alcançados, incluindo novos parâmetros na geometria como arredondamentos das arestas e encontrar novos pontos de ótimo cruzando resultados, novos fatores como indução de turbulência pela rotação das rodas.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, INC. **ANSYS Fluent Theory Guide**. 16. ed. Canonsburg, PA, 2015.
- BARNARD. **Road Vehicle Aerodynamic Design**. third. [S.l.]: Mechaero, 2010.
- ÇENGEL, Y. A. **Mecânica dos fluidos fundamentos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH editora, 2015. v. 1.
- FOX, R. W. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. v. 1.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle Dynamics**. 1. ed. warrendale, PA: SAE International, 2004. v. 1.
- HUCHO, W.-H. **Aerodynamics of Road Vehicles From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering**. first. [S.l.]: PART OF REED INTERNATIONAL P.L.C., 1986. v. 1.
- HUCHO, W. heinrich. Aerodynamics of road vehicles - a challenge for computational fluid dynamics. **1 european automotive CFD conference**, 2003.
- KATZ, J. **Race Car Aerodynamics designing fo speed**. 1. ed. Cambridge, MA, USA: Bentley Publishers, 1995. v. 1.
- LANFRIT, M. **Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT**. 2005.
- LIENHART, H. Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model(ahmed model). **Symposium Stuttgart, Germany**, 2000.
- MUNSON, B. R.; YOUNG. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. 6. ed. USA: Wiley, 2009. v. 1.
- NASA. **Examining Spatial (Grid) Convergence**. 2016. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html>>.
- ONLINE cfd. **Ahmed body**. 2017. Disponível em: <https://www.cfd-online.com/Wiki/Ahmed_body>.
- ONLINE cfd. **K-epsilon models**. 2017. Disponível em: <https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models>.
- RESEARCHGATE. **Photograph of the Ahmed body mounted in the LSTM low-speed wind tunnel**. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/266883948_fig1_Figure-3-Photograph-of-the-Ahmed-body-mounted-in-the-LSTM-low-speed-wind-tunnel>.
- SAYMA, A. **Computational Fluid Dynamics**. [S.l.]: Ventus Publishing ApS, 2009.

STONE, R. **Automotive Engineering Fundamentals**. 1. ed. warrendale, PA: SAE International, 2004. v. 1.

SYMON, K. R. **Mecânica**. 3. ed. [S.l.]: Editora Campus, 1996. v. 1.

SYMSCAPE. **Mesh Element Size**. 2017. Disponível em: <<http://www.symscape.com/node/724>>.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. 7. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2009. v. 1.