

LUCAS MELO QUEIROZ BARBOSA

INFLUÊNCIA DA AERODINÂMICA EM UM CARRO DE FÓRMULA SAE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

LUCAS MELO QUEIROZ BARBOSA

INFLUÊNCIA DA AERODINÂMICA EM UM CARRO DE FÓRMULA SAE

Projeto de fim de Curso apresentado ao Curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL em ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de concentração: mecânica dos fluidos e aerodinâmica veicular

Orientador: Prof. Dr. João Marcelo Vedovoto.

UBERLÂNDIA – MG

2018

INFLUÊNCIA DA AERODINÂMICA EM UM CARRO DE FÓRMULA SAE

Projeto de fim de curso
APROVADO pelo Colegiado do Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica da
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia

Uberlândia, 07 de dezembro de 2018.

Prof. Dr. João Marcelo Vedovoto, UFU/MG – Orientador

Prof^ª. Dr. Aldemir Aparecido Cavallini Junior, FEMEC-UFU/MG

Prof. Dr. Ana Marta de Souza, FEMEC-UFU/MG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por iluminar meu caminho e deixar que eu conclua esta nova etapa na minha vida.

Agradeço minha família, sobretudo aos meus pais, Márcio e Lísia, por todo o apoio, ensinamentos e suporte oferecido durante toda a vida.

Agradeço o meu orientador Prof. Dr. João Marcelo, pela ajuda e disponibilidade ao responder dúvidas que surgiram ao longo deste trabalho.

Agradeço a todas as pessoas do MFLab, alunos, professores, e técnicos, os quais ajudaram a ensinar e manter a qualidade do laboratório, durante todo o tempo que estive presente.

Agradeço a equipe UFU Racing, pela oportunidade de crescimento em nível técnico e pessoal, passando por bons e maus momentos, além de auxiliar na aprendizagem do tema deste trabalho.

Agradeço aos colegas de turma os quais passamos por momentos bons e ruins ao longo do curso.

Agradeço a todos os professores da Universidade Federal de Uberlândia, os quais contribuíram para a minha formação.

BARBOSA, Lucas Melo Queiroz. **Influência da aerodinâmica em um carro de Fórmula SAE**. 2018. 58f. Projeto de Fim de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

RESUMO: O presente trabalho, consiste no estudo numérico e computacional do escoamento incompressível tridimensional sobre modelos de carros que obedecem ao regulamento da fórmula SAE. Foram elaborados modelos com e sem asas com o fim de estudar a influência destas nas forças e coeficientes de arrasto e sustentação. Através do código MFSim, desenvolvido através da parceria MFLab/FEMEC-UFU, IME-USP e Petrobras, utiliza o método dos volumes finitos para resolver uma malha euleriana e com uma geometria imersa de função lagrangeana. O uso de malha adaptativa é refinado pela fronteira imersa e turbulência. Para a resolução de sistemas lineares utiliza-se o método Multigrid-Multiníveis, além de utilizar o modelo de turbulência Smagorinsky Dinâmico. A validação dos resultados obtidos será realizada pelo software Ansys® Fluent. Além disso foi elaborado um programa computacional escrito em MatLab® com o fim de comparar os valores obtidos pelo CFD (fluidodinâmica computacional) em uma aplicação real dos modelos. Foi possível constatar que o MFSim apresentou resultados menos discrepantes, em relação ao Ansys Fluent, no modelo sem asas, devido à dificuldade desse em resolver superfícies esbeltas. Por fim a comparação dos resultados obtidos mostrou que o carro com asas apresenta melhores resultados em tempo de volta.

Palavras-chaves: dinâmica dos fluidos computacional, aerodinâmica veicular, simulação numérica, turbulência.

BARBOSA, Lucas Melo Queiroz. Influence of aerodynamics on a Formula SAE car. 2018. 58f. Course Completion Project (Graduation in Mechanical Engineering) - Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ABSTRACT: The present work consists of the numerical and computational study of three-dimensional incompressible flow on cars models that obey the regulation of the SAE formula. Wing and wingless models were designed to study their influence on drag and lift forces and coefficients. The MFSim code, developed through the partnership MFLab / FEMEC-UFU, IME-USP and Petrobras, uses the finite volume method to solve a Eulerian mesh with an immersed lagrangean geometry. The use of adaptive mesh is refined by the immersed boundary and turbulence. For the resolution of linear systems, the Multigrid-Multilevel method is used, in addition to using the dynamic Smagorinsky turbulence model. The validation of the results obtained will be performed by Ansys® Fluent software. In addition, a computer program written in MatLab® was designed to compare the values obtained by CFD (computational fluid dynamics) in an actual application of the models. It was possible to verify that the MFSim presented less dissimilar results, in relation to Ansys Fluent, in the model without wings, due to the difficulty of this in resolving slender surfaces. Finally, the comparison of the results obtained showed that the winged car presents better results in lap time.

Keywords: computational fluid dynamics, vehicles' aerodynamics, numerical simulation, turbulence

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeiro carro da equipe UFU Racing.....	1
Figura 2 - FSAE Michigan 2017	3
Figura 3 - Forças e momentos provenientes de um escoamento	4
Figura 4 - Forças em um avião	5
Figura 5 - Principais forças atuantes em um veículo.....	6
Figura 6 - Escoamento ao longo do aerofólio.....	7
Figura 7 - Asa dianteira F1	9
Figura 8 - Asa traseira F1	10
Figura 9 - Difusor F1	10
Figura 10 - Splitter Nascar.....	11
Figura 11 - Spoiler Nascar	11
Figura 12 - Ford Modelo T	12
Figura 13 - Volkswagen Fusca 1938	13
Figura 14 - Toyota Prius 2017	14
Figura 15 - Marmon Wasp de Ray Harroun	15
Figura 16 - Alfa Romeo 1950 de Nino Farina	15
Figura 17 - Porsche Type 550 de Michael May	16
Figura 18 - Chaparral 2E, 1966	17
Figura 19 - Lotus 69 pilotada por Lochen Rindt	17
Figura 20 - Chaparral 2J 1976, primeiro carro a utilizar efeito solo ativo	18
Figura 21 - Lotus 79 pilotada por Mario Andretti	19
Figura 22 - Esquema efeito solo passivo	19
Figura 23 - Ferrari F1 640, 1989.	20
Figura 24 - Ferrari SF70h (2017) pilotada por Sebastian Vettel	21
Figura 25 - UTA Racing 1982	21
Figura 26 - 1982 University of Houston FSAE CAR.....	22
Figura 27 - University of Michigan FSAE	23
Figura 28 - Zonas de exclusão do Regulamento Fórmula SAE 2018.....	23
Figura 29 - Aerodinâmica ativa no carro da UTA Racing.....	24
Figura 30 - Malha adaptativa em função da superfície imersa	26

Figura 31 - Malha adaptativa em função da superfície imersa e da vorticidade	26
Figura 32 - Malhas lagrangeana e euleriana	27
Figura 33- Carro sem asas	28
Figura 34 - Carro com asas	28
Figura 35 - Posicionamento da geometria imersa no domínio	29
Figura 36 - Vista frontal do carro com asas	30
Figura 37 - Arrasto X Tempo	31
Figura 38 - Sustentação X Tempo	31
Figura 39 - Visualização em critério Q no carro sem asas	32
Figura 40 - Visualização com linhas de trajetória no carro sem asas	32
Figura 41 – Arrasto X tempo	33
Figura 42 - Sustentação X tempo	33
Figura 43 - Visualização do critério Q do carro com asas	34
Figura 44- Visualização com linhas de trajetória do carro com asa	34
Figura 45 - Arrasto x tempo	35
Figura 46 - Sustentação X tempo	35
Figura 47 – Malha no carro Ansys Fluent	38
Figura 48 - Distribuição de pressão no carro sem asas	39
Figura 49 - Distribuição de pressão no carro com asas	39
Figura 50 - Estrutura das asas no chassi	42
Figura 51 - Aceleração na arrancada de 75 m	43
Figura 52 - Velocidade X Tempo	43
Figura 53 - Assíntota da velocidade máxima	44
Figura 54 - Frenagem de 100 km/h ao repouso	45
Figura 55 - Aceleração lateral máxima em função do raio da curva	46
Figura 56 - Velocidade máxima de contorno em função do raio da curva	46

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da simulação do carro sem asas.....	31
Tabela 2 - Dados da simulação do carro com asas	33
Tabela 3 - Comparação de forças entre os carros com e sem asas	36
Tabela 4 - Valores obtidos no Ansys Fluent.....	38
Tabela 5 - Comparação das forças obtidas no MFSim e no Ansys Fluent	40
Tabela 6 - Numeração dos modelos.....	42
Tabela 7 - Quantificação dos valores.....	47

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	OBJETIVOS.....	2
1.2.	FÓRMULA SAE.....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	CONCEITOS BÁSICOS DE AERODINÂMICA.....	4
2.2.	AERODINÂMICA VEICULAR.....	5
2.3.	TEORIA DO AEROFÓLIO.....	7
2.4.	ARRASTO EM AUTOMÓVEIS.....	8
2.5.	PRINCIPAIS ACESSÓRIOS AERODINÂMICOS EM CARROS DE COMPETIÇÃO.....	8
3.	RETROSPECTIVA HISTÓRICA DA AERODINÂMICA VEICULAR.....	12
3.1.	AERODINÂMICA EM CARROS DE PASSEIO.....	12
3.2.	AERODINÂMICA EM CARROS DE COMPETIÇÃO.....	14
3.3.	AERODINÂMICA NA FÓRMULA SAE.....	21
4.	MODELO MATEMÁTICO.....	25
4.1.	CÓDIGO MFSIM.....	25
5.	MODELO FÍSICO.....	28
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	30
6.1.	CARRO SEM ASAS.....	31
6.2.	CARRO COM ASAS.....	33
6.3.	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO MFSIM.....	35
7.	COMPARAÇÃO COM O ANSYS FLUENT.....	37
7.1.	MODELO FÍSICO – ANSYS FLUENT.....	37
7.2.	RESULTADOS OBTIDOS NO ANSYS FLUENT.....	38
7.3.	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE O MFSIM E ANSYS.....	40
8.	APLICAÇÃO ENTRE DOS VALORES OBTIDOS.....	41

8.1. CARACTERÍSTICAS DO CÓDIGO EM MATLAB	41
8.2. RESULTADOS OBTIDOS	41
8.2.1. ACELERAÇÃO E VELOCIDADE MÁXIMA	42
8.2.2. FRENAGEM.....	45
8.2.3. CURVAS	45
8.2.4. QUANTIFICAÇÃO DOS DADOS	47
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
10. REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE I – TRATAMENTO DE DADOS NO MFSIM.....	50
APÊNDICE II – CÓDIGO DE COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS	53

1. INTRODUÇÃO

No final do ano de 2015 foi criado o projeto de extensão UFU Racing Fórmula SAE, composto por aproximadamente 35 estudantes da Universidade Federal de Uberlândia com o objetivo de competir na Fórmula SAE. Competição realizada pela SAE Brasil® e que possui como objetivo construir um carro do tipo fórmula a fim de competir contra outras universidades em eventos nacionais e internacionais. A figura 1 mostra a equipe na primeira competição que entrou com o carro completo, no ano de 2018.

Figura 1 - Primeiro carro da equipe UFU Racing



A aerodinâmica é uma área que ganhou destaque nas últimas edições da FSAE, com a utilização de aerofólios ativos e difusores; com o fim de aumentar o downforce, e por consequência a maior aderência aerodinâmica, o que acarreta em maior aceleração lateral no caso de curvas e longitudinais em frenagens. Como os circuitos são travados, curvas com pouco raio e retas curtas, as principais equipes do Brasil e exterior utilizam apêndices aerodinâmicos, a fim de reduzir os tempos de volta.

O uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), é o principal método que as equipes utilizam para simular os carros. Apesar da necessidade de grande capacidade

computacional, é possível diminuir custos com a menor necessidade de desenvolver peças físicas e testes práticos.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal obter os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação de um carro de Fórmula SAE através do código numérico MFSim, desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Flúidos Computacional (MFLab), e comparar estes resultados com o Ansys Fluent. Além disso foi elaborado um programa em MatLab® a fim de comparar os resultados obtidos em CFD com situações reais, a fim de verificar a viabilidade de utilizar asas em uma situação real.

1.2. FÓRMULA SAE

A Fórmula SAE ou Fórmula Student teve seu início no ano 1978 nos Estados Unidos com o nome de SAE Mini Indy, com o objetivo de capacitar futuros engenheiros de maneira competitiva.

A competição tem como objetivo desenvolver um carro do tipo fórmula, o qual compete contra outras universidades. Este protótipo é avaliado em provas estáticas e dinâmicas, as quais são mostradas a seguir, seguidas por sua pontuação.

Eventos estáticos:

- Apresentação - 75 pontos
- Designer - 150 pontos
- Custo - 100 pontos

Eventos dinâmicos:

- Aceleração - 100 pontos
- Skid-pad - 75 pontos
- Autocroos - 125 pontos
- Eficiência - 100 pontos
- Enduro - 275 pontos

Atualmente, são realizados campeonatos em mais de 10 países, incluindo o Brasil, além de possuir mais de 1000 equipes ao redor do mundo. A Figura 2 mostra a FSAE Michigan 2017, a qual contou com dezenas de carros, os quais foram classificados através dos campeonatos nacionais.

Figura 2 - FSAE Michigan 2017



Fonte: <http://1.bp.blogspot.com/->

1BGMbBWK5A/VgmGIoaSAI/AAAAAAAAOY8/ZCMd0snCe7k/s1600/Movimentos.jpg

Os carros são do tipo fórmula, pneus expostos e cockpit aberto podem possuir motores de até 650 cm³ e atingir velocidades de mais de 150 km/h. Os estudantes possuem liberdade na escolha de todos os componentes utilizados, desde que obedeçam ao regulamento. Este é um dos poucos campeonatos do automobilismo que não determina peso mínimo.

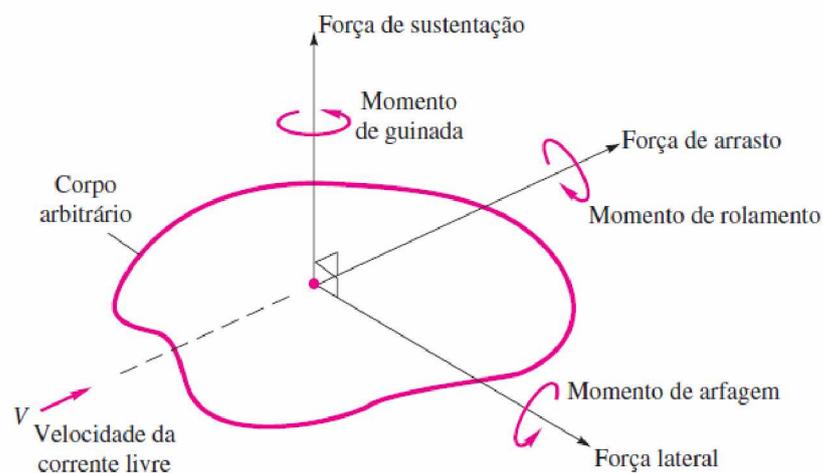
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCEITOS BÁSICOS DE AERODINÂMICA

Segundo WHITE (2011), qualquer corpo e de qualquer formato será influenciado por 3 forças e 3 momentos quando for exposto a um escoamento, como mostrado na Figura 2.

Todo corpo rígido no espaço possui 6 graus de liberdade, sendo destes 3 forças e 3 momentos, como exposto na Figura 3. A aerodinâmica estuda a influência do escoamento de um fluido em corpo.

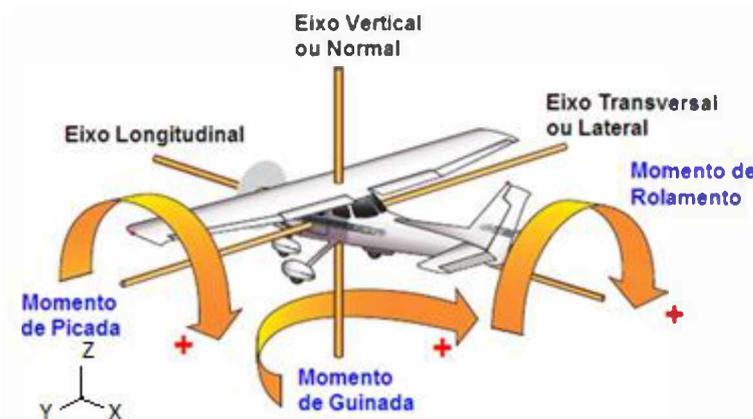
Figura 3 - Forças e momentos provenientes de um escoamento



Fonte: WHITE (2011)

Em um avião todas as componentes das forças são calculadas a partir do centro de gravidade (Cg), e cada força interage de um modo na aeronave. Na Figura 4, o eixo longitudinal (X) está presente a força de empuxo que é a favor do movimento e o arrasto, que possui sentido contrário. No eixo transversal (Y) ocorre o deslocamento lateral da aeronave. Agem sobre o eixo Vertical (Z) as forças da gravidade e de sustentação.

Figura 4 - Forças em um avião



Adaptado de: http://1.bp.blogspot.com/_1BGMbBWKG5A/VgmG1IoaSAI/AAAAAAAAOY8/ZCMd0snCe7k/s1600/Movimentos.jpg

1BGMbBWKG5A/VgmG1IoaSAI/AAAAAAAAOY8/ZCMd0snCe7k/s1600/Movimentos.jpg

O momento de rolamento e guinada são responsáveis por permitir que o avião faça curva, responsável pelo alinhamento no eixo longitudinal, este pela mudança de angulação direta, enquanto esse devido a variação do ângulo da força de sustentação. Já o momento de picada é responsável por alterar o ângulo de contato entre o ar e a aeronave, e por consequência no ângulo de asa, permitindo alterar a sustentação e a altitude do avião.

2.2. AERODINÂMICA VEICULAR

A aerodinâmica veicular estuda a interação do ar com o veículo, e tem como principal finalidade otimizar o escoamento de ar em torno do veículo. Devido ao contato dos pneus com o solo, somente duas forças, sustentação e arrasto, e um momento, de arfagem ou picada, possuem influência considerável na aerodinâmica veicular, uma vez que os outros apresentam baixos valores, como exposto na Figura 5.

Figura 5 - Principais forças atuantes em um veículo.



Adaptado de:

https://www.researchgate.net/profile/Filipe_Buscariolo/publication/45942260/figure/fig1/AS:416309671153664@1476267368223/Figura-31-Os-estudos-na-aerodinamica-veicular-a-determinacao-de-forcas-e-momentos-b.ppm

Em carros de passeio o foco é a redução de arrasto, uma vez que este é um grande dissipador de energia, acarretando em maior consumo de combustível, principalmente em rodovias, onde a velocidade é mais elevada.

Já em carros de competição além da força de arrasto, a força de sustentação e momento de arfagem deve ser levado em conta. A força de sustentação é responsável por alterar a força normal do pneu contra o solo, dessa forma a sustentação negativa, também conhecida como downforce, é benéfica para o desempenho do carro em curvas e frenagens, devido ao aumento por força de atrito do pneu contra o solo. O momento de arfagem influencia na distribuição das forças causadas pelo escoamento nos eixos dianteiro e traseiro do veículo. O ideal é que tendo como base o centro de massa do veículo o momento de arfagem seja nulo, a fim de melhor distribuição das forças normais nos eixos do veículo.

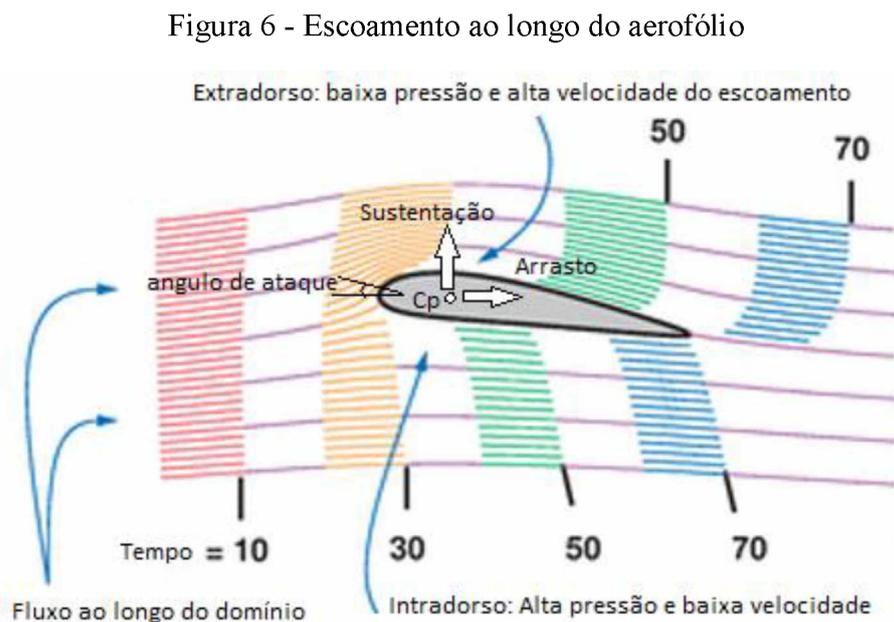
Somente em casos onde é utilizado aerodinâmica ativa, com asas bipartidas, os momentos de guinada e rolamento são usualmente utilizados, devido a assimetria gerada no momento em um lado tem maior ataque que o outro.

2.3. TEORIA DO AEROFÓLIO

Um aerofólio ou perfil de asa é um corpo aerodinâmico utilizado para gerar força perpendicular ao escoamento. Segundo RODRIGUES (2014), em um avião, o qual necessita de sustentação para vencer a força peso, caso exista um positivo ângulo entre uma asa e a direção do escoamento, o ar é forçado a mudar de direção e pela reação, a asa apresenta sofrerá reação de mesmo módulo, direção, mas de sentido oposto a força aplicada ao fluxo, conforme explicado na Terceira Lei de Newton.

A força é gerada pela diferença de pressão entre o intradorso, face de maior pressão e menor velocidade, e o extradorso, de menor pressão e maior velocidade. A Figura 6, mostra diferença de pressão é causada variação da quantidade de movimento do fluido, uma vez que a trajetória do ar é alterada pelo formato do objeto, além da diferença de velocidades entre os dorsos do aerofólio, sendo que a pressão e a velocidade obedecem a Equação de Bernoulli, Equação 1, em escoamentos incompressíveis.

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g * h = cte \quad (1)$$



Adaptado de: http://aprperformance.com/images/stories/article_images/airfoils_450_02.jpg

Em aviões as asas têm a função de gerar sustentação, devido à necessidade de manter o equipamento no ar, contrapondo a força da gravidade, possuindo o ângulo de ataque positivo. Já em carros de competição o perfil é invertido, a fim de gerar força descendente e melhorar a aderência do pneu contra o solo.

2.4. ARRASTO EM AUTOMÓVEIS

Segundo BRUNETTI (1992), a resistência aerodinâmica em carros se dá por 5 tipos diferentes de arrasto.

O arrasto de forma é devido a geometria do veículo e as dificuldades do escoamento em contornar o corpo. Carrocerias com menor pressão na dianteira e depressão reduzidas na traseira apresentaram menores coeficientes de arrasto.

O arrasto induzido ocorre devido a sustentação negativa. A diferença de pressão gerada entre as partes inferior e posterior gera grandes deslocamentos de ar elevando a força de arraste no carro.

Arrasto devido ao atrito de superfície, a rugosidade na superfície pode influenciar de maneira direta a resistência aerodinâmica. Devido ao aumento da camada limite, uma superfície com pior acabamento superficial normalmente apresenta maior força de arrasto.

Também é citado o arrasto devido a interferências de componentes adicionais a carroceria como retrovisores. O arrasto devido ao fluxo interno de ar também deve ser considerado, uma vez que podem existir passagens de ar dentro do veículo, como o do sistema de arrefecimento.

2.5. PRINCIPAIS ACESSÓRIOS AERODINÂMICOS EM CARROS DE COMPETIÇÃO

A fim de obter o melhor rendimento, maximizando a força descendente, os carros de competição podem apresentar diversos elementos aerodinâmicos. Cada competição pode determinar quais características de cada apêndice e quais as suas dimensões.

Segundo MORTEL (2003), a asa dianteira, Figura 7, é considerada a peça aerodinâmica mais importante para um carro de formula 1. Por ser o primeiro contato do ar limpo com o carro, é responsável por desviar dos pneus, diminuindo o arrasto gerados por estes, e realocar para zonas importantes como dutos resfriamento de freios e radiador, além de garantir fluxo laminar em torno do carro. Além disso é responsável por gerar força descendente, além de ser utilizada a fim de equilibrar o carro, por ter ângulo de inclinação mais rápido de ajustar que a asa traseira.

Figura 7 - Asa dianteira F1



<https://maxf1.net/wp-content/uploads/2018/02/Ferrari-SF71H-F1-2018-front-wing-and-under-chassis-vanes-Photo-Ferrari-MAXF1net-1.jpg>

A asa traseira, Figura 8, é o ponto a jusante do escoamento, sendo responsável por grande parte do arrasto induzido produzido pelo carro. É responsável por grande parte da força descendente gerada pela aerodinâmica dos carros do tipo fórmula. O ângulo de ataque é otimizado em função da pista a ser utilizada, em pistas com longas retas, o ângulo de ataque é raso a fim de gerar menos arrasto, e em pistas com curvas sinuosas, o maior ângulo é responsável por maior downforce.

Figura 8 - Asa traseira F1



Fonte: <https://f1cdn.net/gallery/var/resizes/2018/mercedes-w09-launch/rear-wing.jpg>

O difusor de ar, Figura 9, é a parte final do assoalho da maior parte dos carros de competição, tanto carros do tipo fórmula quanto turismo. O difusor é responsável por acelerar o ar na região inferior do carro, a fim de gerar uma região de baixa pressão, a qual produz força descendente no carro, conforme o princípio de Bernoulli, equação 1, presente no item anterior. É o equipamento aerodinâmico que apresenta melhor relação entre coeficiente de sustentação negativa e arrasto.

Figura 9 - Difusor F1



Fonte: http://www.formula1-dictionary.net/Images/diffuser_merc_gp01.jpg

Em carros de turismo, o uso da asa dianteira é impossível devido a geometria da carroceria, dessa forma o splitter, Figura 10, é bastante difundido a fim de gerar força descendente. O splitter, pintado de preto, acelera o ar na região inferior e estagnado na superior, gerando uma diferença de pressão, e por consequência em força descendente.

Figura 10 - Splitter Nascar



Fonte: <http://www.racecar-engineering.com/wp-content/uploads/2017/03/upuad4.jpg>

Apesar de poder utilizar asas na traseira, algumas categorias de turismo utilizam spoiler, Figura 11, a fim de gerar downforce, a exemplo da Nascar. A velocidade do ar é diminuída na região traseira do veículo a fim de gerar uma região de maior pressão sobre a carroceria, a fim de empurrar o veículo contra o solo. Em geral, essa peça apresenta pior relação entre coeficiente de sustentação negativa e arrasto em comparação com uma asa traseira convencional.

Figura 11 - Spoiler Nascar



Fonte: <https://autoweek.com/sites/default/files/styles/gen-738-415/public/spoiler5.jpg?itok=3M6Ju3D1>

3. RETROSPECTIVA HISTÓRICA DA AERODINÂMICA VEICULAR

Ao longo dos anos, o formato de carroceiras apresentou mudanças significativas devido a evoluções motivadas por: padrão de época, estilo, e aos avanços tecnológicos. Passando de simples estruturas com formato quadrado, as quais tinha a função de proteger os ocupantes de fenômenos da natureza, para estruturas otimizadas a fim de otimizar o escoamento de ar no veículo.

3.1. AERODINÂMICA EM CARROS DE PASSEIO

No início do século XX, carros como o Ford T, Figura 12, possuíam o formato de carroceria “quadrado”, padrão herdado das carruagens, as quais eram comuns na época. Apesar desse modelo de carroceria gerar alto coeficiente de arrasto, 0,8, não atrapalhava tanto o rendimento dos carros, uma vez que o foco era trajeto em cidades e estradas de terras. Este carro gerava cerca de 20 cavalos e alcançava apenas 75 km/h.

Figura 12 - Ford Modelo T



Fonte: <https://carrosantigos.files.wordpress.com/2008/07/1927-ford-model-t-roadster.jpg>

Na década de 30 o foco do projeto mudou, com pneus mais largos e motores mais potentes, o estudo aerodinâmico passou a ter maior importância, a carroceria passou a ter formas mais arredondadas com o objetivo de diminuir o arrasto, a exemplo do Fusca, Figura 13. Este carro foi uma exigência de Adolf Hitler a Ferdinand Porsche e deveria possuir baixo custo, que levasse 5 pessoas, chegar a 100km/h e fazer no mínimo 13km com um litro de gasolina. Para chegar a esses resultados foi utilizado um motor de 1100cm³ de aproximadamente 30HP, e para chegar na velocidade o carro foi testado em túnel de vento, onde o coeficiente de arrasto obtido foi de 0,48.

Figura 13 - Volkswagen Fusca 1938



Fonte:

http://2.bp.blogspot.com/_IWTr6wGgHR0/TUnvJ7yDjZI/AAAAAAAAAHh/LqtNdqmBEI/s1600/165116-1455517522651-1674742408-843453-2398263-n.jpg

Atualmente o uso de CFDs e teste em túnel de vento têm o objetivo de diminuir o consumo de combustível. O Toyota Prius, Figura 14, além de ser híbrido, possui um motor a combustão e outro elétrico, possui o coeficiente de arrasto de cerca de 0,27, o que garante economia em altas velocidades, a exemplo de rodovias. O formato da carroceria busca diminuir as zonas de descolamento e os spoilers e apêndices aerodinâmicos buscam controlar a

recirculação na traseira, além de possuir peças de plástico no assoalho com o fim de aproximá-lo de um plano, e por consequência melhorar o escoamento do fluxo no local.

Figura 14 - Toyota Prius 2017



Fonte:

http://www.orienttoyota.com.br/images/novos/toyota/models/xfoto730_5543.jpeg.pagespeed.ic.ZBY3Rn1NSR.jpg

3.2. AERODINÂMICA EM CARROS DE COMPETIÇÃO

No automobilismo, a busca de encontrar o menor arrasto imperava nos carros até o ano de 1966, com o designer limpo e sem nenhum apêndice. A exemplo do Marmon Wasp, Figura 15, primeiro carro vencedor das 500 milhas de Indianapolis em 1911, pilotado por Ray Harroun e o Alfa Romeo, Figura 16, vencedor do primeiro campeonato de Fórmula 1 em 1950 por Nino Farina.

O corpo dos carros do tipo fórmula só perdeu o formato “quadrado”, passando a ter um formato mais arredondado em mais de 60 anos. O esquema do radiador na dianteira e os pneus descobertos e finos se mantiveram devido ao menor arrasto.

Figura 15 - Marmon Wasp de Ray Harroun



Fonte: <http://www.velocityjournal.com/images/full/2000/s00080501/mm1911ws01.jpg>

Figura 16 - Alfa Romeo 1950 de Nino Farina



Fonte: <https://i.pinimg.com/originals/b1/21/25/b1212593fbc75b7fb862d2b915b66f9f.jpg>

Nos 1000 quilômetros de Nürburgring de 1956 o Porsche Type 550 de Michael May, Figura 17, foi o primeiro carro de competição a utilizar asa, sendo uma revolução. Foi utilizado uma asa central em cima da cabeça do piloto, com o fim de gerar sustentação negativa e por consequência melhorar a estabilidade em altas velocidades. Mas a ideia ficou esquecida por cerca de 10 anos, pois os outros competidores afirmaram que o equipamento causava perda de visibilidade e problemas de segurança.

Figura 17 - Porsche Type 550 de Michael May



Fonte: <https://simanaitissays.files.wordpress.com/2015/07/may-article.jpg>

Em 1966, o foco da aerodinâmica em carros de competição mudou drasticamente após o desempenho do Chaparral 2E, Figura 18, na Can-Am em 1966, este desempenho se deve a nova tentativa em utilizar asas em carros, dessa vez com uma asa traseira grande e na dianteira um spoiler para-choque, a fim de permitir maior força descendente.

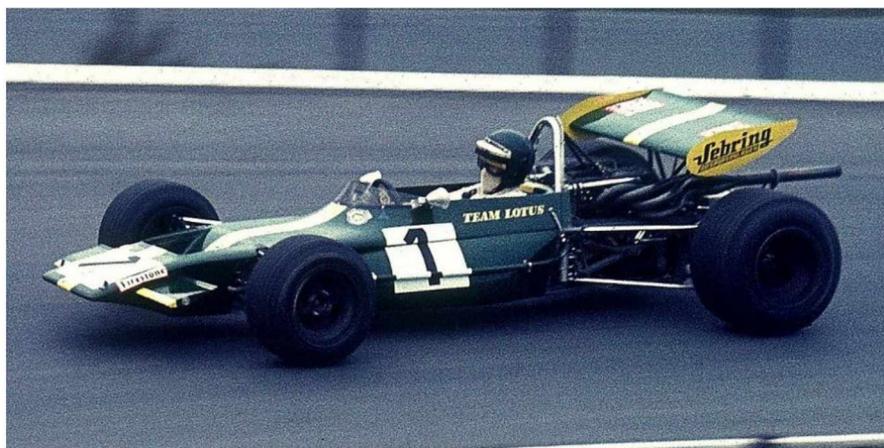
Figura 18 - Chaparral 2E, 1966



Fonte: <https://st.hotrod.com/uploads/sites/21/2016/10/005-chaparral-can-am-racing-david-kimble.jpg>

No ano de 1969 todas as equipes de Fórmula 1 já utilizavam asas em seus modelos, a exemplo da Lotus de Lochen Rindt, Figura 19, a qual possuía uma carroceria aerodinâmica com asas de um único elemento na dianteira e traseira.

Figura 19 - Lotus 69 pilotada por Lochen Rindt



Fonte: <http://www.ramferrariservice.com/wp-content/uploads/2015/01/000-1030x686.jpg>

No ano de 1970 a ideia de diminuir o tempo de volta por causa de downforce já estava consolidada, desta forma foi lançado o Chaparral 2J, Figura 20, o qual modificou a forma de

extrair força descendente, desta vez através da sucção forçada de ar do assoalho do carro por um motor auxiliar e ventiladores na traseira, em conjunto com um sistema de vedação. Este equipamento criava uma zona de baixa pressão na parte inferior do veículo, vantagem se dá pelo downforce ser praticamente constante, independentemente da velocidade, desta forma o contorno de curvas de baixa era feito em maiores velocidades.

O efeito solo ativo foi proibido na maioria das competições devido à grande discrepância de rendimento, que chegava a mais de 2% por volta, e por não ser uma tecnologia que não pode ser usada em carros de rua.

Figura 20 - Chaparral 2J 1976, primeiro carro a utilizar efeito solo ativo



Fonte: <http://i0.wp.com/projetomotor.com.br/wp-content/uploads/2015/12/Chaparral-2J.jpeg>

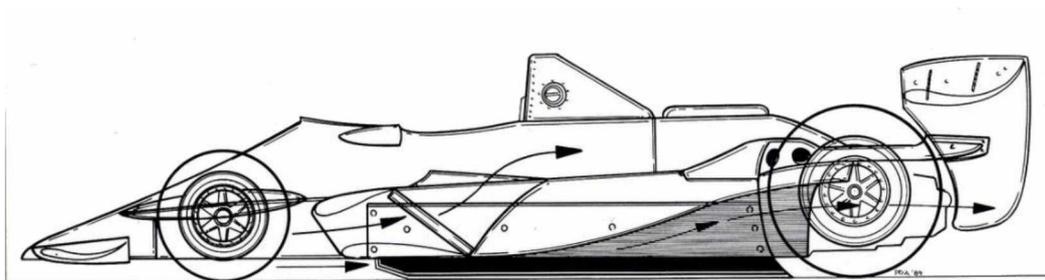
Em 1976 o engenheiro Colin Chapman buscando melhorias do modelo em túnel de vento descobriu acidentalmente que era possível gerar downforce através da proximidade do carro com a superfície do asfalto, o fenômeno ficou conhecido como efeito solo passivo. O primeiro carro a utilizar esse sistema foi o Lotus 79, de 1978, Figura 21, no qual o princípio de funcionamento era criar uma região de baixa pressão na parte inferior do carro utilizando o efeito Venturi. O ar era acelerado sob o carro e por consequência a pressão estática era menor, resultando em uma força descendente ao modelo. O sistema era vedado com a carenagem lateral, também chamada de saia, por ficar bem rente ao solo, conforme a Figura 22.

Figura 21 - Lotus 79 pilotada por Mario Andretti



Fonte: <https://cdn-3.motorsport.com/images/mgl/2voD1ng6/s8/f1-belgium-gp-1978-mario-andretti-lotus-79-ford.jpg>

Figura 22 - Esquema efeito solo passivo



Fonte: http://2.bp.blogspot.com/-mWi94_VKkSc/UWMC0Ch36sI/AAAAAAAAHcM/RI_6VuIvQ4U/s1600/lotus_79.jpg

No ano de 1989 foi proibido o uso de efeito solo, por motivos de segurança. O designer “garrafa de Coca Cola”, pela traseira se assemelha a uma garrafa, passou a ser adotada pelas equipes, como a Ferrari F1 640, Figura 23. Esse modelo diminuía o arrasto devido ao menor descolamento da camada limite, além do ar chegar com pouca turbulência na asa traseira e aumentar o downforce na região.

Figura 23 - Ferrari F1 640, 1989.



Fonte: <http://imodeler.com/uploads/2016/11/c/chinesegeorge-161127-583a552ee356a-1024x627.jpg>

A partir do ano de 2011 a Fórmula 1 permitiu o chamado DRS (Drive Reduction System) ou asa traseira móvel, no caso o elemento superior da asa traseira poderia ser acionado em momentos de ultrapassagem, garantindo assim o aumento de até 20km/h no fim de retas, como a Ferrari SF70h, Figura 24. Na Figura, é possível perceber a grande distância dos elementos inferior e superior da asa traseira, além o ângulo de ataque próximo de zero do elemento superior, o que caracteriza que o DRS está ativo; reduzindo o arrasto da asa traseira.

Na mesma imagem é possível visualizar diversos apêndices aerodinâmicos, como o conjunto “barbatana de tubarão e asa T”, situados na frente da asa traseira, com o intuito de diminuir turbulência na região traseira. Além disso, as equipes buscam defletores em diversas partes dos carros, como as pequenas asas localizadas na parte inferior do radiador e os vários elementos da asa dianteira, que além de produzir downforce buscam direcionar o ar para longe do pneu dianteiro, a fim de reduzir o arrasto.

Devido a variação de um circuito para outro e pelo segredo gerado pela competição, os valores dos coeficientes de arrasto e downforce não são divulgados pelas equipes. Apesar disso, atualmente os carros de F1 apresentam coeficiente de arrasto entre 0,7 a 1,1, devido ao grande arrasto induzido produzido por suas asas. Apesar de não divulgado pelas equipes, o coeficiente de sustentação negativo estimado é de 2,5 a 3.

Figura 24 - Ferrari SF70h (2017) pilotada por Sebastian Vettel



Fonte: <http://media.fastestlaps.com/onjb61neoef4>

3.3. AERODINÂMICA NA FÓRMULA SAE

Assim como nos carros de ruas e em outras competições, o uso da aerodinâmica era pouco desenvolvida nos primeiros anos. Inicialmente muitas equipes utilizavam chassis de carros do Baja SAE devido a questões de custo, baixas velocidades alcançadas pelos carros na época e projetos mais simples. Assim como o carro da University of Houston do ano de 1982, Figura 25. Outras equipes como a da University of Houston, já apresentavam o corpo mais alongado, como na figura 26.

Figura 25 - UTA Racing 1982



Fonte: <https://www.utaracing.com/wp-content/uploads/2018/04/F-83-uai-1332x999.jpg>

Figura 26 - 1982 University of Houston FSAE CAR



Fonte: <http://uh.edu/fsae/1982car.jpg>

No século XXI os primeiros carros de Fórmula SAE com asas começaram a surgir. Devido a velocidade média nos circuitos ser baixa, média de 50km/h, e elevada potência dos motores, cerca de 90hp, a necessidade de elevado coeficiente de downforce, maior do que 2, era essencial para a redução no tempo de volta. Devido a elevada potência o coeficiente de arrasto não era o valor importante, na velocidade máxima nos circuitos, cerca de 110 km/h, somente 25% da potência do motor era usada para vencer o atrito com o ar.

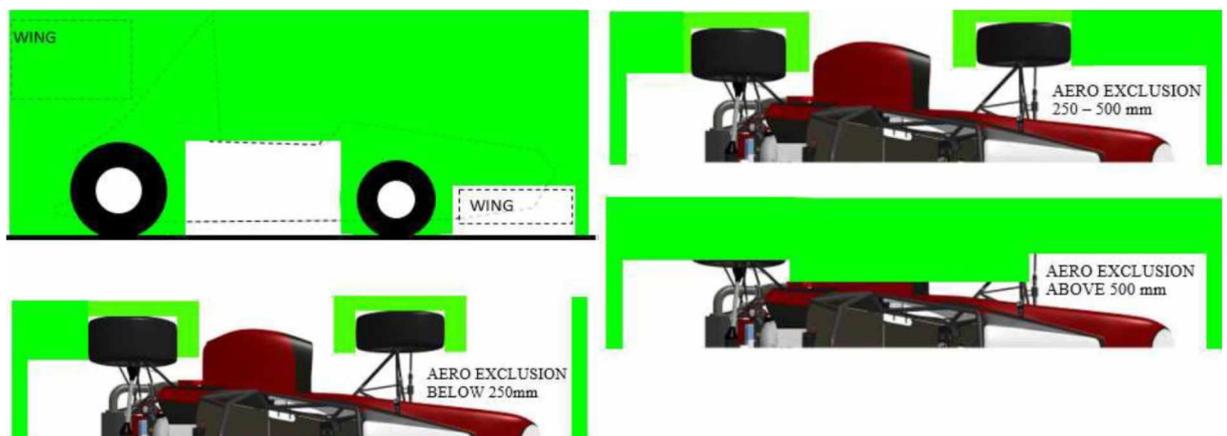
Devido ao regulamento em que a única restrição era o efeito solo ativo, a utilização de apêndices de tamanho exagerado, a exemplo do carro da University of Michigan, Figura 27, que não podiam ser usados em automóveis de passeio acarretou na mudança do regulamento da competição, onde só poderia existir asas em locais pré-determinados, determinados de zonas de exclusão, Figura 28.

Figura 27 - University of Michigan FSAE



Fonte: <https://lh3.googleusercontent.com/-3ESDcmVWh-g/U3g6gfK1J4I/AAAAAAAAASUE/NmCLoSIS3zo/w1444-h963-no/DSC01349.JPG>

Figura 28 - Zonas de exclusão do Regulamento Fórmula SAE 2018



Fonte: FSAE Rules 2017-18

Com o novo regulamento a utilização de asa continuou a existir, mas com tamanhos reduzidos. Além disso, algumas equipes começaram a utilizar asas móveis, a exemplo da equipe UTA Racing, Figura 29. Em momentos de aceleração as asas dianteiras e traseiras se encontram

abertas, e ao contrário, em frenagens. Em curva, a lateral interna da trajetória se encontra fechada e a externa aberta, a fim de gerar torque aerodinâmico e maior pressão nos pneus de apoio.

Figura 29 - Aerodinâmica ativa no carro da UTA Racing



Fonte: http://www.invetr.com/uploads/2/1/8/2/21829402/592622191_orig.png

4. MODELO MATEMÁTICO

O método utilizado foi a fluidodinâmica computacional (CFD), através do código MFSim.

4.1. CÓDIGO MFSIM

Inicialmente com o Nome de AMR3D, o código MFSim foi desenvolvido por NÓS (2007), em sua tese de doutorado pelo IME-USP; e constantemente atualizado pelo MFLab/FEMEC-UFU. O código utilizado em simulações computacionais de escoamentos fluidodinâmicos incompressíveis por processamento paralelo como, jatos, escoamento em tubos, cavidades e aerodinâmica aplicada em foguetes e automóveis. O código escrito predominantemente na linguagem Fortran90, porém com partes em C, possui malha adaptativa tridimensional, método de resolução de sistemas lineares pela solução numérica Multigrid-multinível e do método de discretização Cubista, a fim de resolver as Equações da continuidade e de Navier-Stokes, Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \right] \right\} + \frac{\bar{F}_i}{\rho} \quad (2)$$

O código apresenta malha euleriana adaptativa, a qual pode ser refinada em locais que necessitam maior refinamento, neste caso devido a fronteira imersa, Figura 30, e Vorticidade, Figura 31.

Figura 30 - Malha adaptativa em função da superfície imersa

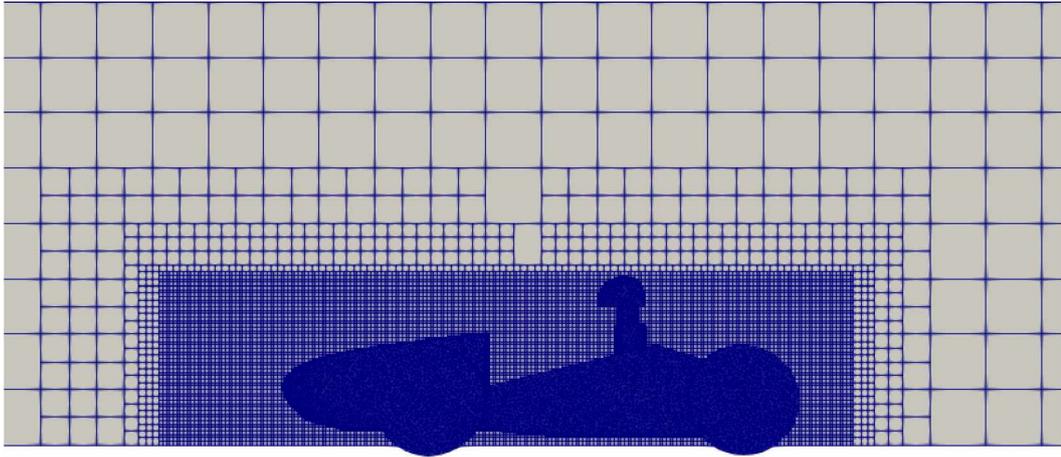
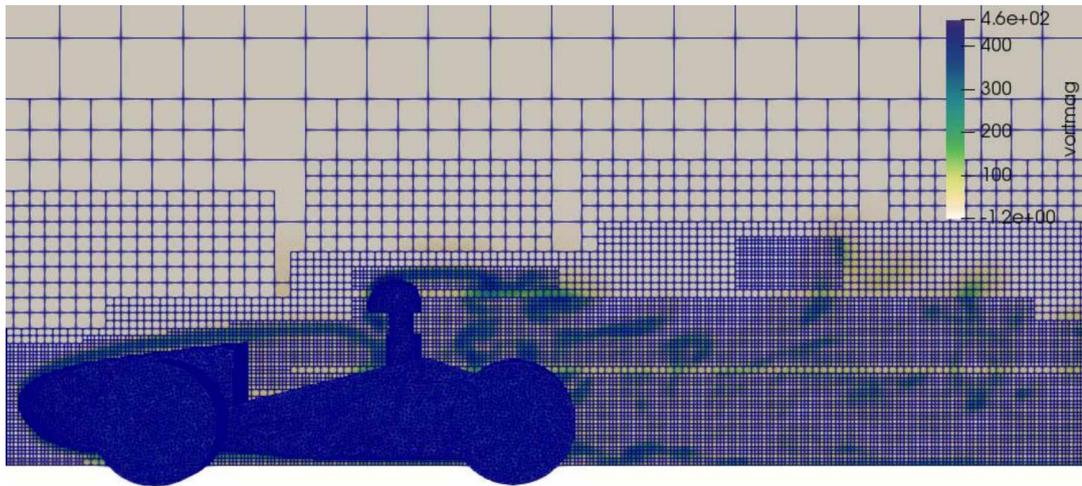


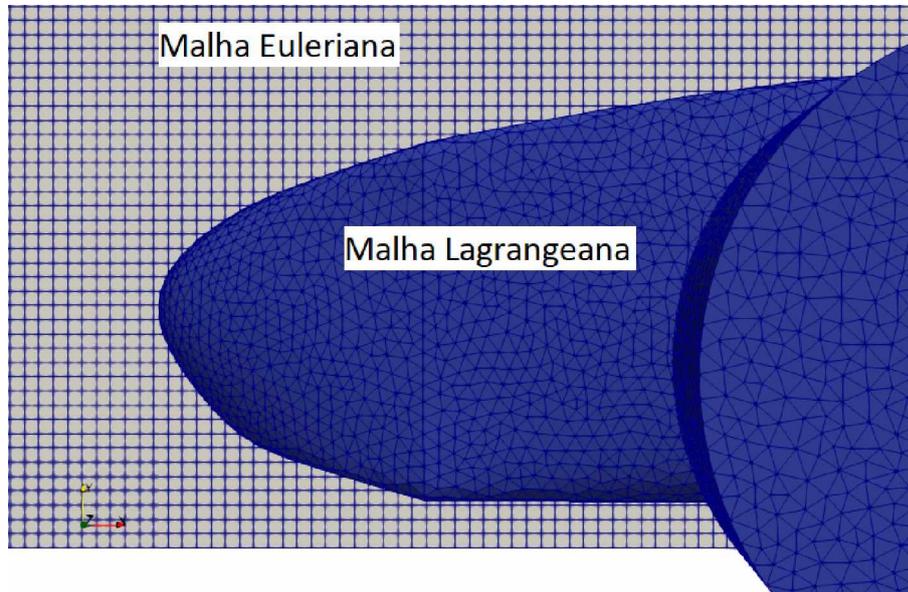
Figura 31 - Malha adaptativa em função da superfície imersa e da vorticidade



Nos casos em que é necessário utilizar fronteira imersa, esta deve ser gerada por uma malha lagrangeana, de superfície, no formato Stereolithography (.stl). Neste caso gerada pelo software GMSH, devendo o tamanho da malha lagrangeana (Tl) estar em função da euleriana (Te), pela Equação 3, as malhas são representadas pela Figura 32.

$$Tl = \frac{Te}{\left(\frac{(3)^{0,5}}{4}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

Figura 32 - Malhas lagrangeana e euleriana



5. MODELO FÍSICO

A partir do chassi desenvolvido pela equipe UFU Racing, foi desenhado no CAD SolidWorks® a carroceria a ser simulada no código MFSim, acompanhada do capacete do piloto e das rodas dianteira e traseiras, figura 33, mas não foi considerada a suspensão e o Main Hoop, peça para proteção no caso de capotamento, devido a malha pouco refinada. Na segunda simulação, figura 34, foram utilizados os mesmos desenhos com o incremento das asas, os quais tiveram os perfis desenvolvidos através de simulação no MATLAB®, se aproximando do perfil SELIG 1223.

Figura 33- Carro sem asas

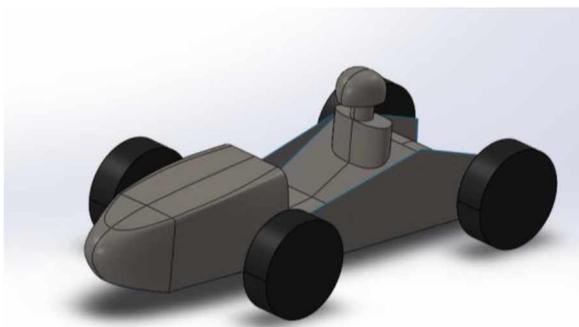
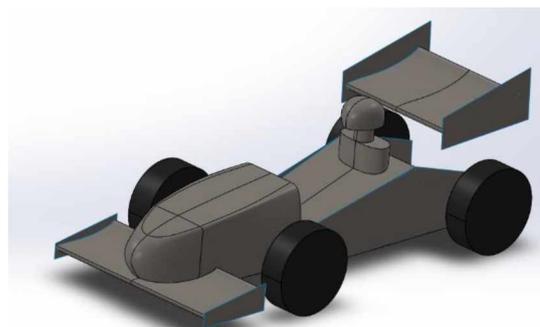


Figura 34 - Carro com asas



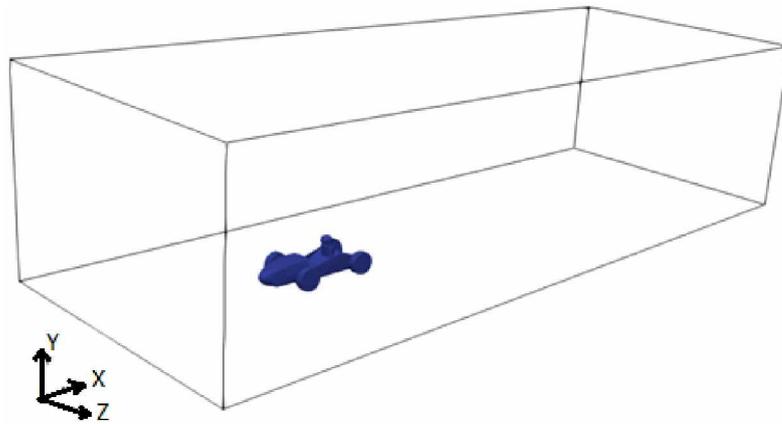
Os dois casos (com e sem asas) foram analisados com a velocidade do escoamento de 15 m/s ao longo do eixo cartesiano X, esta velocidade é escolhida por ser próxima a média no circuito. Para inserir os carros no MFSim, foi utilizado com geometrias imersas, as quais são divididas em 3 zonas em cada: carenagem, eixo dianteiro e eixo traseiro.

O domínio possui (20,48; 5,12; 7,68) m e (64; 16; 24) elementos de maior dimensão, nos sentidos (X; Y; Z), respectivamente, o que torna estes elementos de dimensão 0,32m. Foi utilizado 5 níveis de refinamento, o qual é refinado em função da turbulência e proximidade com a fronteira imersa, o que garante a dimensão dos maiores elementos seja de 0,02m. Inicialmente ambas as simulações contavam com 1.643.600 elementos, mas depois de 4,3 segundos a malha passou a registrar 2.006.248 e 2.599.200 elementos, nos casos com e sem asa, respectivamente.

O plano de entrada ($X=0$) foi definido como velocidade normal de 15m/s, o inferior ($Y=0$) foi definido com velocidade tangencial de 15m/s no mesmo sentido do escoamento.

Dessa forma a geometria imersa tem velocidade de translação de 0 m/s, enquanto o escoamento e o solo possuem a velocidade do escoamento. Na saída do escoamento, $X=20,48$, a região foi definida como Newman. As faces do domínio $Z=-3,84$, $Z=3,84$ e $Y=5,12$, foram definidas como simetria. A geometria imersa está posicionada a 2,5 metros depois da entrada do escoamento, $X=0$, conforme a Figura 35. Além disso as rodas dianteiras e traseiras apresentam velocidade rotacional de 72 rad/s, a fim de equivaler a velocidade tangencial da roda com o do escoamento.

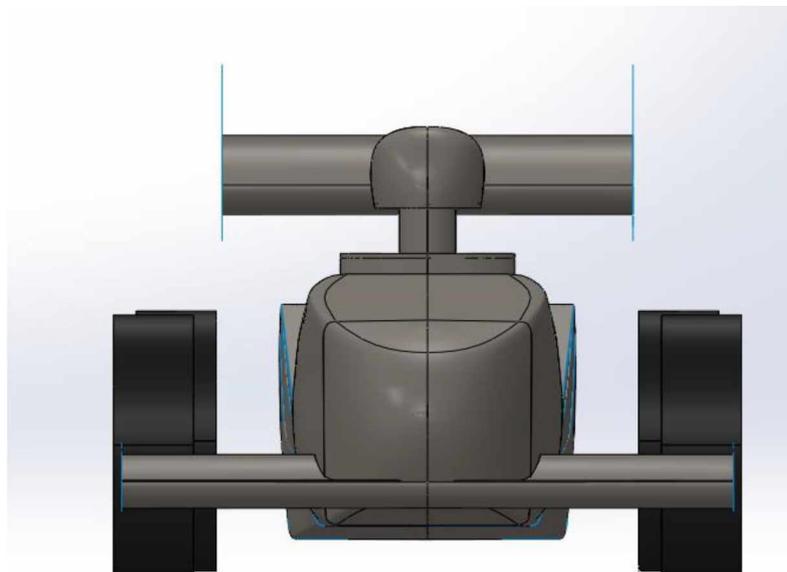
Figura 35 - Posicionamento da geometria imersa no domínio



6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O MFSim retorna os valores das forças encontradas nas fronteiras imersas, nos eixos X, Y e Z na forma de Tabelas, o resultado obtido é a média dos valores em regime estaticamente permanente. A área de referência foi calculada como sendo a projeção na vista frontal, Figura 36. O qual foi separada em 3 partes: eixo dianteiro, eixo traseiro, carenagem, além da área de referência total, cujo valor é diferente da soma algébrica das demais.

Figura 36 - Vista frontal do carro com asas



Os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação foram calculados pelas Equações 4 e 5, respectivamente:

$$C_d = \frac{F_x}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot U^2} \quad (4)$$

$$C_l = \frac{F_y}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot U^2} \quad (5)$$

6.1. CARRO SEM ASAS

Os valores das forças de arrasto em função do tempo, Figura 37, e sustentação em função do tempo, Figura 38, no carro sem asas foram plotados de forma separada em 3 partes: carenagem, eixo dianteiro e eixo traseiro, além do total. Os valores com tempo de simulação menores do que 1 s foram rejeitados, a fim de atingir regime estaticamente permanente. Com estes valores foi possível elaborar a Tabela 1, onde a média corrigida dos valores foi utilizada nas Equações de cálculo dos coeficientes de arrasto e sustentação, Equações 4 e 5. O código do programa em MATLAB, usado para elaborar os gráficos e resultados, está presente no Apêndice I.

Figura 37 - Arrasto X Tempo

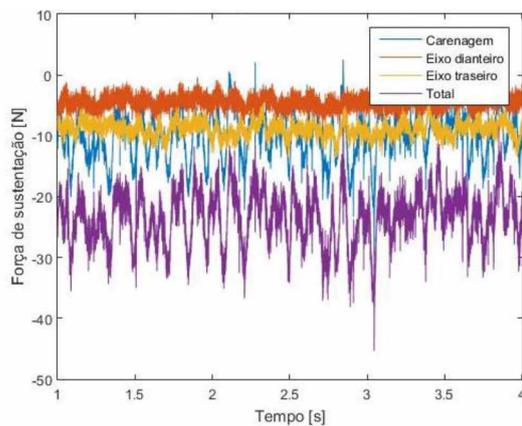


Figura 38 - Sustentação X Tempo

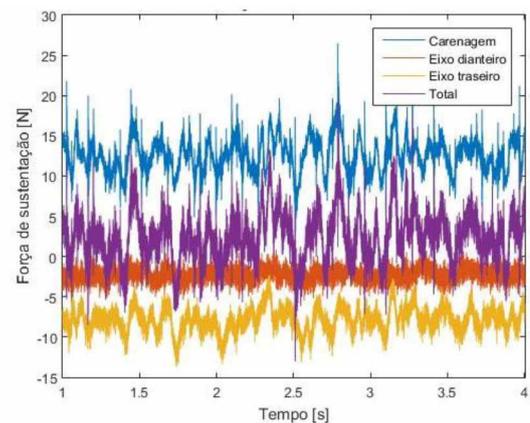


Tabela 1 - Dados da simulação do carro sem asas

	Carenagem	Eixo dianteiro	Eixo traseiro	Total
Área de referência (A)	0,4224	0,2052	0,2052	0,6820
Força de arrasto [N] (Fx)	27,6535	27,9399	16,1349	71,7283
Coeficiente de arrasto (Cd)	0,4849	1,009	0,58245	0,7791
Força de sustentação [N] (Fy)	12,5475	-2,2645	-7,8656	2,4173
Coeficiente de sustentação (Cl)	0,1463	-0,0817	-0,2839	0,0263

Na Figura 39 é possível visualizar a rotação do fluido por meio do critério Q, o qual mostra a compressão do fluido. A escala de cor mostra a resultante da velocidade nos contornos do critério Q. Na Figura 40 é mostrado as linhas de trajetória, que se iniciam em um círculo projetado frontalmente ao veículo.

Figura 39 - Visualização em critério Q no carro sem asas

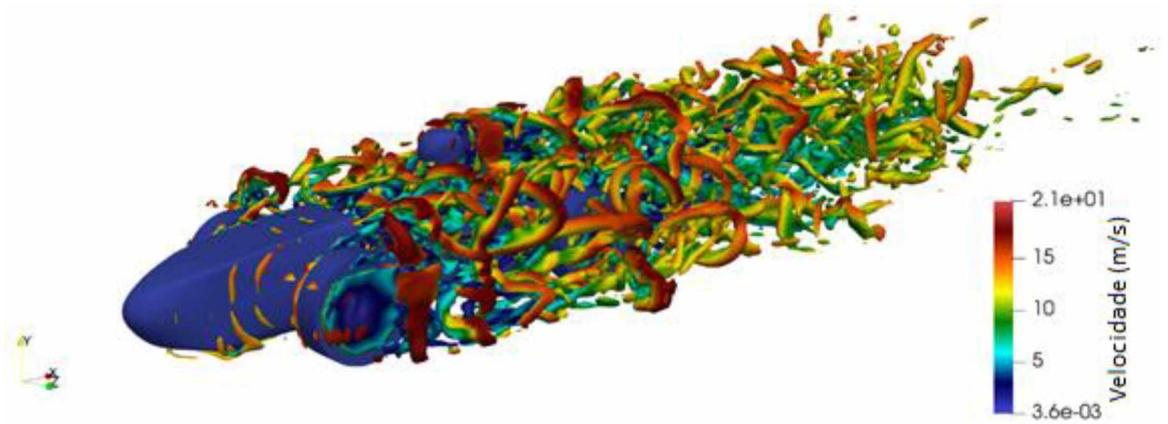
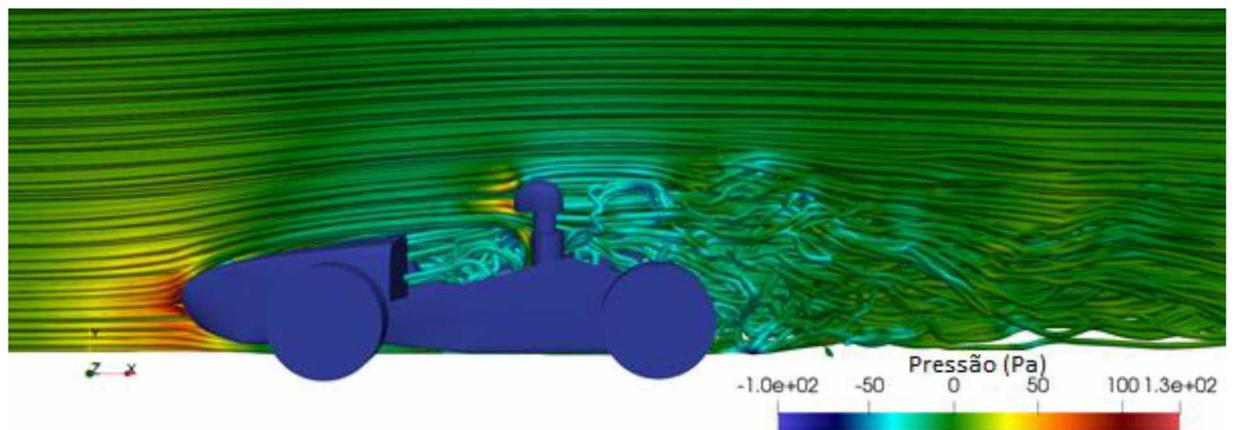


Figura 40 - Visualização com linhas de trajetória no carro sem asas



6.2. CARRO COM ASAS

Da mesma forma que no item 5.1., foram plotadas as Figuras 41 e 42, nas quais os valores das forças de arrasto e sustentação foram calculados pelas médias e os coeficientes pelas Equações 4 e 5, da mesma forma na qual a Tabela 2 foi elaborada.

Figura 41 – Arrasto X tempo

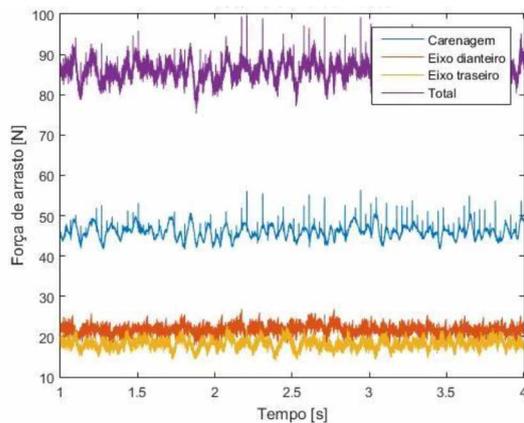


Figura 42 - Sustentação X tempo

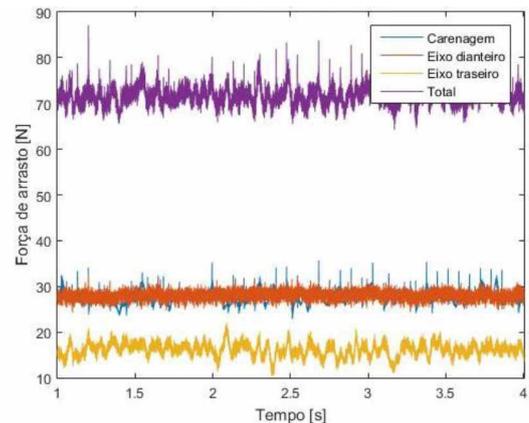


Tabela 2 - Dados da simulação do carro com asas

	Carenagem	Eixo dianteiro	Eixo traseiro	Total
Área de referência (A)	0,6352	0,2052	0,2025	0,8422
Força de arrasto [N] (Fx)	46,0245	21,6728	18,1615	85,8589
Coefficiente de arrasto (Cd)	0,8071	0,7824	0,6556	0,7552
Força de sustentação [N] (Fy)	-9,9394	-4,5464	-8,9794	-23,4652
Coefficiente de sustentação (Cl)	-0,17430	-0,1641	-0,3241	-0,2064

Assim como o item 7.1, na Figura 36 é possível visualizar a rotação do fluido por meio do critério Q e a escala de cor mostra a resultante da magnitude da velocidade. Na Figura 43 é mostrado as linhas de trajetória.

Figura 43 - Visualização do critério Q do carro com asas

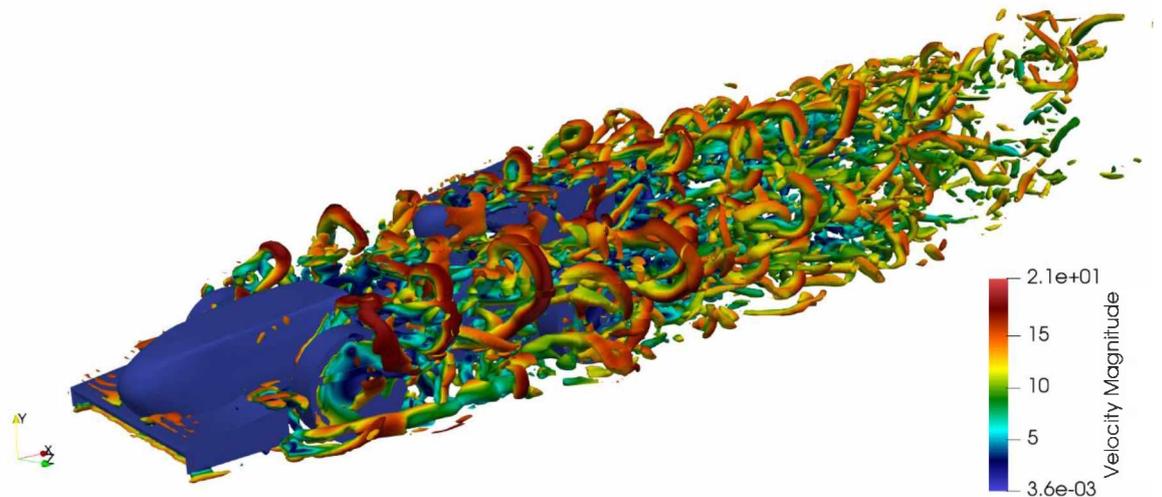
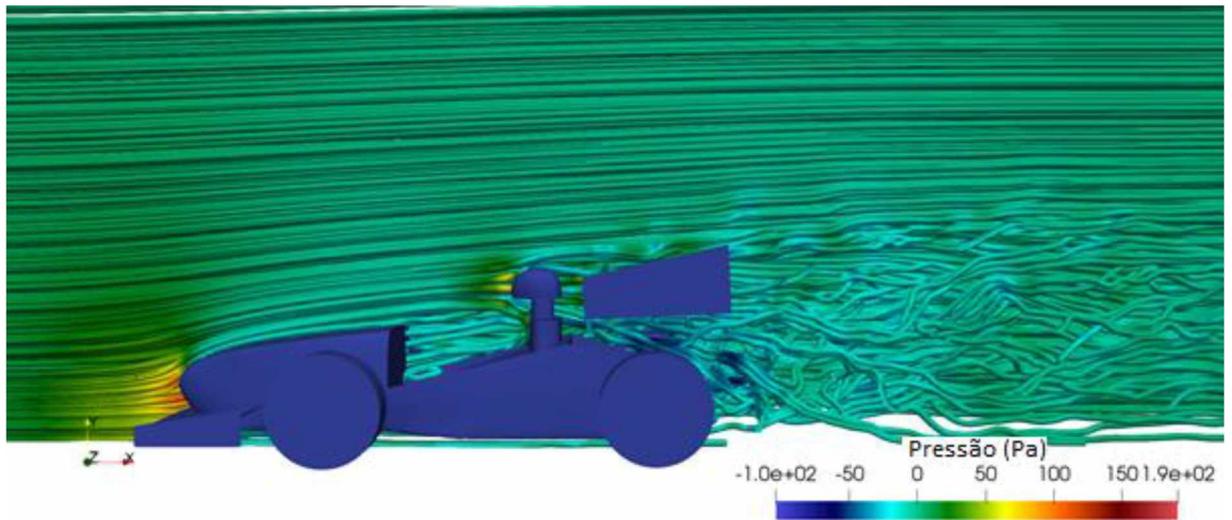


Figura 44- Visualização com linhas de trajetória do carro com asa



6.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DO MFSIM

O valor do coeficiente de arrasto obtido no carro sem asas foi de 0,7875, estando dentro da faixa de valores divulgados por outras equipes da Fórmula SAE, de 0,7 a 0,8. Era esperado que um carro alado possuísse um coeficiente de arrasto maior que um carro sem asas, mas os resultados apontam resultados contrários, isto se deve ao aumento da área frontal, que teve maior influência que o aumento da força de arrasto.

Conforme o esperado, a carroceria do modelo alado, o qual é composto pela carenagem e asas dianteira e traseira, obteve menor força de sustentação, ou seja, maior força descendente. O fato do valor das forças e coeficientes de sustentação serem negativos mostram que o ar empurra o modelo contra o solo, como pode ser visto nas Figuras 45 e 46.

Figura 45 - Arrasto x tempo

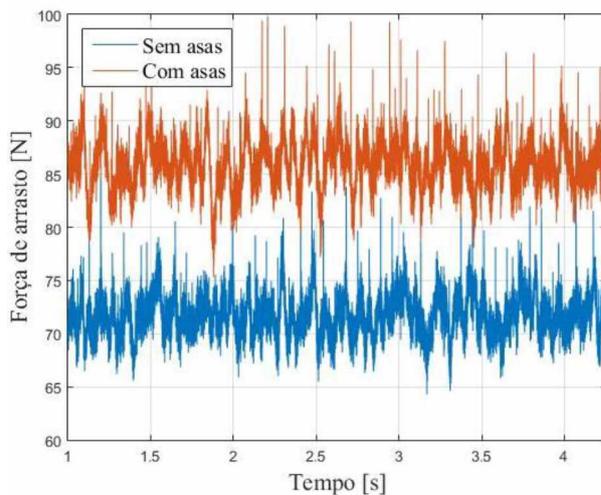
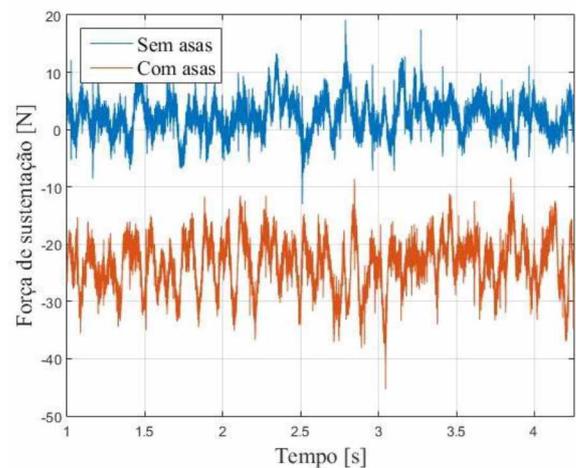


Figura 46 - Sustentação X tempo



Era esperado que o resultado do coeficiente de arrasto do eixo dianteiro fosse mais elevado que os do eixo traseiro, devido a ser um ponto jusante do escoamento, e possuir baixa turbulência. O eixo traseiro sofre influência do escoamento do eixo dianteiro, estando em um ponto de alta turbulência, o que diminui a resistência ao arrasto. No caso do modelo com asas, a asa dianteira gera turbulência no eixo dianteiro e ajuda a defletir o ar frontal, contribuindo para a diminuição do arrasto, mas continua menor que no eixo traseiro. A sustentação negativa nos pneus se deve a rotação, a qual tem velocidade tangencial de mesmo módulo que a velocidade do escoamento, que segundo a teoria do Efeito Magnus, a força está no sentido correto. Os dados analisados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação de forças entre os carros com e sem asas

	Carro sem asas	Carro com asas	Carro sem asas	Carro com asas
Direção	X		Y	
Carroceria (N)	27,6535	46,0245	12,5475	-9,9394
Eixo dianteiro (N)	27,9399	21,6728	-2,2645	-4,5464
Eixo Traseiro (N)	16,1340	18,1615	-7,8656	-8,9794
Total (N)	71,7283	85,8589	2,4173	-23,4652

Comparando as visualizações dos critérios Q e linhas de trajetória, Figuras 39, 40, 43 e 44, dos carros com e sem asas, foi possível perceber que a zona de turbulência na traseira do modelo sem apêndices aerodinâmicos é menor e mais baixa, isto se deve a não perturbação do ar causada pela asa traseira, o que acarreta em menor arrasto. No modelo alado é possível perceber que as linhas de corrente seguem a linha do aerofólio. Desta forma o ar é forçado para cima pela diferença de pressão, de acordo com a terceira lei de Newton, princípio da ação e reação, se o ar é forçado para cima, o carro é forçado para baixo, o que acarreta em maior força normal.

Como esperado, o coeficiente do arrasto dos modelos testados é maior que os carros de passeio, de 0,35 a 0,45, devido a presença de zonas de recirculações como a célula do piloto, os pneus descobertos e a falta de carenagem traseira.

7. COMPARAÇÃO COM O ANSYS FLUENT

Com o fim de comparar os dados apresentados no MFSim, foi utilizado o Software Ansys Fluent, por ser um software comercial bastante difundido no meio acadêmico e industrial.

7.1. MODELO FÍSICO – ANSYS FLUENT

Nos ensaios realizados pelo Ansys Fluent foram utilizados parâmetros semelhantes aos utilizados no MFSim, presente na seção 5. MODELO FÍSICO. Entretanto, houve modificações sutis na parte interna da geometria, devido a diferença entre os softwares analisados, uma vez que o Fluent trabalha com volumes removidos e o MFSim com superfícies imersas. Foi feita uma simulação com o carro com asas e um sem asas. Estas alterações não deverão ocasionar em mudanças significativas nas forças de arrasto e sustentação.

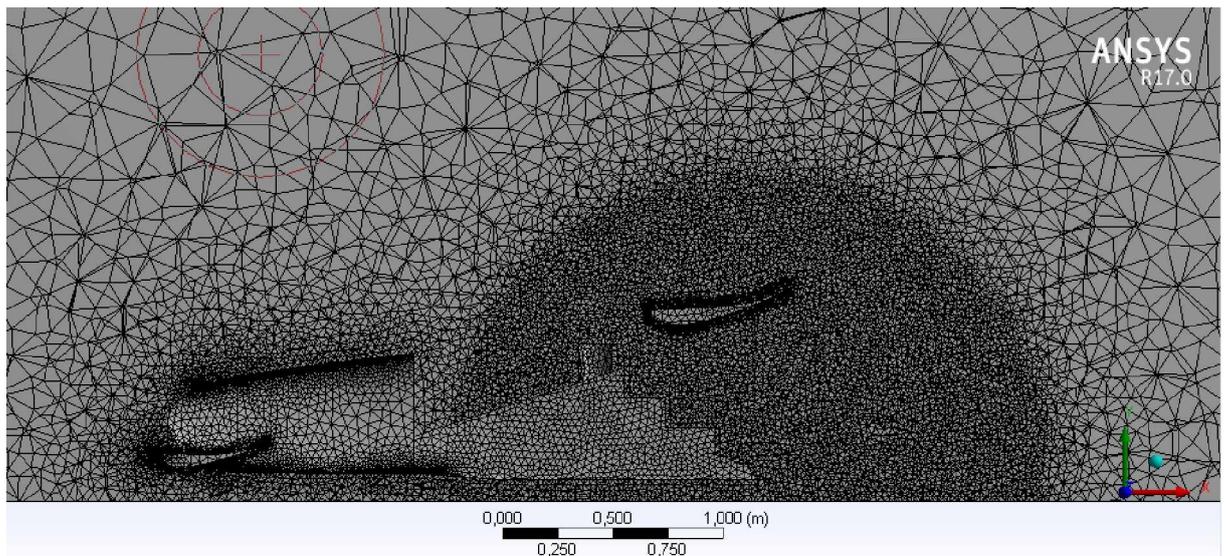
A malha utilizada possui formato tetraédrico irregular, possuindo 987.668 elementos no modelo sem asas e 1.633.217 elementos no modelo com asas. O refinamento foi realizado a partir da curvatura e proximidade com o carro, no caso do automóvel alado, foi utilizado refinamento de nível 2 nas asas. O menor elemento possui dimensão 2 mm e o maior 372 mm. O domínio possui formato retangular com dimensões (20,48; 5,12; 7,68) metros no sentido (X; Y; Z), respectivamente.

Assim como no MFSim, a parede de entrada possui a velocidade perpendicular de 15m/s, a inferior possui velocidade tangencial de 15m/s no mesmo sentido do escoamento, a parede de saída foi configurada como Neumann, além das paredes laterais e superior serem definidas como simetria. A carroceria do modelo e as asas foram definidas como parede fixa; as rodas foram definidas como paredes como movimento rotacional, com velocidade tangencial de 15 m/s.

Foi utilizado a simulação de grandes escadas (LES) como modelo de turbulência. De acordo com SILVEIRA NETO (2014), este método é intermediário entre a simulação direta e a simulação via equações médias de Reynolds, e permite a obtenção de resultados tridimensionais e transientes das equações de Navier-Stokes, equação 2, presente no capítulo 3, Modelo Matemático.

Na Figura 47 é possível notar a malha no carro com asa, mostrando o tamanho dos elementos. O posicionamento e a malha são parecidos com o carro sem asas.

Figura 47 – Malha no carro Ansys Fluent



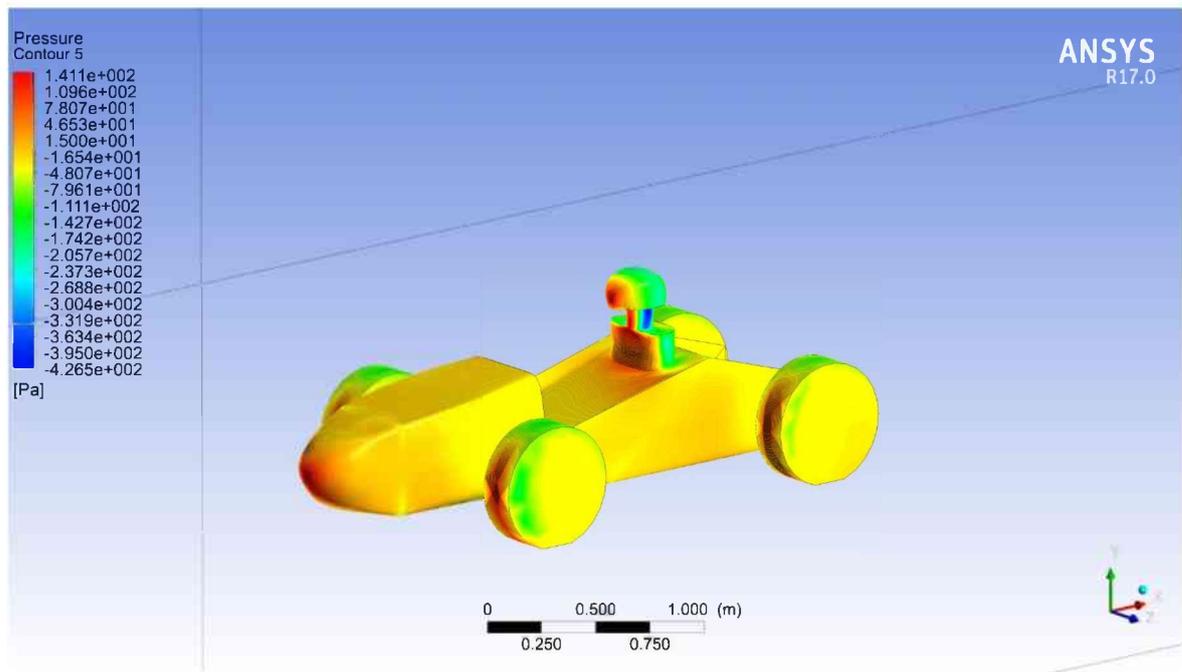
7.2. RESULTADOS OBTIDOS NO ANSYS FLUENT

Na simulação realizada pelo Ansys Fluent levando em consideração o carro sem asas o valor obtido nas forças de arrasto e sustentação foi de 64,4900 N e 18,1821N, respectivamente. Na Figura 48 é representado a distribuição de pressão em torno da carroceria do carro, através da escala de cor. As zonas de maior pressão são na ponta do bico, na frente das rodas dianteiras e do capacete, isto se deve a maior pressão nos pontos de estagnação. Já a zona de menor pressão é na lateral do pescoço do piloto, devido ao descolamento da camada limite.

Tabela 4 - Valores obtidos no Ansys Fluent

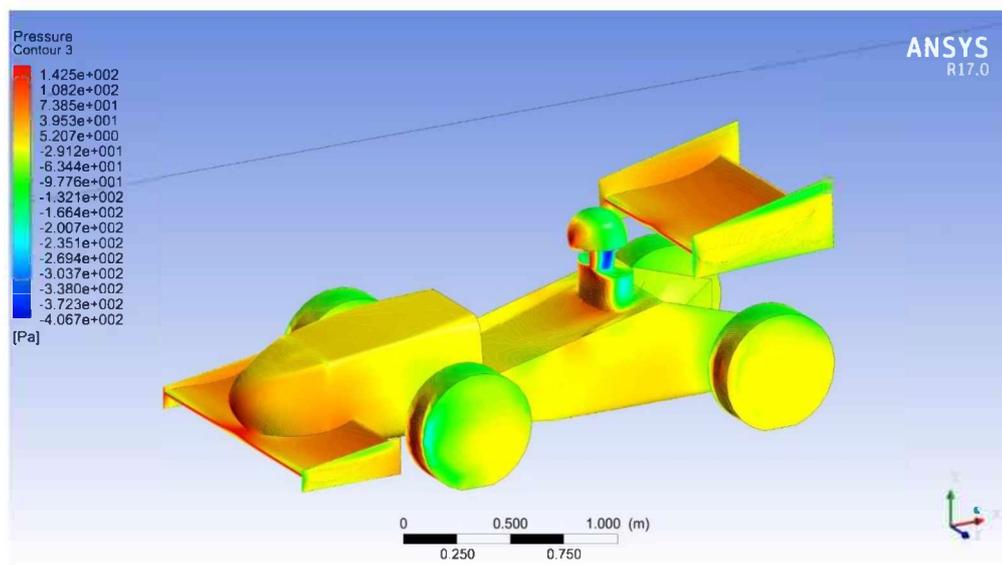
Carro	Arrasto	Sustentação
Sem asas - Arrasto (N)	64,4900	18,1821
Com asas - Arrasto (N)	103,9678	-100,8865

Figura 48 - Distribuição de pressão no carro sem asas



No modelo com asas, apresentou a força de arrasto e sustentação de 103,9678 N e -100,8865 N, respectivamente. Já no modelo sem asas, as linhas de pressão do carro alado, Figura 49, mostra que as maiores pressões ocorreram nos pontos frontais ao escoamento, a principal diferença se dá pela alta pressão presente na parte superior das asas dianteira e traseira, o que garante sustentação negativa ao modelo.

Figura 49 - Distribuição de pressão no carro com asas



7.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE O MFSIM E ANSYS

Com os dados obtidos pelo MFSim e o Ansys Fluent foi possível elaborar a tabela 5, onde foi comparado as forças de arrasto e sustentação nos modelos com e sem asa.

Tabela 5 - Comparação das forças obtidas no MFSim e no Ansys Fluent

Modelo	MFSim	Ansys Fluent	Diferença
Sem asas - Arrasto (N)	71,6811	64,4902	7,1909
Com asas - Arrasto (N)	86,8583	103,9678	17,1095
Sem asas - Sustentação (N)	2,3948	18,1821	15,7873
Com asas - Sustentação (N)	-23,4650	-100,8865	77,4215

O resultado que apresentou maior semelhança entre os dois softwares foi referente ao modelo sem asas, isto se deve a facilidade do código MFSim de trabalhar com corpos rombudos. Devido a malha utilizada no MFSim ser considerada grosseira, menor elemento de dimensão 20 mm, pode ser um fator que gerou a pequena diferença entre os valores.

Já no carro alado, os resultados obtidos tiveram grande discrepância, uma vez que o MFSim tem dificuldade de trabalhar com geometria aerodinâmicas esbeltas, como nas asas. Isto se deve ao solver Multgrid-Multinível, o qual possui melhor aplicação em geometrias rombudas.

8. APLICAÇÃO ENTRE DOS VALORES OBTIDOS

8.1. CARACTERÍSTICAS DO CÓDIGO EM MATLAB

Foi elaborado um código escrito em MatLab®, o qual está presente no Apêndice II, e busca quantificar a diferença entre um modelo com asas de outro sem asas na prática.

A partir de integração numérica é possível estimar vários parâmetros do carro, como aceleração em 75 metros, o qual corresponde a prova de aceleração da Formula SAE; tempo e distância de frenagem de 100 a 0 km/h; aceleração de 0 a 100 km/h e a velocidade máxima. Além disso é possível comparar a velocidade máxima em curva com diferentes raios, o tempo no Skidpad e o tempo em um circuito predeterminado.

Os dados de entrada podem ser facilmente modificados, inicialmente se escolhe o número de carros analisados e depois os dados do carro base, em seguida é alterado somente os valores que serão diferentes de um modelo para outro.

8.2. RESULTADOS OBTIDOS

A fim de facilitar a leitura e interpretação dos casos analisados, os modelos foram numerados de 1 a 4, conforme a Tabela 5, sendo que as diferenças entre estes são os coeficientes de arrasto, sustentação e área frontal, obtidos pela Tabela 4. Além disso os modelos com asa sofreram um acréscimo de 10 kg, totalizando 270 kg. Esta massa corresponde ao acréscimo das asas, e foi estimada mediante estudos estruturais no software Ansys Static Strutural. Já a Figura 50 mostra o desenho em CAD do esqueleto de alumínio das asas dianteira e traseira no chassi.

Figura 50 - Estrutura das asas no chassi

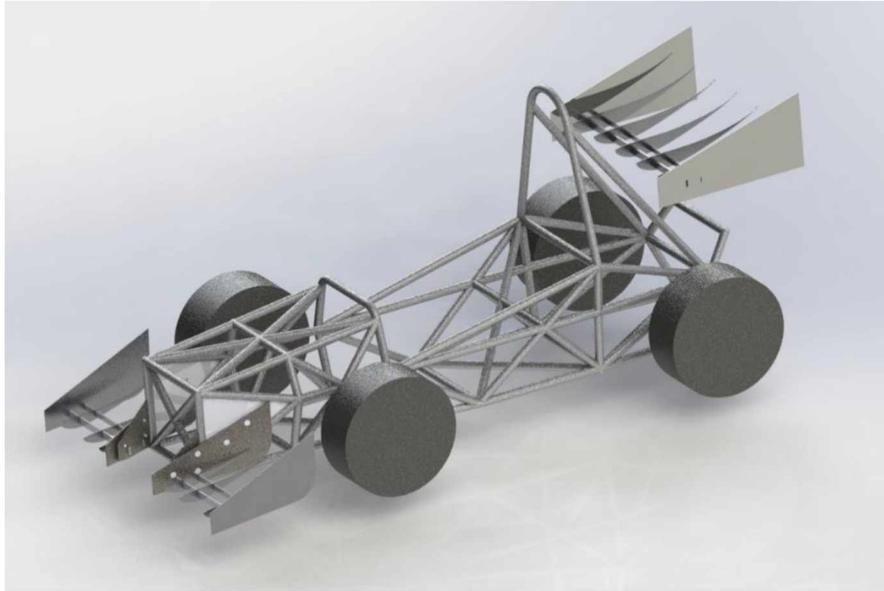


Tabela 6 - Numeração dos modelos

Modelo	Número do modelo
Sem asas – MFSim	1
Sem asas – Ansys Fluent	2
Com asas – MFSim	3
Com asas – Ansys Fluent	4

8.2.1. ACELERAÇÃO E VELOCIDADE MÁXIMA

Ao analisar as Figuras 51 e 52, onde a aceleração e a velocidade do carro estão em função do tempo, é possível notar que os modelos sem asas possuem maior aceleração em linha reta devido a 3 fatores, menor área frontal, menor coeficiente de arrasto e menor massa. Desta forma o percurso em uma linha reta de 75 metros é realizado em menor tempo, como mostrado na Figura 48. Na Figura 51, é possível perceber uma região com a aceleração praticamente plana, no primeiro segundo ocorre devido ao atrito máximo que os pneus motores podem exercer.

Figura 51 - Aceleração na arrancada de 75 m

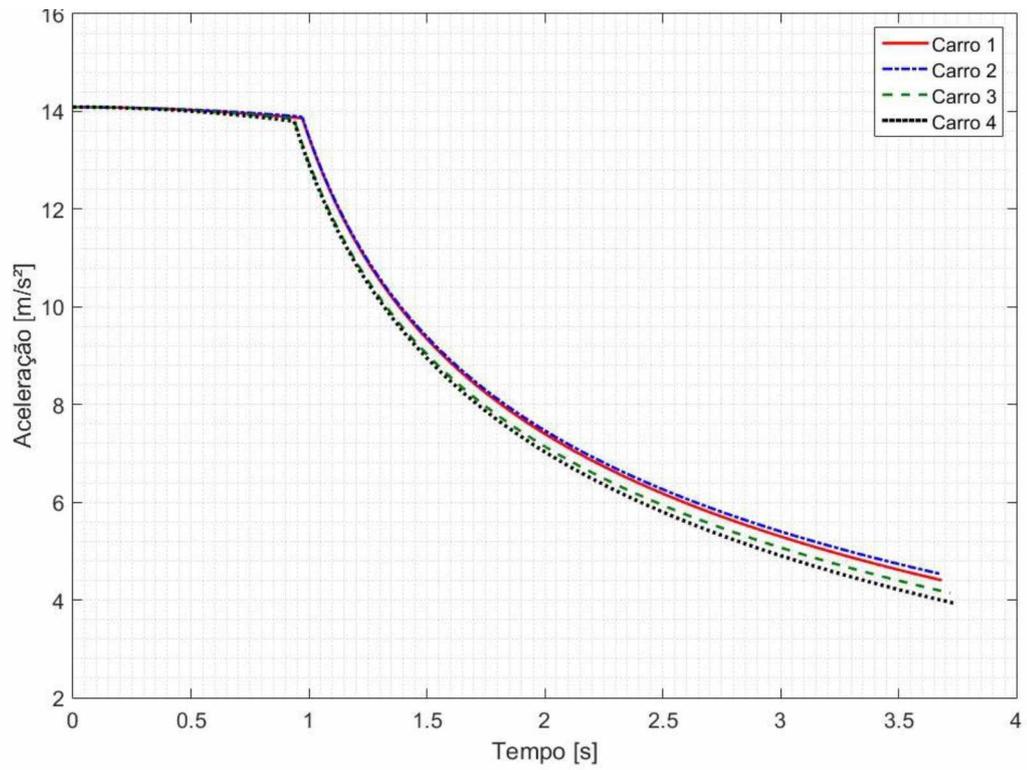
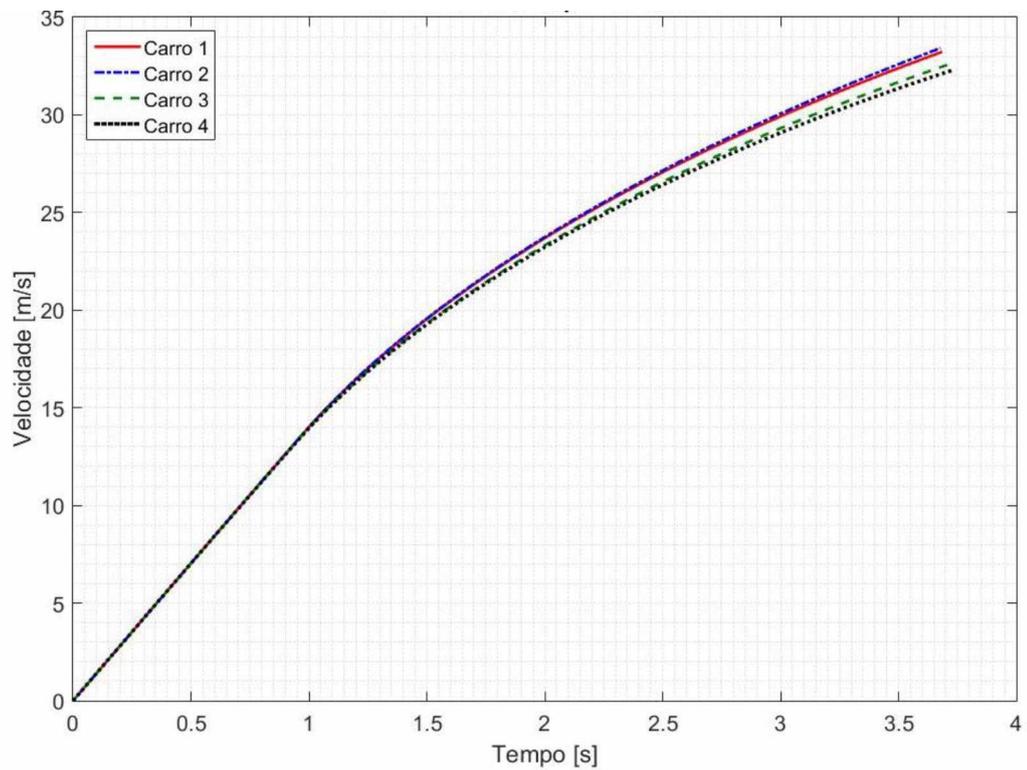
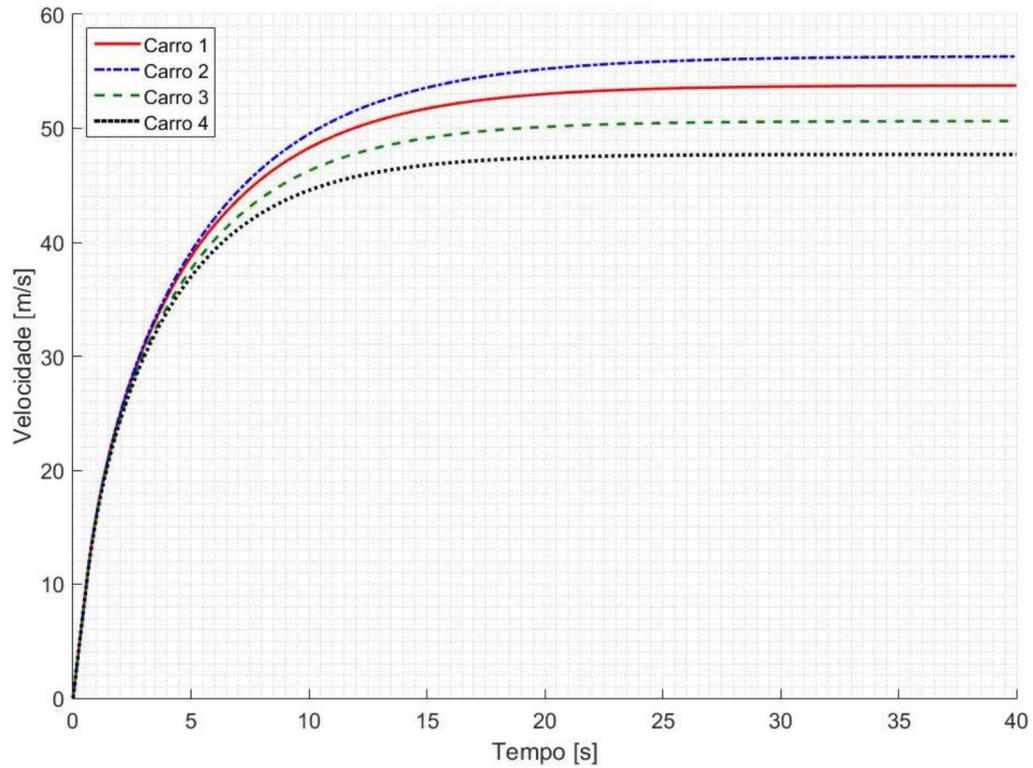


Figura 52 - Velocidade X Tempo



Outro fator que pode ser analisado é a velocidade máxima do modelo, expresso na Figura 53, onde os carros com menores coeficientes de arrasto e área frontal obtiveram maiores velocidades máximas.

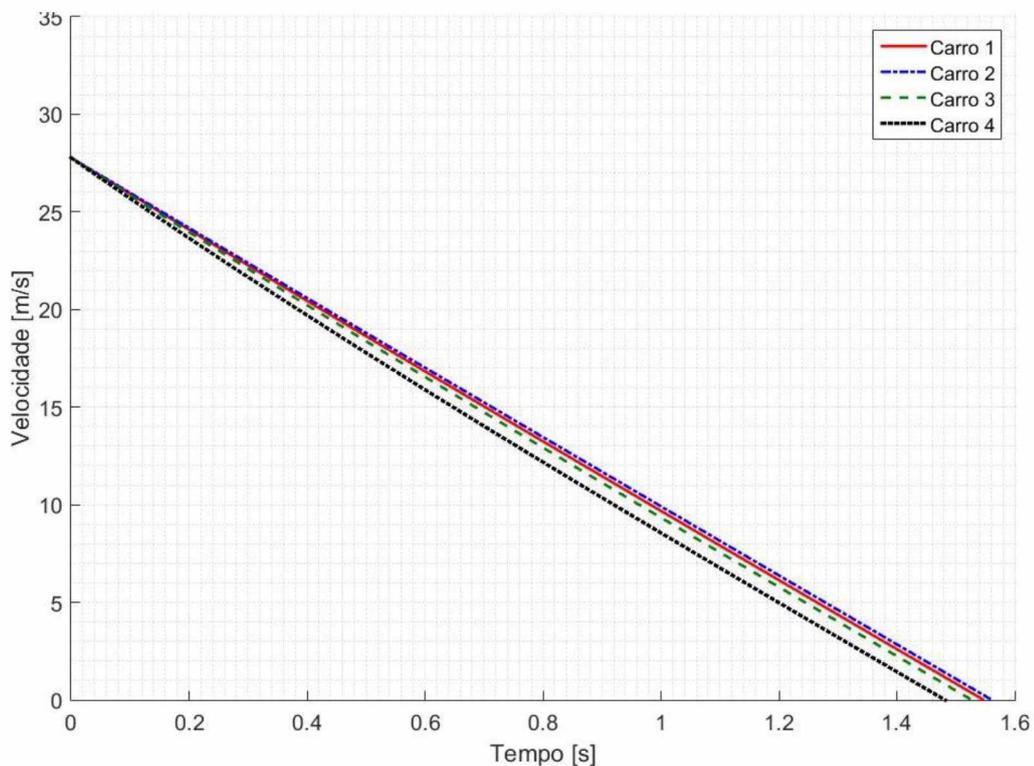
Figura 53 - Assíntota da velocidade máxima



8.2.2. FRENAGEM

Ao contrário da aceleração, a maior área frontal e coeficiente de arrasto, resultam em melhores resultados na frenagem. Ao juntar estes dois fatores com o coeficiente de sustentação, os carros alados podem reduzir a velocidade em menor tempo, conforme Figura 54, apesar de maior massa do modelo.

Figura 54 - Frenagem de 100 km/h ao repouso



8.2.3. CURVAS

As Figuras 55 e 56, mostram que os carros com asas conseguem contornar as curvas com maior aceleração e velocidade. Isto se deve ao aumento da normal do pneu contra o solo devido as forças aerodinâmicas e por consequência a força de atrito tem maior magnitude. Outro fator a ser analisado é a maior relevância da influência do ar em curvas de maior raio, devido a maior velocidade.

Figura 55 - Aceleração lateral máxima em função do raio da curva

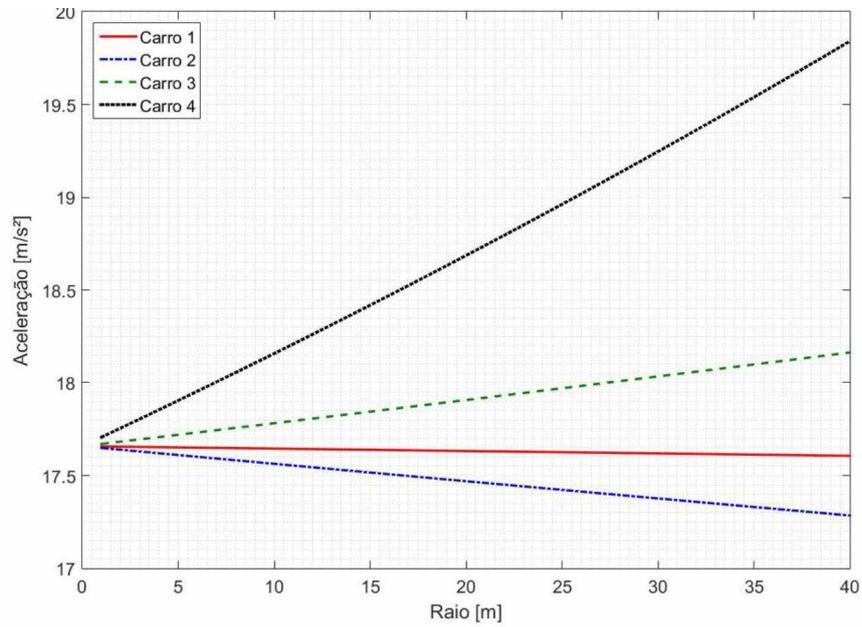
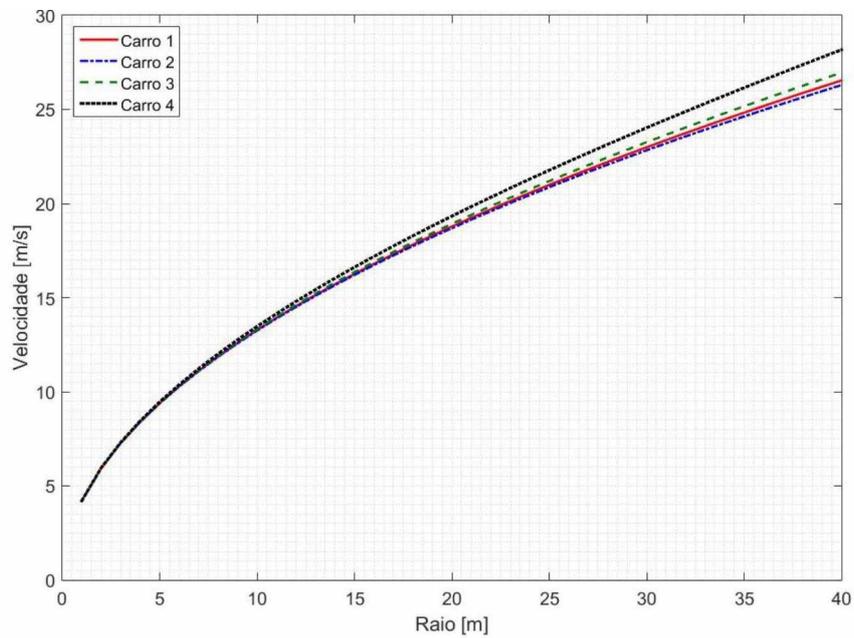


Figura 56 - Velocidade máxima de contorno em função do raio da curva



8.2.4. QUANTIFICAÇÃO DOS DADOS

Nos itens anteriores os resultados foram mostrados de forma gráfica, a fim de quantificar melhor os valores, foi elaborado a tabela 5. Os resultados mostram que os carros sem asas apresentam melhores resultados somente em situação de aceleração, enquanto os alados se mostram mais eficientes em curvas e frenagens.

Foi feita uma tentativa de quantificar os valores em tempos de volta em um circuito de Fórmula SAE. A pista é composta por predominantemente com curvas, de diversos raios, e com acelerações e frenagens. O tempo dos modelos é mostrado na última linha da tabela 5.

Através do resultado do tempo na pista, foi possível afirmar que carros com asas se mostraram mais eficientes para uma competição de Formula SAE. Uma vez que o tempo de volta obtidos pelos modelos 3 e 4 foram mais baixos.

Tabela 7 - Quantificação dos valores

Número do carro	1	2	3	4
Velocidade máxima[km/h]:	193,498	202,678	182,264	171,7671
Tempo em 75m [s]:	3,685	3,678	3,721	3,735
Velocidade em 75m [s]:	33,222	33,411	32,615	32,309
Tempo aceleração 0-100km/h [s]:	2,619	2,601	2,711	2,745
Distância aceleração 0-100km/h [m]:	42,331	41,911	44,368	45,158
Tempo frenagem 100-0km/h [s]:	1,547	1,561	1,527	1,481
Distância frenagem 100-0km/h [m]:	21,302	21,588	20,885	19,953
Tempo destracionando [s]:	0,973	0,972	0,937	0,938
Arrasto a 100km/h [N]:	245,820	213,630	294,4386	352,086
Sustentação a 100km/h [N]	8,212	60,212	-80,469	-318,32
Eficiência aerodinâmica:	-0,0334	-0,2818	0,2733	0,9041
Tempo no Skidpad [s]:	4,230	4,238	4,217	4,182
Tempo na pista [s]:	46,566	46,659	46,591	46,075

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tinha como objetivo verificar se o código MFSim seria capaz de solucionar o problema imposto tanto no carro com asas quanto no modelo alado, impondo condições de contorno como velocidade da face inferior do domínio e a rotação nas rodas.

Apesar de malha grosseira, o MFSim apresentou valores de coeficientes de arrasto e sustentação próximos do Ansys Fluent para o modelo sem asas, uma vez que apresenta bom rendimento em corpos rombudos. Já na simulação do carro alado, os resultados foram discrepantes, uma vez que o MFSim possui dificuldade em trabalhar com superfícies esbeltas, como asas. Este problema deve ser resolvido nas próximas versões do código.

Os resultados dos coeficientes de arrasto encontrados através da simulação computacional se encontraram dentro de uma faixa aceitável para carros de competição da Fórmula SAE. As equipes com asa divulgam valores entre 0,7 e 0,8 de coeficiente de arrasto, desta forma, 0,7875 é um valor dentro do esperado.

Com relação ao desempenho dos carros, os carros sem asas se mostraram mais eficientes em situações de aceleração, enquanto os com asas em situação de curvas e frenagens, apesar de maior massa. No tempo de pista o carro com asas se mostrou mais eficiente.

Como previsão de trabalhos futuros, poderá ser feita o estudo em túnel de vento a fim de comparar com o MFSim, além de testar com asas com outras geometrias e com difusor. Com o carro construído, também poderá ser feito testes práticos.

10. REFERÊNCIAS

BRUNETTI, F., “Motores de Combustão Interna”, Volume 1, Blucher, 2ª edição 1992.

FSAE Rules 2017-18, disponível em: <https://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf>, acessado em 27/07/18.

MORTEL, F., “Cranfield Team F1: The front wing”, partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science, Cranfield University, 2003.

NÓS, R. L., “Simulações de Escoamentos Tridimensionais Bifásicos Empregando Métodos Adaptativos e Modelos de Campo de Fase”, tese de doutorado IME-USP, 2007.

RODRIGUES, L. E. M. J., “Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho”, 1ª Edição, Edição do Autor, 2014.

SILVEIRA NETO, A. “Turbulência nos Fluidos Aplicada”. Apostila utilizada na disciplina de turbulência nos fluidos na Universidade Federal de Uberlândia, 2015. 150p

WHITE, F.M., “Mecânica dos Fluidos”, 6ed, AMGH Editora Ltda, 2011.

APÊNDICE I – TRATAMENTO DE DADOS NO MFSIM

```

close all;
clc;
clear all;

%% Importar arquivos .dat
car_car = csvread('car_car.dat');
car_diant=csvread('car_diant.dat');
car_tras=csvread('car_tras.dat');
car=car_car+car_diant+car_tras;

asa_car = csvread('asa_car.dat');
asa_diant=csvread('asa_diant.dat');
asa_tras=csvread('asa_tras.dat');
asa=asa_car+asa_diant+asa_tras;

%% Forças e Coeficientes
t_car=car_car(:,1);
cx = car(:,9);
mcx=median(cx);
cy = car(:,11);
mcy=median(cy);
cz = car(:,10);
mcz=median(cz);
mat_car=[cx cy cz];

t_asa=asa_car(:,1);
ax = asa(:,9);
max=median(ax);
ay = asa(:,11);
may=median(ay);
az = asa(:,10);
maz=median(az);
mat_asa=[ax ay az];

f_car=[mcx mcy mcz];
f_asa=[max may maz];

area_car=0.6820;
area_asa=0.8422;
area_eixo=0.57*0.18*2;
area_socar=0.6352;
area_soasa=0.4224;
rho=1.2;
vel=15;

c_car=f_car*2/(rho*vel^2*area_car);
c_asa=f_asa*2/(rho*vel^2*area_asa);

disp('Força          Sem asas em X   Com asas em X   Sem asas em Y   Com asas Y')
disp(['Carroceria em : ', num2str(mean(car_car(:,9))),'          ', num2str(mean(asa_car(:,9))),'          ',
num2str(mean(car_car(:,11))),'          ', num2str(mean(asa_car(:,11)))])
disp(['Eixo dianteiro: ', num2str(mean(car_diant(:,9))),'          ', num2str(mean(asa_diant(:,9))),'          ',
num2str(mean(car_diant(:,11))),'          ', num2str(mean(asa_diant(:,11)))])

```

```

disp(['Eixo traseiro : ', num2str(mean(car_tras(:,9))), ' ', num2str(mean(asa_tras(:,9))), ' ',
num2str(mean(car_tras(:,11))), ' ', num2str(mean(asa_tras(:,11)))])
disp(['Total : ', num2str(mean(car(:,9))), ' ', num2str(mean(asa(:,9))), ' ',
num2str(mean(car(:,11))), ' ', num2str(mean(asa(:,11)))])

disp(' ')
disp('Coeficientes Sem asas em X Com asas em X Sem asas em Y Com asas Y')
disp(['Carocceria em : ', num2str(mean(car_car(:,9))*2/(rho*vel^2*area_soasa)), ' ',
num2str(mean(asa_car(:,9))*2/(rho*vel^2*area_soasa)), ' ',
num2str(mean(car_car(:,11))*2/(rho*vel^2*area_socar)), ' ',
num2str(mean(asa_car(:,11))*2/(rho*vel^2*area_soasa))])
disp(['Eixo dianteiro: ', num2str(mean(car_diant(:,9))*2/(rho*vel^2*area_eixo)), ' ',
num2str(mean(asa_diant(:,9))*2/(rho*vel^2*area_eixo)), ' ',
num2str(mean(car_diant(:,11))*2/(rho*vel^2*area_eixo)), ' ',
num2str(mean(asa_diant(:,11))*2/(rho*vel^2*area_eixo))])
disp(['Eixo traseiro : ', num2str(mean(car_tras(:,9))*2/(rho*vel^2*area_eixo)), ' ',
num2str(mean(asa_tras(:,9))*2/(rho*vel^2*area_eixo)), ' ',
num2str(mean(car_tras(:,11))*2/(rho*vel^2*area_eixo)), ' ',
num2str(mean(asa_tras(:,11))*2/(rho*vel^2*area_eixo))])
disp(['Total : ', num2str(mean(car(:,9))*2/(rho*vel^2*area_car)), ' ',
num2str(mean(asa(:,9))*2/(rho*vel^2*area_asa)), ' ', num2str(mean(car(:,11))*2/(rho*vel^2*area_car)), ' ',
', num2str(mean(asa(:,11))*2/(rho*vel^2*area_asa))])

%% graficos forças

plot(t_car,cx)
hold on
plot(t_asa,ax)
xlabel('Time [s]');
ylabel('Drag [N]');
% title('Drag Vs Time');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Drag [N]');
legend('Without wings','With wings')
t_fim=min(t_asa(end), t_car(end));
t_ini=1;
xlim([t_ini t_fim])

figure ()
plot(t_car,cy)
hold on
plot(t_asa,ay)
xlabel('Time [s]');
ylabel('Força [N]');
% title('Lift Vs Time');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Lift [N]');
legend('Without wings','With wings')
xlim([t_ini t_fim])

disp(' ')
disp(['Tempo final sem asas:', num2str(t_car(end)), 's'])
disp(['Tempo medido sem asas:', num2str(t_car(end)-t_car(1)), 's'])

disp(' ')
disp(['Tempo final com asas:', num2str(t_asa(end)), 's'])
disp(['Tempo medido com asas:', num2str(t_asa(end)-t_asa(1)), 's'])

figure ()
plot(t_car,car_car(:,9))

```

```

hold on
plot(t_car,car_diant(:,9))
plot(t_car,car_tras(:,9))
plot(t_car,car(:,9))
xlabel('Time [s]');
ylabel('Drag [N]');
title('Arrasto no carro sem asas');
xlabel('Tempo [s]');
ylabel('Força de arrasto [N]');
legend('Carenagem','Eixo dianteiro', 'Eixo traseiro', 'Total')
xlim([t_ini t_fim])

```

```

figure ()
plot(t_car,car_car(:,11))
hold on
plot(t_car,car_diant(:,11))
plot(t_car,car_tras(:,11))
plot(t_car,car(:,11))
xlabel('Time [s]');
ylabel('Drag [N]');
title('Sustentação no carro sem asas');
xlabel('Tempo [s]');
ylabel('Força de sustentação [N]');
legend('Carenagem','Eixo dianteiro', 'Eixo traseiro', 'Total')
xlim([t_ini t_fim])

```

```

figure ()
plot(t_asa,asa_car(:,9))
hold on
plot(t_asa,asa_diant(:,9))
plot(t_asa,asa_tras(:,9))
plot(t_asa,asa(:,9))
xlabel('Time [s]');
ylabel('Drag [N]');
title('Arrasto no carro com asas');
xlabel('Tempo [s]');
ylabel('Força de arrasto [N]');
legend('Carenagem','Eixo dianteiro', 'Eixo traseiro', 'Total')
xlim([t_ini t_fim])

```

```

figure ()
plot(t_asa,asa_car(:,11))
hold on
plot(t_asa,asa_diant(:,11))
plot(t_asa,asa_tras(:,11))
plot(t_asa,asa(:,11))
xlabel('Time [s]');
ylabel('Drag [N]');
title('Sustentação no carro com asas');
xlabel('Tempo [s]');
ylabel('Força de sustentação [N]');
legend('Carenagem','Eixo dianteiro', 'Eixo traseiro', 'Total')
xlim([t_ini t_fim])

```

APÊNDICE II – CÓDIGO DE COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS

```

close all;
clc;
clear all;

%% Numero de carros
numero_carros=4;
% 1 = MFSim sem asas
% 2 = Ansys sem asas
% 3 = MFSim com asas
% 4 = Ansys com asas

%% Carro base - Todos os carros terão estes dados a menos que sejam alterados no próximo passo
massa=260*ones(1,numero_carros);    % massa
hp=80*ones(1,numero_carros);        % potencia hp
coefatrito=1.8*ones(1,numero_carros); % coeficiente de atrito
rend=0.85*ones(1,numero_carros);     % rendimento da transmissão
distpesoacc=0.8*ones(1,numero_carros); % distribuição de peso na aceleração
res_rol=10*ones(1,numero_carros);    % resistencia de rolagem
area=0.6820*ones(1,numero_carros);   % área frontal
cd=0.77855*ones(1,numero_carros);    % coeficiente de arrasto
cl=0.026011*ones(1,numero_carros);   % coeficiente de sustentação, positivo=lift,
negativo=downforce

%% Dados diferentes - Diferença entre o carro base dos outros modelos analisados
area(2)=0.6917;
cl(2)=-0.6424;
cd(2)=1.0349;
area(3)=0.8422;
cl(3)=-0.20638;
cd(3)=0.75515;
massa(3)=270;
area(4)=0.8481;
cl(4)=-1.5829;
cd(4)=0.8918;
massa(4)=270;

%% Outros dados - Mão mexer a partir daqui
ro=1.2;
dt=1e-4;
dv=1e-7;
g=9.81;
dist_max=75-1e-2;
vmax=100/3.6;
t_max=40-1e-3;
v_aero=100;
fig=0;

%% Arrancada - 75 metros
n=0;
fig=fig+1;
while n<numero_carros
n=n+1;
pot_util(n)=hp(n)*736*rend(n);
t(1,n)=0;
i=1;
e_tot(1,n)=0;

```

```

dist(1,n)=0;
v(1,n)=dt;
a(1,n)=0;
t_d=0;
f(1,n)=0;
while dist(i,n)<dist_max
    f_dis=0.5*ro*cd(n)*area(n)*v(i,n)^2+res_rol(n);
    f(i,n)=pot_util(n)/v(i,n)-f_dis;
    a(i,n)=f(i,n)/massa(n);
    if a(i,n)>coefatrito(n)*g*distpesoacc(n)-f_dis/massa(n)
        a(i,n)=coefatrito(n)*g*distpesoacc(n)-f_dis/massa(n);
        t_d=t_d+dt;
    end
    v(i+1,n)=v(i,n)+a(i,n)*dt;
    dist(i+1,n)=dist(i,n)+v(i+1,n)*dt;
    t(i+1,n)=t(i,n)+dt;
    i=i+1;
end
v_75m(n)=v(i-1,n);
t_75m(n)=t(i,n);
t_destracionando(n)=t_d;
figure (fig)
plot(dist(1:i,n),t(1:i,n))
hold on
fig=fig+1;
figure (fig)
plot(t(1:i,n),v(1:i,n))
hold on
fig=fig+1;
figure (fig)
plot(t(1:i-1,n),a(1:i-1,n))
hold on
fig=fig-2;
end

figure (fig)
grid minor
title(['Tempo x Distância - 75 metros'])
xlabel('Distância [m]')
ylabel('Tempo [s]')
legend('Carro 1','Carro 2','Carro 3','Carro 4','Carro 5','Carro 6','Carro 7')
xlim([0 75])
clc

fig=fig+1;
figure (fig)
title(['Velocidade x Tempo - 75 metros'])
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Velocidade [m/s]')
legend('Carro 1','Carro 2','Carro 3','Carro 4','Carro 5','Carro 6','Carro 7')
grid minor
clc

fig=fig+1;
figure (fig)
title(['Aceleração x Tempo - 75 metros'])
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Aceleração [m/s²]')
legend('Carro 1','Carro 2','Carro 3','Carro 4','Carro 5','Carro 6','Carro 7')
grid minor

```

```

clc

%% Calculos aceleração 0-100km/h
clear a v dist n t f e_tot;
n=0;
fig=fig+1;
figure (fig)
hold on
while n<numero_carros
    n=n+1;
    t(1,n)=0;
    i=1;
    e_tot(1,n)=0;
    dist(1,n)=0;
    v(1,n)=dt;
    a(1,n)=0;
    t_d=0;
    f(1,n)=0;
    while v(i,n)<100/3.6
        f_dis=0.5*ro*cd(n)*area(n)*v(i,n)^2+res_rol(n);
        f(i,n)=pot_util(n)/v(i,n)-f_dis;
        a(i,n)=f(i,n)/massa(n);
        if a(i,n)>coefatrito(n)*g*distpesoacc(n)-f_dis/massa(n)
            a(i,n)=coefatrito(n)*g*distpesoacc(n)-f_dis/massa(n);
            t_d=t_d+dt;
        end
        v(i+1,n)=v(i,n)+a(i,n)*dt;
        dist(i+1,n)=dist(i,n)+v(i+1,n)*dt;
        t(i+1,n)=t(i,n)+dt;
        i=i+1;
    end
    t_100(n)=t(i,n);
    d_100(n)=dist(i,n);
    plot(t(1:i,n),v(1:i,n))
end
title(['0-100 km/h'])
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Velocidade [m/s]')
legend('Carro 1','Carro 2','Carro 3','Carro 4','Carro 5','Carro 6','Carro 7')
grid minor
clc

%% Frenagem 100-0km/h
clear a v dist n t f;
n=0;
fig=fig+1;
figure (fig)
hold on
while n<numero_carros
    n=n+1;
    t(1,n)=0;
    i=1;
    v(1,n)=100/3.6;
    a=0;
    dist(1,n)=0;
    while v(i,n)>0    %dist1(i1)<dist_max
        f(i,n)=-coefatrito(n)*(g*massa(n)-0.5*ro*cl(n)*area(n)*v(i,n)^2)-0.5*ro*cd(n)*area(n)*v(i,n)^2;
        a(i,n)=f(i,n)/massa(n);
        v(i+1,n)=v(i,n)+a(i,n)*dt;
        dist(i+1,n)=dist(i,n)+v(i+1,n)*dt;
    end
end

```

```

        t(i+1,n)=t(i,n)+dt;
        i=i+1;
    end
    t_freio(n)=t(i-1,n);
    dist_freio(n)=dist(i,n);
    plot(t(1:i,n),v(1:i,n))
end

ylim([0 35])
title(['Frenagem'])
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Velocidade [m/s]')
legend('Carro 1','Carro 2','Carro 3','Carro 4','Carro 5','Carro 6','Carro 7')
grid minor
clc

%% Velocidade máxima
clear a v dist t f;
n=0;
fig=fig+1;
figure (fig)
hold on
while n<numero_carros
    n=n+1;
    v(1,n)=0;
    v(2,n)=2*dt;
    t(1,n)=0;
    i=2;
    while v(i,n)-v(i-1,n)>dv && t(i-1,n)<t_max %dist1(i1)<dist_max
        f_dis=0.5*ro*cd(n)*area(n)*v(i,n)^2+res_rol(n);
        f(i)=pot_util(n)/v(i,n)-f_dis;
        a(i)=f(i)/massa(n);
        if a(i)>=coefatrito(n)*g-f_dis/massa(n);
            a(i)=coefatrito(n)*g-f_dis/massa(n);
        end
        v(i+1,n)=v(i,n)+a(i)*dt;
        dist(i+1)=dist(i)+v(i+1,n)*dt;
        t(i,n)=t(i-1,n)+dt;
        i=i+1;
    end
    v_max(n)=v(i,n);
    t(i,n)=t(i-1,n);
    a(i)=a(i-1);
    plot(t(1:i,n),v(1:i,n))
end

title(['Velocidade Máxima'])
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Velocidade [m/s]')
legend('Carro 1','Carro 2','Carro 3','Carro 4','Carro 5','Carro 6','Carro 7')
grid minor
clc

%% Velocidade máxima nas curvas
clear a v dist t f;
n=0;
while n<numero_carros
    n=n+1;
    i=1;

```

```

while i<=40
    raio(i)=i;
    vr(i,n)=sqrt(g/(1/(coefatrito(n)*raio(i))+ro*cl(n)*area(n)/(2*massa(n))));
    av(i,n)=vr(i,n)^2/raio(i);
    i=i+1;
end
end

fig=fig+1;
figure (fig)
plot(raio,av)
hold on;
title('Aceleração lateral em curvas')
grid minor
xlabel('Raio [m]')
ylabel('Aceleração [m/s²]')
legend('Carro 1','Carro 2','Carro 3','Carro 4','Carro 5','Carro 6','Carro 7')

fig=fig+1;
figure (fig)
plot(raio,vr)
hold on;
title('Velocidade máxima em curvas')
xlabel('Raio [m]')
ylabel('Velocidade [m/s]')
legend('Carro 1','Carro 2','Carro 3','Carro 4','Carro 5','Carro 6','Carro 7')
grid minor

%% Pista imaginária
n=0;
while n<numero_carros
    n=n+1;
    t_skidpad(n)=2*pi()*8/vr(8,n);

t_pista(n)=60/vr(5,n)+60/vr(8,n)+70/vr(11,n)+50/vr(14,n)+40/vr(17,n)+20/vr(20,n)+30/vr(25,n)+40/vr(30,n)+60/vr(35,n)+60/vr(40,n)+2*t_75m(n)+2*t_100(n)+2*t_freio(n);
end

%% Downforce e arrasto
n=0;
while n<numero_carros
    n=n+1;
    arrasto(n)=cd(n)*ro*area(n)*(100/3.6)^2/2;
    sustentacao(n)=cl(n)*ro*area(n)*(100/3.6)^2/2;
    eff_aero(n)=-cl(n)/cd(n);
    nc(n)=n+0.0000001;
end

clc
disp(['Número do carro          ',num2str(nc)]);
disp(['Potência útil [kW]:      ',num2str(pot_util/1000)]);
disp(['Velocidade máxima[km/h]:  ',num2str(v_max*3.6)]);
disp(['Tempo em 75m [s]:         ',num2str(t_75m)]);
disp(['Velocidade em 75m [s]:     ',num2str(v_75m)]);
disp(['Tempo aceleração 0-100km/h [s]: ', num2str(t_100)]);
disp(['Distância aceleração 0-100km/h [m]: ', num2str(d_100)]);
disp(['Tempo frenagem 100-0km/h [s]: ', num2str(t_freio)]);
disp(['Distância frenagem 100-0km/h [m]: ', num2str(dist_freio)]);
disp(['Tempo destracionando[s]:     ', num2str(t_destracionando)]);
disp(['Arrasto a 100km/h [N]:      ', num2str(arrasto)]);

```

```
disp(['Sustentação a 100km/h [N]      ' num2str(sustentacao)]);  
disp(['Eficiência aerodinâmica:     ' num2str(eff_aero)]);  
disp(['Tempo no SkidPad [s]:        ' num2str(t_skidpad)]);  
disp(['Tempo na pista imaginária [s]: ' num2str(t_pista)]);
```