UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AERONÁUTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Diego Alejandro Ballén Daza

**Implementação de um pacote
aerodinâmico em um veículo de
Fórmula SAE**

São Carlos
2015

Diego Alejandro Ballén Daza

**Implementação de um pacote
aerodinâmico em um veículo de
Fórmula SAE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Aeronaves

Orientador: Prof. Dr. Fernando Martini Catalano

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-
SE DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECANICA DA
EESC-USP.

São Carlos

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B191i Ballén Daza, Diego Alejandro
Implementação de um pacote aerodinâmico em um
veículo de Fórmula SAE / Diego Alejandro Ballén Daza;
orientador Fernando Martini Catalano. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
Aeronaves -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2016.

1. Aerodinâmica. 2. CFD. 3. Aerofólios
multi-elementos. 4. Veículos de competição. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Físico **DIEGO ALEJANDRO BALLÉN DAZA**.

Título da dissertação: "Implementação de um pacote aerodinâmico em um veículo de Formula SAE".

Data da defesa: 14/12/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Fernando Martini Catalano**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Maria Luisa Bambozzi de Oliveira**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/ICMC)

APROVADO

Prof. Dr. **Roberto Gil Annes da Silva**
(Instituto Tecnológico de Aeronáutica/ITA.)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Agradecimentos

Eu quero agradecer a todas as pessoas que fizeram parte desse trabalho e contribuíram de maneira incondicional a seu desenvolvimento. Primeiramente, ao meu Professor Fernando Martini Catalano, porque ele soube me dar a liberdade de trabalhar nos temas que me apaixonam. À minha nova família, à Nancy e à Maya, porque vocês acreditam comigo naquele sonho que desde criança tenho e não quero soltar; pela sua paciência e companhia permanente enquanto estamos longe da nossa terra; vocês são meu abrigo, sempre sere-mos um time. À minha família lá na Colômbia, porque me enviam seu apoio e cuidam de mim. Aos meus colegas do departamento, aos amigos brasileiros e não brasileiros.

À CNPq pelo seu apoio financeiro durante minha estada no Brasil. Aos patrocinadores que fizeram possível que o nosso trabalho não ficasse no papel, mas que virasse realidade. Contudo, especialmente, quero agradecer à Equipe EESC-USP Fórmula SAE, porque me ajudou a encaminhar meus sonhos e a perceber que quero brincar com carros de corrida o resto da minha vida. Porque aprendi junto com vocês o valor do serviço feito pelo amor, sem condições e com o único objetivo de sermos os melhores, os campeões.

*“Sonhar é necessário,
mesmo quando o sonho vai além da realidade”
(Ayrton Senna)*

Resumo

Ballén-Daza Diego A. **Implementação de um pacote aerodinâmico em um veículo de Fórmula SAE**. 138 p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

Na presente dissertação pretende-se mostrar a motivação, o planejamento e a metodologia usada para desenvolver o projeto e a implementação de um pacote aerodinâmico no veículo de competição da equipe EESC-USP Fórmula SAE da Escola de Engenharia de São Carlos.

O principal objetivo no projeto da equipe é a *dinâmica veicular*. À partir disso, será projetado um pacote aerodinâmico a fim de gerar força de sustentação negativa ou *downforce*, melhorando a capacidade de tração dos pneus com o asfalto da pista e proporcionando maiores valores de aceleração lateral e velocidade nas curvas.

Inicialmente é realizado um estudo para encontrar a melhor configuração nas simulações em dinâmica de fluidos computacional (CFD) a fim de otimizar a relação entre a fiabilidade dos resultados obtidos e o custo computacional deles. Também é feita uma descrição geral dos perfis aerodinâmicos a serem usados e um breve análise deles. Com base nesses resultados são projetados o diferentes dispositivos aerodinâmicos, onde são aplicadas estratégias de alto *downforce* a fim de otimizar o desempenho deles.

Além disso, é realizado uma análise do comportamento aerodinâmico do veículo inteiro, com o intuito de integrar as diferentes componentes do carro que são influenciadas pela aerodinâmica. Também é feito um estudo em dinâmica veicular que visa entender o comportamento do carro em pista sob influência das forças aerodinâmicas.

Finalmente, o modelo real do veículo é construído e é levado para pista a fim de realizar uma série de testes para validar os dados encontrados nas simulações.

Palavras-chave: Aerodinâmica, CFD, aerofólios multi-elementos, veículos de competição.

Abstract

Ballén-Daza Diego A. **Implementation of an aerodynamic package in a Fórmula SAE race car.** 138 p. Master Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2015.

In the present dissertation, it is intended to show the motivation, planning and methodology used to develop the design and implementation of an aerodynamic package in the EESSC-USP Formula SAE's race car of the Engineering School of São Carlos.

The main objective of the team is vehicle dynamics. From this, an aerodynamic package is designed in order to generate negative lift forces known as downforce, improving the traction capacity between the tires and the asphalt of the track, and providing larger values of lateral acceleration and cornering speeds.

Initially, a study to find the best configurations in CFD simulations is performed in order to optimize the rate between reliability of obtained results and computation cost. In addition, a general description and analysis of the aerodynamic profiles used is done. On basis in these results, several aerodynamic devices are designed, and some strategies of high downforce are applied to optimize its performance.

Furthermore, an analysis of aerodynamic behavior of the entire vehicle is done with the purpose of integrating other components of the car influenced by aerodynamics. Also, a study about vehicle dynamics is done searching to understand the behavior of the car in track under the influence of aerodynamic forces.

Finally, the real model of the race car is constructed and put on track in order to carry out several tests to validate found data in simulations.

Keywords: Aerodynamics, CFD, multi-element wings, race cars.

Lista de ilustrações

Figura 1	O primeiro carro em competir oficialmente com um aerofólio foi o Chaparral 2E, o qual tinha a capacidade para variar o ângulo de ataque do aerofólio. Foto tomada de www.imgarcade.com	21
Figura 2	O Lotus 79 do Mario Andretti foi a carro campeão em 1978 e o primeiro em contar com um pacote aerodinâmico. Foto tomada de www.sutton-images.com	22
Figura 3	Geometria da pista de <i>Skid Pad</i> usada na competição de Fórmula SAE Brasil.	26
Figura 4	Tamanho padrão do domínio usado em todas as simulações CFD.	31
Figura 5	Malha estruturada usada em meio domínio do veículo.	31
Figura 6	Malha do domínio computacional distribuída em volumes de controle. Note-se quatro destes volumes em torno ao carro além de um volume mais refinado embaixo do carro	33
Figura 7	Malha de células prismáticas em torno ao aerofólio. A sua implementação permite capturar de maneira adequada a física da camada limite formada na superfície.	33
Figura 8	Malha nos três volumes de controle em torno a asa traseira para os níveis 1, 3 e 6.	35
Figura 9	Detalhe do emalhado entre o <i>mainplane</i> e o <i>flap</i> inferior na asa traseira nos níveis de refinamento 1, 3 e 6. Note-se as camadas de células prismáticas na região da camada limite.	36
Figura 10	Comportamento de C_L em função do nível de refinamento da malha.	37
Figura 11	Comportamento de C_D em função do nível de refinamento da malha.	37
Figura 12	Forma de um perfil aerodinâmico genérico que mostra a terminologia básica dele.	42
Figura 13	A linha vermelha mostra que em um perfil simétrico a corda e a linha de camber são descritas pela mesma reta.	42

Figura 14	Diferença de fluxo e formação da camada limite em perfis com ponto de estagnação longe (A) e perto (B) do bordo de ataque. Foto extraída de Katz (2006).	43
Figura 15	Típico perfil aerodinâmico com o bordo de ataque refinado usado no <i>mainplane</i> de várias equipes de Fórmula 1. Fotos tomadas de www.sutton-images.com	43
Figura 16	Perfil aerodinâmico DBHL usado em algumas asas da aerodinâmica do veículo E13.	44
Figura 17	Análise 2D do coeficiente de sustentação C_L contra ângulo de ataque α para quatro diferentes perfis aerodinâmicos de alta sustentação. . . .	45
Figura 18	Análise 2D do coeficiente de sustentação C_L contra ângulo de ataque α do perfil <i>DBHL</i> para diferentes valores de Re	45
Figura 19	Perfil Benzing Be 122-155 usado em todos os <i>flaps</i> da aerodinâmica do E13.	46
Figura 20	Perfil Benzing Be 153-125 usado no <i>mainplane</i> da asa dianteira do E13. .	47
Figura 21	Dimensões iniciais do <i>endplate</i> de acordo com as regulamentações. Também se mostra a corda c do <i>mainplane</i> que será usada ao longo do projeto.	50
Figura 22	Comportamento do coeficiente de sustentação C_L em função do ângulo de ataque do perfil <i>DBHL</i> em simulações 2D e 3D.	51
Figura 23	Origem do arrasto induzido a partir dos vórtices de ponta de asa. Foto extraída de Anderson JR, J.D.,(2001).	52
Figura 24	Contorno de pressões na simulação 3D do perfil <i>DBHL</i> no meio da envergadura.	52
Figura 25	Perfil de velocidades na simulação 3D do perfil <i>DBHL</i> no meio da envergadura.	53
Figura 26	Contorno de pressões do aerofólio com dois elementos e ângulo de ataque de $\alpha = 30^\circ$. O <i>flap</i> tem corda de $c = 30\%C$ a 75° relativo à velocidade do ar. Imagem tomada no meio da envergadura do aerofólio. .	54
Figura 27	Perfil de velocidades do aerofólio com dois elementos e ângulo de ataque de $\alpha = 30^\circ$. O <i>flap</i> tem corda de $c = 30\%C$ a 75° relativo à velocidade do ar. Imagem tomada no meio da envergadura do aerofólio.	54
Figura 28	Gráfico do comportamento do coeficiente de sustentação C_L em função do ângulo de ataque α do aerofólio para diferentes configurações. . . .	55
Figura 29	Contorno de pressões do aerofólio com três elementos e $\alpha = 35^\circ$. Os <i>flaps</i> tem corda de $c = 40\%C$ a 80° relativo à velocidade do ar. Imagem tomada no meio da envergadura do aerofólio.	56

Figura 30	Perfil de velocidades para a configuração com três elementos. A imagem (a) mostra o posicionamento inicial dos <i>flaps</i> , e a imagem (b) mostra o posicionamento após mudança do ângulo δ_f	56
Figura 31	Ângulo δ_f que determina a posição conjunta dos <i>flaps</i> em relação ao <i>mainplane</i>	57
Figura 32	Comportamento do C_{Lmax} em função do ângulo δ_f . Na configuração inicial, $\delta_f = 80^\circ$	57
Figura 33	<i>Gap-overlap</i> do <i>slot</i> inferior do aerofólio traseiro.	58
Figura 34	Comportamento do <i>downforce</i> máximo em função de diferentes tamanhos do <i>gap</i> para diferentes tamanhos de <i>overlap</i>	58
Figura 35	Comportamento do <i>downforce</i> máximo em função de diferentes tamanhos do <i>gap</i> para diferentes tamanhos de <i>overlap</i> do <i>slot</i> superior.	59
Figura 36	Comportamento do C_L em função do comprimento do <i>gurney flap</i> , dado em termos da corda total C da asa traseira.	60
Figura 37	Comportamento do C_D em função do comprimento do <i>gurney flap</i> , dado em termos da corda total C da asa traseira.	60
Figura 38	Comportamento do C_L em função do ângulo γ do <i>gurney flap</i> na asa traseira.	61
Figura 39	Perfil de velocidades perto do <i>flap</i> superior que mostra os dois vórtices contrarrotantes criados pela ação do <i>gurney flap</i> na asa traseira.	61
Figura 40	Campo de velocidades em um plano localizado no meio da envergadura da asa que mostra o comportamento do fluxo após implementação do <i>beamwing</i>	62
Figura 41	A imagem (a) mostra o primeiro corte frontal-inferior, e a imagem (b) mostra o corte posterior feito na parte superior-traseira do <i>endplate</i>	63
Figura 42	A imagem (a) e (b) mostra o perfil de velocidades e contorno de pressões do aerofólio com <i>endplates</i> retangulares. Já na imagem (c) e (d) mostra-se as mesmas cenas da asa com o corte frontal no <i>endplates</i> . Os planos onde são tomadas essas visualizações estão a 5 mm do <i>endplate</i>	64
Figura 43	Contorno de pressões da asa traseira em um plano a 5 mm da parte externa do <i>endplate</i> com os dois cortes iniciais.	65
Figura 44	Contorno de pressões da asa traseira em um plano a 5 mm da parte externa do <i>endplate</i> implementando todos os cortes.	65
Figura 45	As imagens (a) e (b) mostram escoamento nos cortes laterais sem e com abas, respetivamente. Pode-se notar que na imagem inferior o fluxo adquire uma componente vertical na saída dos cortes.	66
Figura 46	Resultado do C_L e do C_D e dos resíduos da simulação final do aerofólio traseiro com 1200 iterações.	67

Figura 47	<i>Mainplane</i> do aerofólio dianteiro. Note-se o degrau no meio da asa, o qual tem uma corda de $c = 378 \text{ mm}$ e ângulo de ataque 7° . Já nos extremos, o aerofólio possui uma corda de $c = 405 \text{ mm}$ e ângulo de ataque 12°	69
Figura 48	Comportamento do <i>downforce</i> em função do <i>gap</i> no <i>slot</i> inferior para diferentes valores de <i>overlap</i>	69
Figura 49	Comportamento do <i>downforce</i> em função do <i>gap</i> no <i>slot</i> superior para diferentes valores de <i>overlap</i>	70
Figura 50	Campo de velocidades da configuração de três elementos na asa dianteira, a qual tem $\alpha = 44^\circ$. A corda dos <i>flaps</i> combinados é de $38\%C$ a 76° relativo à velocidade do ar.	71
Figura 51	Contorno de pressões da configuração de três elementos na asa dianteira. Imagem tomada a 25% da envergadura.	71
Figura 52	Campo de velocidades na asa dianteira após implementação da configuração em cascata.	72
Figura 53	Contorno de velocidades na asa dianteira após implementação da configuração em cascata.	72
Figura 54	A imagem (a) mostra o contorno de pressões na região de pressão em uma versão não final do aerofólio dianteiro, e a imagem (b) mostra a região de sucção.	73
Figura 55	A imagem (a) mostra o modelo implementando só a placa vertical no <i>endplate</i> ; a imagem (b) mostra só com <i>footplate</i> ; a imagem (c) mostra o modelo usando as duas peças anteriores e a imagem (d) mostra o modelo usando <i>footplate</i> e defletor.	74
Figura 56	Contorno de pressões nas vistas isométrica e inferior do modelo final do aerofólio dianteiro.	75
Figura 57	Gráfico comparativo da distribuição do coeficiente de pressão C_P no aerofólio dianteiro, para alturas de 110 mm e 220 mm em relação ao solo.	76
Figura 58	Contorno de pressões em um plano transversal da asa dianteira. Note-se a criação dos vórtices próximos aos <i>footplates</i>	77
Figura 59	Perfis aerodinâmicos dos canais central e laterais usados no difusor.	78
Figura 60	Imagem inferior do difusor básico e distribuição dos canais dentro dele.	79
Figura 61	A imagem superior mostra o contorno de pressões sem geradores de vórtices e a inferior após implementação deles.	80
Figura 62	A imagem superior mostra as linhas de fluxo no difusor básico, ou seja, sem geradores de vórtices nem defletores. Já na imagem inferior são mostradas as linhas de fluxo no difusor final, após implementação dos geradores de vórtices e os defletores.	81

Figura 63	Ângulo de deriva formado entre a direção do vento e a direção de avanço do veículo.	84
Figura 64	Comportamento do C_L do carro inteiro em função do ângulo de deriva β_W	85
Figura 65	<i>Downforce</i> em função do ângulo de deriva β_W para cada uma das principais componentes aerodinâmicas do carro.	85
Figura 66	Comportamento do C_M do carro inteiro em função do ângulo de deriva β_W . Note-se a faixa entre 10° e 15° onde é gerado um espaçamento entre os pneus dianteiro e traseiro.	86
Figura 67	Vista com direção do vento incidente no veículo. Na imagem esquerda o carro tem ângulo de deriva de 10° e na direita de 15° . Note-se o espaçamento entre os pneus dianteiro e traseiro do veículo a partir de 10°	86
Figura 68	Comportamento do C_D do carro inteiro em função do ângulo de deriva β_W	87
Figura 69	O centro de pressão diante do centro de gravidade pode gerar instabilidade em situações de curva e $\beta_W \neq 0$	88
Figura 70	No caso onde o centro de pressão está atrás do centro de gravidade, o veículo é mais estável e diminui a influencia das forças laterais provenientes dos ventos cruzados.	88
Figura 71	Comportamento da posição x do centro de pressão cp em função do ângulo de deriva β_W	89
Figura 72	Comportamento do C_L em função da altura mínima da asa dianteira. .	90
Figura 73	Vista ampliada do pico de desempenho da asa dianteira. A distância entre as linhas verdes denota a faixa da altura que o carro se movimenta. A linha vermelha mostra a posição final da asa.	90
Figura 74	Linhas de fluxo que chegam ao filtro de ar da admissão do motor. . . .	91
Figura 75	Vista superior do carro que mostra as linhas de fluxo que são desviadas da roda pelo defletor na asa dianteira e posteriormente chegam ao radiador.	92
Figura 76	Linhas de fluxo que chegam ao radiador do veículo.	92
Figura 77	Contorno de pressões em torno à parte frontal do veículo. Pode-se ver a ponta refinada do bico e a pequena região de alta pressão entre ele e a asa dianteira.	93
Figura 78	Configuração de aceleração nos dois aerofólios para diminuição de arrasto. .	94
Figura 79	Contorno de pressões e comparação da vista frontal do veículo nas configurações original (esquerda) e de baixo arrasto (direita).	95
Figura 80	Contorno de pressões comparando as linhas de fluxo na asa traseira nas configurações original (superior) e de baixo arrasto (inferior).	96

Figura 81	Imagens das simulações CFD	97
Figura 82	Modelo final do E13 em CAD renderizado.	98
Figura 83	Esquema da pista de <i>Skid Pad</i> montado para os testes em pista e que reproduz as medidas estabelecidas na regra.	100
Figura 84	Tempo médio medido de cada piloto em cada uma das tomadas, no teste em pista de <i>Skid Pad</i>	101
Figura 85	<i>Dash Logger</i> TDL 4.3, da empresa Pro Tune.	103
Figura 86	Kartódromo Adalberto Cattani em Araraquara (SP).	104
Figura 87	O E13 sem aerodinâmica na pista de Araraquara.	104
Figura 88	O E13 sem aerodinâmica na pista de Araraquara. Note-se um <i>slalom</i> feito com uma série de cones colocados em fila no meio da pista.	105
Figura 89	Comportamento da rapidez em função da distância nos testes em pista no kartódromo de Araraquara.	106
Figura 90	Comportamento da rapidez em função do tempo nos testes em pista no kartódromo de Araraquara.	107
Figura 91	Comportamento da aceleração lateral em função da distância nos testes em pista no kartódromo de Araraquara.	107
Figura 92	Autódromo Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo (ECPA), em Piracicaba (SP).	108
Figura 93	Feedback do piloto em um dos testes no ECPA.	108
Figura 94	Comportamento da rapidez em função da distância nos testes em pista no autódromo do ECPA.	109
Figura 95	Comportamento da aceleração longitudinal em função da distância nos testes em pista no autódromo do ECPA.	110
Figura 96	Comportamento da aceleração lateral em função da distância nos testes em pista no autódromo do ECPA.	110
Figura 97	Imagens do E13 com as três configurações aerodinâmicas usadas nos testes de aceleração.	112
Figura 98	Comportamento da velocidade em função da distância no teste de aceleração.	113
Figura 99	Comportamento da distancia percorrida em função da tempo, no teste de aceleração.	113
Figura 100	Comportamento da velocidade em função da distância no teste de Coast Down.	114
Figura 101	Comportamento da velocidade em função do tempo no teste de Coast Down.	114
Figura 102	Comportamento da temperatura do motor em um teste da prova de Enduro	116

Figura 103	Comportamento da velocidade tangencial em função da massa total do veículo no teste de <i>skid pad</i>	118
Figura 104	O E13, da Equipe EESC-USP Formula SAE, campeão 2015 do Campeonato Nacional de Formula SAE.	122
Figura 105	Moldes fabricados em MDF e usinados em CNC na empresa Eikotekc. .	132
Figura 106	Duas metades do molde do <i>mainplane</i> do aerofólio dianteiro.	132
Figura 107	A imagem esquerda mostra o molde em MDF depois de fazer nele um tratamento com massa rápida e dar um lixamento com várias gramaturas ate ficar com acabamento destacado. Na imagem da direita pode-se ver a peça final depois de ser curada e desmoldada.	133
Figura 108	Análise estrutural da asa traseira, o qual mostra que tem uma flexão máxima de 3 mm na região central do primeiro <i>flap</i> , a 200 km/h . . .	134
Figura 109	Na imagem esquerda pode-se ver a manufatura do <i>endplate</i> no CNC. A imagem direita mostra uma das fixações da asa traseira depois de ser cortada no CNC.	135
Figura 110	A imagem esquerda mostra as nervuras da estrutura de interna sendo cortadas no CNC. A imagem direita mostra as peças em alumínio –cortadas com laser– colocadas nas pontas da asa.	135
Figura 111	Posicionamento das nervuras, as pontas de alumínio e a longarina no <i>beamwing</i> . Esse procedimento deve ser altamente preciso, pois todos os aerofólios da asa traseira devem ter exatamente a mesma medida da envergadura, para que o <i>endplate</i> fique posicionado de maneira correta.	136
Figura 112	A imagem esquerda mostra a estrutura interna e fixações no modelo em CAD, e a imagem direita mostra a montagem final da estrutura interna, fixações e <i>endplates</i> da asa traseira.	136
Figura 113	A imagem esquerda mostra a os núcleos dos aerofólios de menor tamanho feitos em espuma estrutural e usinados em CNC. A imagem direita mostra a estrutura interna e fixações da asa dianteira.	137
Figura 114	Assoalho difusor do veículo. Note-se os defletores e geradores de vórtices na imagem inferior.	138
Figura 115	O E13 saindo pela primeira vez da oficina da equipe EESC-USP Fórmula SAE.	138

Lista de tabelas

Tabela 1	Pontuação máxima de cada prova na competição de Fórmula SAE. . .	23
Tabela 2	Parâmetros gerais do carro usados no software <i>Optimum Lap</i>	26
Tabela 3	Resultados obtidos na simulação em <i>Optimum Lap</i>	27
Tabela 4	Caraterísticas fixas da malha em todas as simulações CFD nesse projeto.	34
Tabela 5	Seis diferentes níveis de refinamento da malha na simulação da asa traseira, sendo o nível 1 o menos refinado e o 6 o mais refinado.Os valores desde a 2° até a 6° coluna representam uma porcentagem do tamanho base indicado na Tabela 4. Ou seja, quanto maior é o número menos refinada é uma região. As colunas Vl. 1, Vl. 2 e Vl. 3 são os volumes de controle em torno da asa, sendo Vl. 1 o menor e o Vl. 3 o maior.	34
Tabela 6	Caraterísticas fixas da malha em todas as simulações CFD nesse projeto.	39
Tabela 7	Principais caraterísticas geometricas do Perfil DBHL	44
Tabela 8	Resultados finais e evolução do C_L , <i>downforce</i> , C_D e arrasto após cada estratégia implementada no aerofólio traseiro.	67
Tabela 9	Resultados finais e evolução do C_L , <i>downforce</i> , C_D e arrasto após cada estratégia implementada no aerofólio dianteiro.	77
Tabela 10	Resultados finais e evolução do C_L , <i>downforce</i> , C_D e arrasto após cada estratégia implementada no assoalho difusor.. . . .	81
Tabela 11	Resultados das simulação CFD do veículo com a configuração de aceleração.	95
Tabela 12	Resultados físicos nas simulação CFD do veículo com a configuração de aceleração.	97
Tabela 13	Valores médios totais de tempo, velocidade e aceleração para cada piloto com o veículo sem aerodinâmica.	101

Tabela 14	Valores médios totais de tempo, velocidade e aceleração para cada piloto com o veículo com aerodinâmica.	101
Tabela 15	Valores físicos usados para o cálculo do <i>downforce</i> e o C_L	102
Tabela 16	Resultados do teste em pista na prova de <i>Skid Pad</i>	102
Tabela 17	Resultados do teste em pista na prova de <i>Skid Pad</i>	102
Tabela 18	Resumo dos resultados do teste de aceleração.	111
Tabela 19	Resumo dos resultados do teste de <i>Coast Down</i>	115
Tabela 20	Comparativa dos resultados do C_L no teste de <i>skid pad</i> e nas simulações CFD.	117
Tabela 21	Relação entre o possível valor de ângulo de deriva no teste em pista de <i>Skid pad</i> , e o erro associado em relação ao valores obtidos nas simulações CFD.	119
Tabela 22	Resumo dos resultados do teste de <i>Coast Down</i>	120

Lista de siglas

C_L Coeficiente de sustentação

C_D Coeficiente de arrasto

C_M Coeficiente de momento

α Ângulo de ataque

α_{eff} Ângulo de ataque efetivo

A Área de referência

ρ Densidade do ar

v Velocidade

c Corda

C Corda total

Re Número de Reynolds

$\mathcal{R}$ Relação de aspecto

b Envergadura

W Peso

M Massa

δ_f Ângulo conjunto de flaps

β_W Ângulo de deriva

h Altura

μ Coeficiente de atrito

γ Ângulo do Gurney Flap

cp Centro de pressão

cg Centro de gravidade

$\dot{m}$ Vazão mássica de ar

g Aceleração gravitacional

a Aceleração

F_r Resistência ao rolamento

C_r Coeficiente de rolamento

Sumário

1	Introdução	21
1.1	Natureza e importância do problema	23
1.2	Estado do arte	27
2	Parâmetros e critérios nas simulações CFD	29
2.1	Configuração das simulações	30
2.2	Geração da malha e análise de independência	32
2.2.1	Volumes de controle	32
2.2.2	Tratamento da camada limite	32
2.2.3	Análise de independência	34
2.3	Condições físicas e modelos de turbulência	37
2.3.1	Modelos de turbulência	38
2.3.2	Outras condições físicas	39
3	Análise dos perfis aerodinâmicos	41
3.1	Preliminares	41
3.2	Seleção dos perfis aerodinâmicos	41
3.2.1	Perfil DBHL	44
3.2.2	Perfil Be 122-155	45
3.2.3	Perfil Be 153-125	46
4	Elementos aerodinâmicos	49
4.1	Preliminares	49
4.2	Asa traseira: configuração e estratégias de otimização	49
4.2.1	Aerofólio de um elemento	51
4.2.2	Aerofólio multi-elementos	53
4.2.3	Posicionamento dos flaps	55
4.2.4	Otimização do gap-overlap	57

4.2.5	Gurney Flap	59
4.2.6	Beamwing	61
4.2.7	Endplates	63
4.2.8	Análise dos resultados	65
4.3	Asa Dianteira: configuração e estratégias de otimização	68
4.3.1	Configuração do Mainplane	68
4.3.2	Posicionamento dos flaps e Gurney flap	69
4.3.3	Configuração em cascata	70
4.3.4	Endplates	73
4.3.5	Efeito solo	76
4.3.6	Análise dos resultados	77
4.4	Assoalho difusor	78
4.4.1	Geradores de vórtices	79
4.4.2	Defletores	79
5	Aerodinâmica do veículo inteiro	83
5.1	Preliminares	83
5.2	Dinâmica veicular	83
5.2.1	Análise aerodinâmica com ângulos de deriva	83
5.2.2	Centro de pressão e estabilidade	87
5.3	Integração com outros subsistemas	89
5.3.1	Suspensão	89
5.3.2	Powertrain	91
5.3.3	Freio	92
5.3.4	Bico	93
5.4	Aerodinâmica do veículo inteiro	94
5.4.1	Configuração para Aceleração	94
5.4.2	Análise de resultados	95
6	Testes em pista	99
6.1	Preliminares	99
6.2	Teste de Skid Pad	100
6.3	Teste de Circuito	103
6.3.1	Teste de circuito no Kartódromo Adalberto Cattani	103
6.3.2	Teste de circuito no ECPA	106
6.4	Testes de aceleração e arrasto aerodinâmico	111
6.4.1	Teste de Aceleração	111
6.4.2	Teste de Coast Down	111
6.5	Outros testes	115

7	Análise dos resultados	117
7.1	Resultados de coeficiente de sustentação C_L	117
7.1.1	Possíveis causas de erro no C_L	118
7.2	Resultados de coeficiente de arrasto C_D	119
7.2.1	Possíveis causas de erro no C_D	120
7.2.2	Outras possíveis causas de erro no C_L e no C_D	120
7.3	Resultados dos testes em circuito	121
	Conclusão	123
	Referências	127
	APÊNDICE A Manufatura, materiais e estrutura	131
A.1	Manufatura da asa traseira	131
A.2	Manufatura da asa dianteira e do difusor	137

CAPÍTULO 1

Introdução

A aerodinâmica em veículos de competição têm grande importância devido a sua capacidade para melhorar de maneira significativa o desempenho destes. Em muitas das grandes categorias do automobilismo incluindo Fórmula 1, GP2, Fórmula 3, Le Mans e Indy, a carga aerodinâmica é o elemento mais importante no desempenho do carro em pista, até o ponto de ser o eixo principal em torno ao qual os veículos são projetados em estas e em outras categorias.

O piloto e engenheiro Jim Hall foi oficialmente o primeiro em montar um aerofólio em um veículo de competição, o Chaparral 2E, visto na Figura 1, o qual rapidamente virou um carro vitorioso em 1966. Nesse mesmo ano, vários construtores no automobilismo americano começaram a aplicar esta ideia para correr em Indianápolis, mas em 1968 tornou-se mais popular quando o primeiro carro de Fórmula 1, o Ferrari V12 3000 começou a usar um aerofólio e imediatamente tomou a liderança nas provas.

Figura 1 – O primeiro carro em competir oficialmente com um aerofólio foi o Chaparral 2E, o qual tinha a capacidade para variar o ângulo de ataque do aerofólio. Foto tomada de www.imgarcade.com.

Alguns anos depois, o fundador da Lotus, Colin Chapman junto com seu engenheiro Peter Wright, foram os primeiros em entender o efeito solo e em introduzir um pacote de dispositivos aerodinâmicos que fizeram o Lotus 79 (Figura 2) o carro vencedor em 1978. Á partir daquela época, a aerodinâmica em veículos de competição tem explorado diversas linhas de pesquisa desde suas formas mais básicas, até complexas configurações vistas hoje nas categorias automobilísticas mais importantes do mundo.

Figura 2 – O Lotus 79 do Mario Andretti foi o carro campeão em 1978 e o primeiro em contar com um pacote aerodinâmico. Foto tomada de www.sutton-images.com.

O uso da aerodinâmica nos veículos de competição tem evoluído como uma área alternativa das bem sucedidas práticas aeronáuticas, devido entre outras coisas aos valores de número de Reynolds, interação com o solo, baixa relação de aspecto dos aerofólios e em geral à complexidade do campo de fluxo em torno a um veículo. Os esforços têm sido principalmente focados na procura de *downforce*, uma força vertical inversa à sustentação que busca incrementar a aderência dos pneus com a pista, melhorando o desempenho do veículo em traçados curvos. Embora as fontes mais importantes de exploração de *downforce* são os aerofólios invertidos e o efeito solo, nos últimos anos incrementou-se a pesquisa em dispositivos e formas menos comuns como os geradores de vórtices, diversos tipos de defletores, fendas e *endplates* entre outros, conduzindo às formas altamente complexas vistas hoje.

Além dos fatores puramente humanos, o sucesso ou fracasso de um veículo voltado para competir depende de diversas tecnologias como a potência do motor, a aderência dos pneus ou o desenho do chassi, entre outras. Contudo, a aerodinâmica desenvolve uma das funções mais importantes, uma vez que tem demonstrado que pode ser o fator diferencial entre veículos que alcançam altos níveis de desenvolvimento. Isto é devido a que a aerodinâmica é a área menos entendida e explorada de todas as tecnologias listadas acima, apesar de ser o alvo dos maiores investimentos de dinheiro usados principalmente

em materiais de alto desempenho, túneis de vento e computadores com alta capacidade de processamento.

Neste trabalho, pretende-se mostrar da maneira mais aberta possível a implementação de uma série de dispositivos e técnicas aerodinâmicas usadas em um veículo de competição de uma categoria do automobilismo amplamente difundida: a Fórmula SAE.

1.1 Natureza e importância do problema

A Fórmula SAE é a maior competição de engenharia do mundo e é organizada pela SAE Internacional, onde um grupo de estudantes formam uma equipe que projeta e constrói um protótipo de corridas tipo fórmula, ou seja, um veículo de um só lugar, com rodas descobertas e tração traseira. Na competição, o carro é avaliado por uma série de juízes em diferentes provas tanto estáticas quanto dinâmicas. A máxima pontuação possível em cada prova é descrita na Tabela 1.

Evento	Pontuação
Provas estáticas	
Projeto	150
Apresentação	75
Custos e manufatura	100
Provas dinâmicas	
Aceleração	75
Skid Pad	50
Autocross	150
Enduro	300
Eficiência de combustível	100
Total	1000

Tabela 1 – Pontuação máxima de cada prova na competição de Fórmula SAE.

As provas estáticas incluem o evento de Projeto, Apresentação e Custos e Manufatura. No evento de *Projeto* cada equipe apresenta de maneira específica o desenvolvimento do protótipo, desde os conceitos usados para iniciar o projeto, até a etapa de manufatura e validação dos dados obtidos no veículo. Essa prova visa quantificar a capacidade de inovação e o uso de ferramentas das equipes para projetar e construir o veículo. Na prova de *Apresentação*, a equipe simula ser uma empresa que tem que demonstrar a capacidade e a metodologia para produzir o protótipo em série e ser viável financeiramente. Finalmente, em *Custos e Manufatura*, é avaliado o uso dos recursos financeiros e os processos da manufatura do protótipo.

A etapa das provas dinâmicas está constituída pelos eventos de Aceleração, *Skid Pad*, *Autocross*, Enduro e Eficiência de combustível. Na prova de Aceleração, é julgada a capacidade do veículo para percorrer 75 m em uma trajetória reta no menor tempo possível,

largando do repouso. Na prova de *Skid Pad* o carro deve percorrer uma circunferência de aproximadamente 9.1 m de raio médio nos dois sentidos. Nessa prova é avaliada a estabilidade do carro e a aceleração lateral que ele é capaz de fornecer em curvas. No evento de *Autocross*, a máxima pontuação será entregue ao carro que consiga percorrer um *sprint* de aproximadamente 1.2 km, no menor tempo possível. O *sprint* é uma pista mista com muitas curvas acentuadas, *slalons* e *gates*, algumas curvas rápidas e poucas retas curtas. A regra estabelece que a velocidade média por volta no *Autocross* deve ser de 48 km/h.

Finalmente, a prova de Enduro visa avaliar a resistência do protótipo. Esse evento é feito em um circuito com características similares ao *Autocross*, porém o veículo deve percorrer 22 km no menor tempo possível. O regulamento diz que velocidade média no evento de Enduro deve ser de aproximadamente 57 km/h. Os veículos são abastecidos pela organização antes dessa última prova. Depois de ser concluída, os juízes conferem o consumo que o carro teve no Enduro, a fim de avaliar a eficiência no uso de combustível.

Pode-se notar que a competição leva em consideração quase todos as características do veículo, no entanto, a maioria dos eventos dinâmicos (exceto Aceleração) tendem a exigir um carro ágil e rápido nas curvas, pois as pistas de *Autocross* e o Enduro usualmente têm trajetórias curvas bem acentuadas, e poucas retas. Por isso, a Equipe EESC-USP Fórmula SAE decidiu construir o veículo de 2015 -denominado E13- baseado no conceito da dinâmica veicular, onde uma das prioridades é a baixa massa do veículo, e principalmente, a capacidade de percorrer rapidamente e de maneira estável as curvas.

Para atingir esse objetivo, alguns sistemas do veículo precisam de especial desenvolvimento, como a suspensão e a *aerodinâmica*. No caso de um carro de corridas, a aerodinâmica desempenha um papel fundamental na dinâmica dele, pois ela é projetada principalmente para criar um gradiente de pressões em torno ao carro a fim de gerar uma força resultante descendente, conhecida como *downforce*, que acrescenta força normal no carro e portanto, incrementa a força de atrito entre os pneus e o asfalto da pista. Esse aumento de aderência melhora a capacidade de tração do veículo, impedindo que os pneus escorreguem quando são submetidos à força centrípeta que o carro experimenta quando está seguindo trajetórias curvas, conseguindo maior velocidade no percurso do circuito.

Criar o efeito anteriormente dito, implica outras conseqüências como o aumento do arrasto, que é uma força em sentido oposto ao avanço do veículo e influi diretamente na dinâmica dele e na eficiência no uso de combustível. Embora o arrasto pode trazer vantagens como uma maior capacidade de desaceleração linear do veículo, em geral são mais as desvantagens que o arrasto oferece.

Outra desvantagem radica em que a implementação de elementos aerodinâmicos em um veículo de competição muda significativamente o fluxo de ar em torno a ele. Isto pode afastar o fluxo de ar de regiões críticas que precisam um mínimo de fluido para garantir ótimo funcionamento, como os discos dos freios, a admissão de ar para o motor ou o

radiador, entre outras.

No presente projeto, os elementos que fazem parte do pacote aerodinâmico são o aerofólio dianteiro, o aerofólio traseiro e o difusor. O aerofólio dianteiro é um elemento fundamental, pois além de criar parte do *downforce* também tem a função de distribuir o ar em torno ao carro. O aerofólio traseiro busca balançar as forças geradas pela asa dianteira através da geração de *downforce* na parte posterior do veículo, onde o torque e a potência do motor são transmitidos e podem ocorrer maiores perdas. Finalmente, o difusor é um elemento que busca incrementar a velocidade do ar que passa embaixo do veículo através de uma geometria complexa e aproveitando a proximidade dele com o solo.

Para entender a importância do problema, devem-se considerar as forças de sustentação L e arrasto D geradas pelo movimento do ar em volta de um corpo. Essas forças estão relacionadas com parâmetros como a densidade do ar ρ , a área de referência A do corpo, o coeficiente adimensional de força C_L e C_D e a velocidade relativa do ar v , através das respectivas expressões,

$$L = \frac{1}{2}\rho AC_L v^2, \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{2}\rho AC_D v^2. \quad (2)$$

Do anterior conclui-se que a velocidade é o fator que tem maior influência na variação das forças aerodinâmicas, pois mudam em função do quadrado dela. Diferente de outras categorias do automobilismo, as velocidades atingidas no campeonato de Fórmula SAE não são muito altas, chegando a velocidades médias entre 48 *km/h* e 57 *km/h* em provas como *Skid Pad*, *Autocross* e *Enduro*. Por causa dessas relativas baixas velocidades, no círculo da Fórmula SAE ainda existem discussões em torno a quão significativo pode ser o ganho em tempo e desempenho de um veículo de Fórmula SAE com aerodinâmica. Um dos objetivos nesse projeto é mostrar uma serie de resultados que possam responder à anterior questão.

Antes de empreender o desenvolvimento do pacote aerodinâmico, é justo saber se este fornecerá melhorias significativas no veículo, de modo que o projeto e construção dele traga vantagens importantes. Para isso, foram feitas uma serie de simulações no software de massa concentrada *Optimum Lap*¹. Uma vez que é necessário saber quão significativo é o ganho no desempenho do veículo em curvas de raios curtos, no *Optimum Lap* foi criada uma pista similar à da prova de *Skid Pad*, tal como mostra a Figura 83, e foi analisado o comportamento do carro com e sem aerodinâmica.

Com esse teste virtual, procura-se saber com razoável precisão os efeitos da aerodinâmica na aceleração lateral e a velocidade média do carro em curvas de diâmetro reduzido,

¹*Optimum Lap* é um software que simplifica simulações de dinâmica veicular a partir de 10 parâmetros básicos do carro. Embora os resultados desse software estão próximos a 90% de fidelidade, eles fornecem a informação suficiente para que seja fácil identificar os efeitos de cada um desses parâmetros.

Figura 3 – Geometria da pista de *Skid Pad* usada na competição de Fórmula SAE Brasil.

pois essa é a principal característica da maioria das provas dinâmicas. Em outras palavras, projetando um veículo com maior capacidade para tomar curvas de maneira rápida, sacrificando altas velocidades, existe uma maior possibilidade de atingir maior pontuação no campeonato. Por outro lado, elaborar um protótipo com essas características representa um maior desafio, pois projetar um veículo de competição com alto desempenho em curvas significa desenvolver projetos mais avançados em *powertrain*, transmissão, chassi, freios e especialmente, suspensão e aerodinâmica. Isso significa que também existe maior probabilidade de se obter maior pontuação na prova de Projeto, que junto com *Autocross* e Enduro são as provas de maior pontuação da competição.

Parâmetro	Valor
Densidade do ar	1.225 kg/m^3
Área Frontal	1.27 m^2
Potência do motor	55 hp
Torque a 5000 rpm	37 Nm
Massa do pacote aerodinâmico	15 Kg
Massa total do carro incluso o piloto	260 kg
Coefficiente de sustentação $C_{L_{0/1/2}}$	0.2/ - 2/ - 2.5
Coefficiente de arrasto $C_{D_{0/1/2}}$	0.5/1/1.5

Tabela 2 – Parâmetros gerais do carro usados no software *Optimum Lap*

Alguns dos parâmetros que foram assumidos na simulação no *Optimum Lap* são descritos na Tabela 2. O parâmetro da massa do carro é uma extrapolação feita com base

	Sem Aerodin.	Com Aerodin.		Melhora (%)	
	C_{L_0} e C_{D_0}	C_{L_1} e C_{D_1}	C_{L_2} e C_{D_2}	C_{L_1} e C_{D_1}	C_{L_2} e C_{D_2}
Veloc. media [km/h]	36,76	41,83	42,41	13.8	15.4
Aceler. lateral [g]	1.16	1.51	1.55	30.2	33.6
Tempo [s]	5.62	4.93	4.87	12.3	13.3

Tabela 3 – Resultados obtidos na simulação em *Optimum Lap*.

nos valores da massa de veículos da EESC USP Fórmula SAE nos anos anteriores. O valor assumido da massa do pacote aerodinâmico e os valores do C_L e o C_D foram estabelecidos a partir dos valores atingidos pela nossa Equipe no carro anterior (o E12) e fazendo comparações com varias equipes de alto nível no mundo.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos na simulação. Uma análise deles mostra que a diferença de tempo de volta nessa simulação da prova de *Skid Pad* é de 0.57 s, um valor muito maior que as diferenças de tempo que foram atingidas entre as melhores pontuações de *Skid Pad* em edições anteriores de Fórmula SAE Brasil e Formula SAE International. Isto é, melhorar 0.57s significa subir muitas colocações nesse evento devido a um incremento significativo do desempenho do carro em condições de percursos com trajetória curvas. No entanto, apesar do *Skid Pad* ser é a prova dinâmica que fornece menor pontuação, é um parâmetro que mostra o comportamento e a estabilidade dinâmica do carro em um circuito com curvas acentuadas, ou seja, um veículo que está -em geral- bem preparado dinamicamente para a prova de *Skid Pad*, possivelmente também terá um desempenho destacado em *Autocross* e Enduro, que são as provas de maior pontuação na competição.

1.2 Estado do arte

Durante as últimas décadas a pesquisa em aerodinâmica de veículos de competição tem sido desenvolvida por diferentes autores. No inicio, o problema só era abordado através de testes em túneis de vento, no entanto, em anos recentes a dinâmica de fluidos computacional (CFD) tornou-se importante e seu uso acabou complementando os experimentos com modelos em escala em túneis de vento. Um dos primeiros trabalhos em estudar analiticamente os detalhes da aerodinâmica de alta sustentação e as caraterísticas dos aerofólios de múltiplos elementos foi realizado pelo Smith (1975). Mas o engenheiro da Lotus Peter Wright (1982) foi o primeiro em apresentar um trabalho destacando a grande influencia da aerodinâmica em carros de Fórmula 1. J. Katz (1995) escreve um dos primeiros e mais influentes livros focados em aerodinâmica de carros de corrida o qual é atual referência de muitos programas universitários nesse tema no mundo. Do mesmo modo, E. Benzing (1992) escreve um livro focado no desenho de perfis aerodinâmicos voltados para aerodinâmica de veículos de competição.

Jang et al. (1998) fizeram estudos numéricos que mostraram detalhes do comportamento do fluxo em aerofólios com Gurney Flap e Wang et al. (2008) apresentaram a otimização do tamanho e locação de um Gurney Flap. Nikolic (2006) apresenta um trabalho experimental com Gurney Flaps mostrando detalhes dos vórtices contrarotantes.

O professor X. Zhang da universidade de Southampton na Inglaterra tem feito diversos trabalhos considerando efeito solo. Entre eles, desenvolveu um estudo em aerodinâmica de um elemento único (Zerihan e Zhang, 2000) e elementos duplos (Zhang e Zerihan 2003) considerando efeito solo. Também têm sido estudados os efeitos físicos de um difusor em um *bluff body* (Senior e Zhang, 2001) e a influencia no ângulo do difusor em efeito solo (Ruhrmann e Zhang, 2003). Soso e Wilson (2006) forneceram uma pesquisa experimental do comportamento de um aerofólio com efeito solo posicionado na esteira de um objeto equipado com um difusor a fim de proporcionar detalhes dos fenômenos em situações de ultrapassagem em competição.

Na área da Fórmula SAE, têm sido desenvolvidos alguns poucos trabalhos. Jawad et al. (2001) fizeram uma otimização da carenagem de um veículo de Fórmula SAE sem aerofólios à partir do arrasto gerado e do consumo de combustível. McKay e Gopalaram (2002) foram uns dos primeiros em publicar trabalhos relacionados com os efeitos aerodinâmicos em veículos de Fórmula SAE. Wordley e Saunders (2006) escrevem vários artigos mostrando uma predição inicial e depois um estudo numérico e experimental da aerodinâmica em um veículo de FSAE. Após disso, eles realizam outro trabalho detalhando o procedimento para fazer a avaliação aerodinâmica do carro em pista (Wordley et al., 2007).

Neste trabalho, pretende-se mostrar um novo conceito de pacote aerodinâmico adaptado à nova regulamentação, cobrindo e detalhando áreas que não foram encontradas em trabalhos prévios relacionados com Fórmula SAE e que são de relevante importância como a geração de malha em CFD e a otimização de aerofólios multielementos, entre outros.

Parâmetros e critérios nas simulações CFD

A dinâmica de fluidos computacional (CFD) tem se estabelecido como um elemento chave no desenvolvimento da indústria automotiva e é usada como uma ferramenta complementar à teoria e à experimentação, e portanto não deveria substituir nenhuma destas práticas. Um típico projeto na atualidade deve ter um equilíbrio entre essas três aproximações. A introdução do CFD permite em alguns casos redução de custos financeiros, porém o fator mais importante é a rapidez e relativa precisão nos resultados, além de fornecer um aumento no entendimento dos fluidos ao redor dos corpos.

Inclusive, na área do automobilismo existem alguns cenários que só podem ser simulados em CFD devido às limitações experimentais nos testes. Alguns exemplos são simulações de gases quentes provenientes da exaustão, resfriamento de freios superaquecidos e o comportamento do combustível dentro do tanque em diferentes situações dinâmicas do veículo.

Para entender um pouco a função do CFD, deve-se entender que grande parte das equações da dinâmica dos fluidos estão baseadas nas equações de Navier-Stokes (Anderson, 1995). Esse sistema de equações estabelece a conservação da massa, a quantidade de movimento e a energia. Dada uma quantidade vetorial física $\vec{U}$, a forma geral dessas equações foi resumida por Blazek (2001) como,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \vec{U} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} [(\vec{F}_C - \vec{F}_D) \cdot \vec{n}] dS = \int_{\Omega} \vec{Q}_V d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\vec{Q}_S \cdot \vec{n}) dS, \quad (3)$$

onde Ω representa o volume de controle fixo e $\partial\Omega$ o contorno dele. Ali, a quantidade $\vec{U}$ corresponde a ρ para a equação da massa, $\rho\vec{v}$ para a equação de momento e ρE para a energia. Na sua forma completa, essas equações são respetivamente

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} \rho \vec{f}_e d\Omega - \oint_{\partial\Omega} p \vec{n} dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) dS, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \oint_{\partial\Omega} k (\nabla T \cdot \vec{n}) + \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h) d\Omega - \oint_{\partial\Omega} p (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} dS. \quad (6)$$

O principal objetivo do CFD é simplificar as anteriores equações diferenciais parciais altamente não lineares, de maneira que possam ser resolvidas numericamente, através de diferentes métodos como diferenças finitas, volumes finitos, elementos finitos ou métodos espectrais.

No processo de resolver o sistema de equações que descrevem a dinâmica de fluidos, podem ser usados diferentes modelos de turbulência como o *Direct Numerical Simulation* (DNS) e o *Large Eddy Simulation* (LES). No entanto, não é possível implementar nenhum desses anteriores modelos devido aos altos custos computacionais. Assim, será usado um método mais generalizado conhecido como o *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS). Uma descrição detalhada desse método é dada por Blazek (2001).

2.1 Configuração das simulações

As simulações foram realizadas usando um computador com um processador Intel Core i7, de 3.5 GHz e 16GB de memória RAM. O software usado nas simulações CFD é o StarCCM+ v8.04 da CD-adapco, amplamente conhecido e usado na indústria aeronáutica e automobilística pela maioria de equipes de Fórmula 1. Esse software tem a capacidade de fazer pre-processamento e pós-processamento além dos cálculos de CFD. Isso significa que só é necessário um software invés de três, (o qual acontece com outros softwares como OpenFoam ou CFD++) fazendo com que o processo total seja mais rápido.

A fim de obter resultados comparáveis, foram estabelecidas uma série de condições padrões. Uma delas é o tamanho do domínio total onde foram simuladas as diferentes peças aerodinâmicas do veículo e o carro total. A Figura 4 mostra as dimensões usadas no domínio computacional o qual simula uma geometria básica retangular similar a um túnel de vento.

Os limites desse domínio devem estar suficientemente afastados para eles não influenciarem no campo de fluxo em torno ao veículo. A extensão do domínio na parte traseira do veículo ou *downstream* deveria ter uma distância maior a fim de conter grande parte da esteira deixada pelo veículo. Se isto não for respeitado, podem ser capturados fluxos de recirculação que seriam inapropriados nos resultados.

Nos casos onde foi possível nesse projeto, considerou-se somente meio domínio devido à alta simetria do carro e dos dispositivos aerodinâmicos. Isto reduz consideravelmente o tempo computacional e o pós-processamento das simulações. A Figura 5 mostra uma imagem com essas características.

Figura 4 – Tamanho padrão do domínio usado em todas as simulações CFD.

Figura 5 – Malha estruturada usada em meio domínio do veículo.

2.2 Geração da malha e análise de independência

A geração da malha é um elemento chave na simulação CFD, pois tem influência direta com a precisão dos resultados. Nesse projeto foi usada uma malha estruturada, onde a disposição das células é feita em hexaedros (seis faces). Esse tipo de malha está geralmente bem alinhada com os tipos de fluxo encontrados em aerodinâmica externa e isso melhora a estabilidade numérica e a convergência. Embora uma malha estruturada não necessariamente é uniforme, as células têm certa regularidade. Segundo Blazek (2001), isto estabelece sua principal vantagem, pois as linhas da malha pertencem a valores constantes de coordenadas i , j e k no espaço computacional, o qual corresponde diretamente à forma como as variáveis de fluxo são armazenadas na memória do computador. Esta propriedade permite aceder aos pontos vizinhos mas rápida e facilmente. Segundo Anderson (1995), isto acontece porque as diferentes linhas de cada coordenada não se cruzam entre si devido a seu paralelismo. Como pode-se esperar, graças a essas características a avaliação dos gradientes, escoamentos e tratamento de camada limite é mais simplificada.

2.2.1 Volumes de controle

A malha estruturada tem algumas desvantagens como a dificuldade para ser gerada em uma geometria complexa. Uma opção a fim de resolver esse problema é dividir o espaço físico em várias partes que podem ser facilmente emalhadas. Nesse projeto, o espaço foi dividido em blocos —ou volumes de controle— situados em regiões críticas onde o fluxo possui comportamentos mais complexos. Isto faz com que a precisão dos resultados seja melhor, mantendo uma idéia conservadora sobre o consumo do tempo nas simulações. Por exemplo, em torno ao carro foram criados quatro blocos com malhas mais refinadas em regiões próximas a ele, estendendo-os na parte traseira a fim de capturar com maior precisão a física envolvida na esteira deixada pelo veículo. Também foram criados uma serie de blocos em volta as rodas, uma vez que ali o comportamento do fluxo é consideravelmente complexo. Outro volume de controle foi posicionado entre o solo e a parte mais baixa do carro, pois essa é uma região de altas vorticidades associadas ao assoalho difusor. A Figura 6 mostra a distribuição destes blocos ao redor do veículo.

2.2.2 Tratamento da camada limite

Prandtl (1905) foi o primeiro em definir a camada limite quando teorizou que um efeito da viscosidade era causar que o fluido imediatamente adjacente a uma superfície se aderisse a ela, e que os efeitos desse atrito seriam experimentados em uma fina camada próxima à superfície. Fora dessa camada o fluido seria essencialmente o fluido invíscido que havia sido estudado nos séculos anteriores.

Figura 6 – Malha do domínio computacional distribuída em volumes de controle. Note-se quatro destes volumes em torno ao carro além de um volume mais refinado embaixo do carro

Uma vez que a diferença das velocidades relativas dentro da camada limite pode ser muito alta em pequenos espaços, os gradientes de pressões ali também podem ter grandes valores. Em CFD, a física associada a esses fenômenos do fluido precisa de malhas muito refinadas para capturar adequadamente essas mudanças. Portanto, —sobre as superfícies aerodinâmicas mais relevantes— é altamente conveniente criar uma série de células bem alinhadas com a geometria da camada limite.

À partir disso, na geração da malha deste projeto foi considerada uma camada de células prismáticas adjacentes às superfícies aerodinâmicas mais importantes, conhecidas como *prism layer*, como é mostrado na Figura 7. A criação dessa camada tem três características: a espessura da camada limite (Tp); a quantidade de níveis da camada limite (Np) e o tamanho relativo de cada nível em relação ao nível imediatamente superior (Sp). É claro que uma maior quantidade de Np gera uma malha mais refinada, e que valores $Sp > 1$ geram células cada vez mais refinadas perto da superfície.

Figura 7 – Malha de células prismáticas em torno ao aerofólio. A sua implementação permite capturar de maneira adequada a física da camada limite formada na superfície.

2.2.3 Análise de independência

A independência da malha é um fator determinante nas simulações CFD, pois determina certo grau de precisão dos resultados à partir de uma boa qualidade da malha. O objetivo desse procedimento é achar a configuração de menor refinamento da malha na qual são encontrados os resultados confiáveis. Ou seja, pretende-se encontrar o ponto limite entre uma malha que consuma o menor tempo computacional possível, mesmo fornecendo os resultados mais próximos à realidade.

Algumas características fixas que foram usadas para criar a malha são descritas na Tabela 4. A fim de mostrar de maneira geral esse procedimento, o análise feito nessa seção foi realizado em uma versão inicial da asa traseira. No entanto, está claro que tal procedimento foi realizado no resto do carro.

Modelo	Caraterística
Tamanho Base =10 mm.	O refinamento das regiões será expressado como uma % deste valor.
Surface wrapper	Este emalhador otimiza e limpa a superfície de possíveis defeitos.
Trimmer	Preenche o volume com uma malha de células hexaedricas.
Prism Layer $Tp = 5$ mm	Cria uma camada de células prismáticas sobre as superfícies
Proximity Refinement	Refina a malha quando tem duas superfícies muito próximas.

Tabela 4 – Caraterísticas fixas da malha em todas as simulações CFD nesse projeto.

Inicialmente, se estabeleceram seis situações com diferente nível de refinamento da malha em cada região do domínio, como mostra a Tabela 5. Essas regiões são os três volumes de controle em torno da asa, sendo o menor o mais refinado. A Figura 8 mostra os três volumes de controle nos níveis de refinamento 3 e 6. Na Tabela 5, a coluna denominada “Asas” indica as superfícies do *mainplane* e os *flaps*; e a região “Endpl.” representa as superfícies dos *endplates*. Como foi mencionado anteriormente, Np é o número de camadas de células prismáticas dentro da camada limite e Sp indica a espessura de cada uma dessas camadas em relação à anterior. A Figura 9 mostra as células prismáticas e a malha perto das superfícies aerodinâmicas nos níveis 1, 3 e 6.

Nív.	Vl. 1	Vl. 2	Vl. 3	Asas	Endpl.	Np	Sp	Células	Tempo sim.	C_L	C_D	% Dif. C_L
1	700	1000	1500	20	40	2	1,2	697198	42 min	-4,662	2,249	15,9
2	500	900	1200	18	36	4	1,2	1190823	1h 11min	-4,243	1,849	5,52
3	300	600	900	15	30	8	1,5	3741066	2h 39min	-4,061	1,650	0,99
4	200	400	700	12	24	12	1,6	5776108	4h 49min	-4,029	1,609	0,21
5	100	200	400	10	20	16	2	8464553	7h 06 min	-4,024	1,591	0,07
6	50	100	200	8	16	20	2	12132601	11h 52min	-4,021	1,580	-

Tabela 5 – Seis diferentes níveis de refinamento da malha na simulação da asa traseira, sendo o nível 1 o menos refinado e o 6 o mais refinado. Os valores desde a 2ª até a 6ª coluna representam uma porcentagem do tamanho base indicado na Tabela 4. Ou seja, quanto maior é o número menos refinada é uma região. As colunas Vl. 1, Vl. 2 e Vl. 3 são os volumes de controle em torno da asa, sendo Vl. 1 o menor e o Vl. 3 o maior.

Figura 8 – Malha nos três volumes de controle em torno a asa traseira para os níveis 1, 3 e 6.

Na Tabela 5 podem ser observadas as diferentes quantidades de células geradas em cada malha e o tempo de simulação total. O nível 6 tomou-se como uma referência devido a que tem a malha mais refinada de todos e consequentemente apresenta os resultados mais confiáveis, apesar de ter um alto tempo para se rodar. Os níveis 1 e 2 têm uma quantidade relativamente baixa de células e tempo computacional, no entanto, os valores de C_L e C_D estão muito afastados do valor referência do nível 6. Por este motivo, as malhas desses níveis foram descartadas.

Em contrapartida, os níveis 4 e 5 têm valores de C_L e C_D muito próximos aos valores referências, e seriam excelentes opções. Porém, as simulações desses níveis de malha ainda consomem muito tempo para serem realizadas e a sua escolha não acaba sendo prática. Finalmente, o nível 3 tem um tempo de simulação muito menor ao nível 4 e os resultados estão dentro do 1%, o que considera-se aceitável dentro das metas desse trabalho, pois nosso objetivo não necessita altos níveis de precisão nesses valores. As Figuras 10 e 11 mostram o comportamento do C_L e o C_D em função dos diferentes nível de refinamento. Pode-se notar que à partir do nível 3 os resultados têm uma variação menos significativa. Por este motivo o nível 3 foi escolhido para fazer todas as simulações e análise do aerofólio traseiro. Um procedimento similar ao anterior foi também realizado para o aerofólio dianteiro, o assoalho difusor e finalmente para o carro inteiro.

Figura 9 – Detalhe do emalhado entre o *mainplane* e o *flap* inferior na asa traseira nos níveis de refinamento 1, 3 e 6. Note-se as camadas de células prismáticas na região da camada limite.

Figura 10 – Comportamento de C_L em função do nível de refinamento da malha.

Figura 11 – Comportamento de C_D em função do nível de refinamento da malha.

2.3 Condições físicas e modelos de turbulência

Levando em consideração as condições de competição em Fórmula SAE, é conveniente fazer o análise físico em CFD simulando baixas velocidades. Por isso, todas as simulações nesse projeto foram realizadas a 13.9 m/s ou 50 km/h, e só foi considerado regime permanente. Devido a estas baixas velocidades também foi usado um modelo de densidade constante. Com isso, as equações de Navier-Stokes eliminam uma variável e a simulação em geral pode se rodar mais rapidamente.

O *solver* escolhido foi a *Segregated Flow*, o qual pode rodar de maneira mais rápida neste tipo de simulações com baixas velocidades, mas pode ter alguns problemas com escoamentos supersônicos (o qual não é nosso caso). Outra opção é o *Coupled Flow*, o qual resolve equações acopladas para pressão e velocidade e portanto consome muita mais memória e tempo computacional. Este *solver* é mais robusto, estável e tem uma serie de melhoras, em relação ao *Segregated Flow*, porém só são significativas em casos de altas

flutuações de densidade como em escoamentos supersônicos com ondas de choque.

2.3.1 Modelos de turbulência

Uma das mais significativas contribuições à modelagem da turbulência foi realizada por Boussinesq (1877). A hipótese de Boussinesq supõe que o tensor de esforços de turbulência está relacionado linearmente a uma taxa média de tensão, onde o fator de proporcionalidade é a viscosidade turbulenta. A hipótese de Boussinesq para escoamento incompressível pode ser escrita como

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{v_i v_j} = 2\mu_T \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3}\rho K \delta_{ij}, \quad (7)$$

onde $\overline{S_{ij}}$ é o tensor de taxa média de tensão de Reynolds, K é a energia cinética turbulenta definida como $K = (1/2)\overline{v_i v_i}$ e μ_T representa a viscosidade turbulenta. A função de um modelo de turbulência é calcular esta viscosidade turbulenta μ_T .

Existem três modelos amplamente usados que podem ser implementados em malhas estruturadas ou não estruturadas. Entre eles está o modelo de uma equação Spalart-Allmaras (SA), e os modelos de duas equações $K-\varepsilon$ e o $K-\omega$ SST (Shear-Stress Transport).

O modelo Spalart-Allmaras é a aproximação de uma equação mais usada. Este modelo usa uma simples equação de transporte para viscosidade turbulenta cinemática a qual é relacionada a μ_T . O modelo SA tem sido otimizado para aplicações aerodinâmicas e especialmente para fluxos externos. Este modelo permite obter predições precisas de escoamentos turbulentos com gradientes adversos de pressões. Em alguns casos, o SA parece limitado em predições de separação de camada limite. No entanto, apesar disso, é considerado uma satisfatória ferramenta em CFD.

O modelo $K-\varepsilon$ é o modelo de duas equações mais usado. Esta baseado na solução de equações da energia cinética turbulenta K e da taxa de dissipação turbulenta ε . Este modelo é mais difícil de resolver numericamente do que o modelo SA, mas continua sendo robusto e económico. O modelo $K-\varepsilon$ é quase insensível aos valores de ε no escoamento livre, o qual é uma grande vantagem em relação ao modelo $K-\omega$. Além disso, tem sido encontradas algumas diferenças significativas com dados experimentais em casos com altos gradientes adversos de pressões. Essas dificuldades têm conduzido a versões melhoradas como o modelo **Realisable $K-\varepsilon$** .

Finalmente, **o modelo $K-\omega$ SST** é uma versão melhorada do modelo básico $K-\omega$ desenvolvida por Menter. Esse modelo pode ser visto como uma combinação do $K-\omega$ e o $K-\varepsilon$ e tem mostrado importantes resultados na predição de eventos de separação de camada limite sob fortes gradientes de pressão. É um modelo que fornece bom balanço entre precisão e tempo computacional e é o modelo recomendado para este tipo de simu-

lações pelo fabricante do StarCCM+. Por essas razões, o modelo escolhido para todas as simulações foi o $K-\omega$ SST.

Ao ser escolhido esse modelo de turbulência, deve-se selecionar uma adequada função de parede y^+ , a qual descreve a velocidade média de um fluxo turbulento em cada ponto ao longo da parede. Segundo Blazek (2001), para baixos números de Reynolds a melhor função é All- y^+ .

2.3.2 Outras condições físicas

Fazer a escolha de um bom pacote de condições iniciais adequadas pode fornecer benefícios como a redução de tempo para atingir a solução em regime permanente ou simplesmente pode requerer um menor número de iterações e maior estabilidade.

Condição Física	Caraterística
Velocidade relativa do carro	$v = 50 \text{ km/h} = 13.9 \text{ m/s}$.
Densidade constante do ar	$\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$.
Pressão ambiente	P = 1 atm.
Solver	Segregated Flow
Condição temporal	Regime permanente..
Modelo de turbulência	$K-\omega$ SST
Função de parede	All- y^+
Velocidade relativa do solo	$v_s = 50 \text{ km/h} = 13.9 \text{ m/s}$
Velocidade angular das rodas	612 rpm.

Tabela 6 – Caraterísticas fixas da malha em todas as simulações CFD nesse projeto.

Outra condição a ser levada em consideração é o movimento do solo. Se essa condição não for imposta, a velocidade relativa do ar em relação ao solo criaria uma camada limite nele, o qual pode interagir com a asa dianteira, as rodas e o assoalho difusor, conduzindo a condições físicas incorretas.

Outra condição física considerada foi a rotação das rodas nas simulações do carro inteiro, já que o arrasto e a sustentação gerada por elas difere significativamente quando é implementada uma situação dinâmica.

A Tabela 6 mostra um resume das condições físicas usadas em todas as simulações CFD nesse projeto.

Análise dos perfis aerodinâmicos

3.1 Preliminares

O conceito que será usado ao longo do desenvolvimento do projeto do pacote aerodinâmico é o de *alto downforce*. Esse conceito dá uma prioridade muito superior ao incremento da força de sustentação negativa do que à diminuição do arrasto. Essa escolha é feita com base na equação (1); uma vez que o veículo precisa de alto *downforce* para ganhar aderência nas curvas e levando em conta que as velocidades médias atingidas são baixas e as dimensões são limitadas, então é necessário otimizar o coeficiente de sustentação C_L . Uma das maneiras de conseguir isto é através de perfis aerodinâmicos com propriedades especiais ou de alta sustentação, comumente usados no automobilismo.

3.2 Seleção dos perfis aerodinâmicos

Um perfil aerodinâmico é a seção cruzada bidimensional de um aerofólio tridimensional. A terminologia básica é mostrada na Figura 12, onde a linha azul mostra a corda c que descreve a distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga. A linha vermelha é conhecida como a linha média ou linha do camber e é definida como a linha que conecta os centros dos círculos inscritos no perfil. A interseção entre a linha de camber e o limite frontal do perfil definem o bordo de ataque; a interseção da linha de camber e o limite traseiro definem o bordo de fuga (Benzing, 1992). Existem vários parâmetros que determinam se a geometria do perfil é apropriada para se usar em uma configuração de alto *downforce*. Um deles é o *camber* do perfil, definido como a distância entre a corda e a linha de camber. Em um perfil simétrico como o mostrado na Figura 13, a curvatura é zero, pois a distância relativa entre a linha do camber e a corda é nula.

Um perfil aerodinâmico assimétrico, ou seja, com curvatura diferente de zero, descreve um aerofólio com superfícies de diferentes geometrias. Esses tipos de perfis são mais apropriados para gerar maior sustentação (neste caso o *downforce*), pelo fato do formato das superfícies -principalmente a superfície inferior ou extradorso- movimentar maior quan-

Figura 12 – Forma de um perfil aerodinâmico genérico que mostra a terminologia básica dele.

Figura 13 – A linha vermelha mostra que em um perfil simétrico a corda e a linha de camber são descritas pela mesma reta.

tidade de ar para cima. Em palavras da segunda lei de Newton, o momento linear que o aerofólio transfere à massa de ar quando muda a direção de movimento dela, faz com que a massa de ar também transfira a mesma quantidade de momento linear para a asa (Anderson e Eberhardt, 2009), só que em sentido contrário, ou seja, para baixo, criando *downforce*.

No entanto, também existe uma explicação sobre o origem da sustentação do ponto de vista do Princípio de Bernoulli, embora a maioria das vezes é dada de maneira errada (Babinsky, 2003). Um dos conceitos errados é pensar que as partículas de ar que se separam no bordo de ataque e viajam tanto pelo intradorso quanto pelo extradorso devem se encontrar no bordo de fuga ao mesmo tempo, obedecendo ao "princípio de trânsito de tempo equivalente", que foi demonstrado que está errado (Smith, 1972). Outro equívoco é pensar que a velocidade de maior magnitude no extradorso produz uma redução na pressão estática nessa zona (Weltner, 1987). O Princípio de Bernoulli estabelece que um aumento na velocidade está associado com uma diminuição na pressão, e vice-versa. Isso não implica que o incremento da velocidade seja a causa da redução na pressão. Por outro lado, o fato de que os gases fluem de zonas com maior pressão para zonas com menor pressão, indica que a maior velocidade sobre o extradorso é uma consequência da diminuição da pressão. Weltner (1987) e Babinsky (2003) explicam que a causa da diminuição da pressão no extradorso é atribuída à trajetória curva das linhas de corrente associadas a um gradiente de pressão. Isto é, quando as partículas de ar mudam de direção, então deve existir uma força centrípeta perpendicular à direção de movimento das partículas. Essa força só pode ser gerada por diferenças de pressões, o que implica que a pressão em uma face da partícula é maior do que na outra. Em outras palavras, se uma linha de corrente é curva, deve existir um gradiente de pressão cruzando essa linha de corrente, com a pressão incrementando desde o centro da curvatura.

Além da curvatura do perfil, existem outros parâmetros que caracterizam um perfil apropriado para atingir alto *downforce*. Um deles é a forma das linhas de corrente no ponto de estagnação, perto do bordo de ataque (Katz, 2006).

Figura 14 – Diferença de fluxo e formação da camada limite em perfis com ponto de estagnação longe (A) e perto (B) do bordo de ataque. Foto extraída de Katz (2006).

Figura 15 – Típico perfil aerodinâmico com o bordo de ataque refinado usado no *mainplane* de várias equipes de Fórmula 1. Fotos tomadas de www.sutton-images.com

A imagem esquerda da Figura 62 mostra o bordo de ataque tradicional onde o fluido é acelerado rapidamente em torno a ele. Isso pode criar uma camada limite grossa e uma transição precoce. Isto pode ser evitado diminuindo o raio de curvatura no bordo de ataque como mostra a imagem da direita da Figura 62. A Figura 15 mostra alguns *mainplanes* de asas traseiras em veículos da Fórmula 1 que frequentemente implementam perfis com essa característica.

3.2.1 Perfil DBHL

A fim de obter as propriedades citadas anteriormente, neste trabalho foi desenvolvido um perfil aerodinâmico no software *XFLR5*¹ usando o método inverso. Essa ferramenta permite criar um perfil à partir de parâmetros desejados. As principais características desse perfil, visto na Figura 16 e denominado DBHL (Diego Ballén High Lift) são mostrados na Tabela 7.

Figura 16 – Perfil aerodinâmico DBHL usado em algumas asas da aerodinâmica do veículo E13.

Perfil DBHL	Magnitude %	Posição %
Espessura	12.13	20.20
Curvatura	14.52	48
Flap	11° da linha de camber	97

Tabela 7 – Principais características geométricas do Perfil DBHL

Na literatura existem outros perfis de alta sustentação usados com baixos Re em pequenas aeronaves ou UAV's. No entanto, o perfil *DBHL* mostra maiores valores de C_L em relação a estes outros perfis. A Figura 17 mostra o comportamento do C_L contra o ângulo de ataque do perfil DBHL em comparação com outros perfis aerodinâmicos de alta sustentação para $Re = 500000$. O comportamento do C_L em função do ângulo de ataque do perfil *DBHL* pode-se ver na Figura 18 para diferentes valores de Re . Pode-se observar o alto coeficiente de sustentação atingido pelo perfil DBHL, que consegue chegar até $C_L = 2.78$ a um ângulo de $\alpha = 13^\circ$ e para um $Re = 300000$. Essa análise foi feita considerando aerofólios infinitos.

¹O *XFLR5* é um software livre que permite fazer análise e desenho de perfis aerodinâmicos com baixo número de Reynolds.

Figura 17 – Análise 2D do coeficiente de sustentação C_L contra ângulo de ataque α para quatro diferentes perfis aerodinâmicos de alta sustentação.

Figura 18 – Análise 2D do coeficiente de sustentação C_L contra ângulo de ataque α do perfil *DBHL* para diferentes valores de Re .

A geometria do perfil *DBHL* tem propriedades para receber fluxo livre, criar uma camada limite fina e gerar grandes diferenças de pressões. Por esse motivo esse perfil será usado no *mainplane* tanto da asa traseira quanto da configuração em cascata da asa dianteira, as quais serão especificadas no capítulo seguinte. No entanto, devido a sua alta curvatura, esse perfil não apresenta características adequadas para ser usado nos *flaps*, já que nas regiões próximas aos *slots* que existem entre diferentes elementos podem ocorrer eventos de transição com maior probabilidade. Por essa razão, os perfis aerodinâmicos usados nos *flaps* devem possuir outras propriedades.

3.2.2 Perfil Be 122-155

Os altos valores de curvatura em um perfil (como o *DBHL*) não são recomendáveis para serem usados em *flaps*, uma vez que na superfície de sucção deles o fluido perde grande parte da energia cinética, e uma alta curvatura poderia ocasionar eventos de separação de

camada limite. Assim, a superfície de sucção do *flap* deve trabalhar de maneira adequada com o bordo de fuga do *mainplane*, a fim de criar uma curvatura suave na asa inteira. Em outras palavras, um aerofólio multi-elementos deve se considerar como uma única asa, e portanto a curvatura geral deve ser suave.

Figura 19 – Perfil Benzina Be 122-155 usado em todos os *flaps* da aerodinâmica do E13.

Após análise de diferentes perfis aerodinâmicos, foi encontrado que o perfil Be 122-155 mostrado na Figura 19. Os perfis *Benzina*, são denominados dessa maneira devido ao engenheiro italiano Enrico Benzina (1992), quem calculou e projetou seções de aerofólios para automobilismo desde a década de 70 e que podem ser uma base para o desenvolvimento de novos perfis. Uma das características de algumas dessas seções de aerofólios é a localização da máxima espessura do perfil diante do tradicional 30%*c*, trazendo importantes vantagens em aplicações com baixas velocidades, como uma forte aceleração inicial do fluxo. Esse perfil foi usado em todos os *flaps* tanto da asa traseira quanto da asa dianteira.

3.2.3 Perfil Be 153-125

No caso do *mainplane* da asa dianteira também foi escolhido um perfil diferente devido à interação desse aerofólio com o solo. Um perfil com uma curvatura muito alta provocaria uma transição na camada limite da mesma maneira que se dá em um difusor quando a saída é muito acentuada. Isto acontece porque a proximidade com o solo cria uma seção transversal menor que acelera o ar e incrementa o gradiente adverso de pressões. Por outro lado, um perfil com pouca curvatura não geraria o *downforce* suficiente na suspensão dianteira e o carro teria problemas de balanceamento, além de não atingir os objetivos de aderência e performance necessários.

Considerando o anterior, foram feitos testes em diferentes perfis aerodinâmicos para finalmente escolher o perfil Benzina Be 153-125, mostrado na Figura 20. Este perfil possui uma distribuição de espessura maior que os anteriores perfis o qual incrementa seu

Figura 20 – Perfil Benzling Be 153-125 usado no *mainplane* da asa dianteira do E13.

desempenho, mantendo a curvatura em um nível intermediário. Isto permite manter uma diferença de pressões mais constante que outros perfis.

Os três perfis aerodinâmicos apresentados anteriormente serão suficientes para desenvolver as asas traseira e dianteira do E13, que serão especificadas no capítulo seguinte.

Elementos aerodinâmicos

4.1 Preliminares

A aerodinâmica do veículo de Fórmula SAE da EESC-USP de 2015, o E13, está composta por três principais elementos: asa dianteira, asa traseira e assoalho difusor. Esses três elementos não trabalham de maneira isolada, mas trabalham considerando a influência entre eles e outros elementos do veículo. A asa traseira busca criar carga aerodinâmica na suspensão traseira, pois é nesse local onde é transmitida a potência e o torque do motor para as rodas e podem ocorrer grandes perdas. A asa dianteira adiciona carga principalmente na suspensão dianteira a fim de balancear a força gerada pela asa traseira e conseguir maior estabilidade e equilíbrio do veículo. Finalmente, o assoalho difusor aproveita o fundo do carro para gerar carga aerodinâmica sem criar grandes quantidades de arrasto.

Nesse capítulo será mostrado desde o conceito inicial de cada um dos elementos, detalhando partes da otimização deles e alguns resultados computacionais das simulações em CFD. Vale a pena lembrar que os parâmetros usados nessas simulações foram detalhados no capítulo 2.

4.2 Asa traseira: configuração e estratégias de otimização

Antes de 2014 as dimensões da asa traseira não eram fortemente reguladas nos veículos de Fórmula SAE, permitindo criar dispositivos com grandes áreas frontais a fim de obter grandes quantidades de *downforce*. Á partir de 2015 o novo regulamento restringe o tamanho das asas. Essa nova normativa estabelece que os limites da asa traseira são:

1. 250 mm para trás da parte traseira dos pneus traseiros.
2. A face interna dos pneus traseiros, medidos à altura da linha central do cubo.

3. 1200 mm acima do solo, considerando o piloto no carro.

Devido às baixas velocidades e aos limites impostos por regra, a otimização da asa traseira deve ser focada no coeficiente de sustentação C_L .

Inicialmente foi considerado o tamanho dos *endplates*. Quanto maiores são as dimensões deles, maior é a diferença de pressão entre as superfícies de sucção e pressão do aerofólio. Por isso, nas simulações iniciais o tamanho dos *endplates* foi estabelecido o maior possível, levando em conta as restrições do regulamento citadas anteriormente na regra 1 e 3, como mostra a Figura 21.

A altura do *mainplane* relativa ao *endplate* é fixada com o objetivo de obter o maior contato possível com o ar. Isto significa que a asa inteira deve estar na posição mais alta possível. A espessura de cada *endplate* é fixada em 5 mm e a envergadura em $b = 960\text{ mm}$, de acordo com a regra 2 estabelecidas na seção anterior. A corda do *mainplane* é fixada em $c = 540\text{ mm}$ e será deixado um maior espaçamento de *endplate* por trás e por baixo da asa a fim de diminuir a influencia do fluxo de ar do ambiente que tende a entrar na região de sucção.

Figura 21 – Dimensões iniciais do *endplate* de acordo com as regulamentações. Também se mostra a corda c do *mainplane* que será usada ao longo do projeto.

4.2.1 Aerofólio de um elemento

Como foi citado no capítulo 3, o perfil *DBHL* foi escolhido para ser usado no *mainplane* da asa traseira. Naquela seção foi feita uma análise 2D desse perfil para obter parâmetros gerais dele e poder comparar com outros perfis. No entanto, é necessário desenvolver uma análise 3D dele para conhecer os efeitos dos vórtices de ponta de asa e obter resultados mais reais. Assim, inicialmente foi simulado em 3D o comportamento do perfil *DBHL* com as dimensões de corda e *endplates* citadas anteriormente para diferentes ângulos de ataque. A Figura 22 mostra que o máximo C_L na simulação 2D acontece entre 13° e 14° , enquanto que na simulação 3D ocorre entre 21° e 23° . Pode-se observar que o pico de desempenho do C_L é menor na simulação 3D.

Figura 22 – Comportamento do coeficiente de sustentação C_L em função do ângulo de ataque do perfil *DBHL* em simulações 2D e 3D.

Esse fenômeno acontece porque a diferença de pressões sobre as partículas nos extremos da envergadura de uma asa geram uma força que faz com que as partículas se movimentem. No caso de um carro de corridas, no intradorso a pressão é maior que no extradorso, portanto, o ar flui em volta da ponta da asa -de cima para abaixo-. Esse efeito cria dois fortes vórtices nas pontas da asa que induzem um fluxo ascendente conhecido como *upwash* w na parte traseira da asa, entre os dois vórtices (Katz e Plotkin, 1991). Esse *upwash* combinado com a velocidade V_∞ ou *freestream* produzem uma velocidade de vento local. Isto é, nas proximidades da asa o vento tem uma direção diferente que no *freestream*, e portanto, a inclinação local relativa da asa muda. Na Figura 23, α é o ângulo de ataque geométrico, mas o ângulo realmente visto pela asa é α_{eff} definido como o ângulo de ataque efetivo. Portanto, embora a asa tenha um ângulo de ataque α , o efeito do w faz com que a asa esteja em um ângulo relativo menor α_{eff} . Por esta razão, existe uma defasagem entre o ângulo de ataque onde os perfis analisados em 2D e em 3D atingem seu pico de máximo C_L .

Figura 23 – Origem do arrasto induzido a partir dos vórtices de ponta de asa. Foto extraída de Anderson JR, J.D.,(2001).

A saída de ar de alta pressão da região superior da asa e a entrada de ar desde o ambiente ou da região de alta pressão na zona de sucção da asa, provoca uma diminuição no *downforce* e no desempenho da asa. Outra consequência do anterior é que o vetor de sustentação, perpendicular ao fluxo relativo de ar, também se incrementa um ângulo α_i , como se mostra na Figura 23. Isso cria uma componente na direção V_{∞} , ou seja, um arrasto. Esse arrasto é definido como o arrasto induzido D_i (Anderson, J. D., 2001). Esses fenômenos são bem acentuados em asas com baixa relação de aspecto $\mathcal{R}$, (como é o caso da asa que é analisada nesse trabalho) onde a distância entre os vórtices é relativamente pequena.

Figura 24 – Contorno de pressões na simulação 3D do perfil DBHL no meio da envergadura.

A Figura 24 mostra o contorno de pressões em torno ao perfil 3D no ângulo de ataque onde o C_L apresenta maior desempenho, e a Figura 25 mostra o perfil de velocidades na mesma posição. Pode-se notar que existe um evento de separação da camada limite, e que ainda o tamanho do *endplate* permite colocar mais elementos. Por isso, vale a pena testar configurações de aerofólios multi-elementos.

Figura 25 – Perfil de velocidades na simulação 3D do perfil *DBHL* no meio da envergadura.

4.2.2 Aerofólio multi-elementos

Em aplicações de alta sustentação é usual colocar outros elementos adicionais ao *mainplane*, a fim de incrementar a circulação na asa inteira. O aumento da curvatura gera *downforce* adicional, mas o incremento excessivo dela pode produzir separação da camada limite e a asa entra em situação de *stall* ou perda de sustentação. Uma forma de evitar essa separação da camada limite é mediante o uso de asas de vários elementos. O princípio básico por trás desse método é que a curvatura da asa inteira pode ser incrementada mais que com um único elemento. Isso é atingido com a energização da camada limite através da redução de pressões negativas nos espaços que existem entre o elemento principal e o *flap* ou entre dois *flaps* (Smith, 1975). A quantidade de elementos depende de quanto *downforce* é necessário e do lugar onde a camada limite tende a se separar. Segundo Benzing (1992) e McBeath (2011), para uma aerofólio de dois elementos o tamanho do *flap* deve estar entre 25 – 35 % da corda total e para um aerofólio com 3 elementos entre 30 – 40 %. O espaçamento (*gap*) entre as componentes da asa deve estar entre 1 – 2 % C e a sobreposição (*overlap*) do elemento superior entre 3 – 5 % C .

Considerando o anterior, inicialmente foi analisada uma configuração de dois elementos, onde um *flap* com 30% C e com ângulo de 75° relativo à velocidade do ar será colocado na parte posterior do *mainplane*. O *gap* entre os dois elementos é ajustado em 1.5% C e o

overlap em $3.5\%C$. Essa configuração pode ser vista na Figura 26 que mostra o contorno de pressões deste aerofólio na metade da envergadura. Comparando com a Figura 24, pode-se observar que o aerofólio com dois elementos possui uma região de baixa pressão maior em tamanho e magnitude que o aerofólio com um só elemento.

Figura 26 – Contorno de pressões do aerofólio com dois elementos e ângulo de ataque de $\alpha = 30^\circ$. O *flap* tem corda de $c = 30\%C$ a 75° relativo à velocidade do ar. Imagem tomada no meio da envergadura do aerofólio.

Figura 27 – Perfil de velocidades do aerofólio com dois elementos e ângulo de ataque de $\alpha = 30^\circ$. O *flap* tem corda de $c = 30\%C$ a 75° relativo à velocidade do ar. Imagem tomada no meio da envergadura do aerofólio.

Um perfil de velocidades dessa configuração pode ser visto na Figura 27, onde se observa que a separação da camada limite na curvatura total da asa é atrasada e a asa é capaz de enviar mais ar na direção vertical do que na configuração de um só elemento, permitindo que a asa total atinja seu máximo C_L a um ângulo de ataque maior, perto a 30° , antes de entrar em perda, como mostra a linha vermelha do gráfico da Figura 28.

Figura 28 – Gráfico do comportamento do coeficiente de sustentação C_L em função do ângulo de ataque α do aerofólio para diferentes configurações.

Apesar disso, pode-se notar que existe um evento de separação de camada limite na região de sucção do *flap* e as dimensões dos *endplates* ainda permitem um aerofólio maior. Por essa razão foi analisado o comportamento da asa com um terceiro elemento. A Figura 29 mostra o contorno de pressões de uma configuração que tem dois *flaps*, cuja dimensão combinada é $c = 40\%C$ a 80° em relação à velocidade inicial do ar, e o ângulo de ataque do aerofólio total é de $\alpha = 35^\circ$. Comparando de novo com as Figuras 24 e 26, pode-se notar que a região de baixa pressão incrementou-se, uma vez que a velocidade do ar também tem atingido valores maiores devido ao aumento da curvatura da asa.

Conferindo de novo a Figura 28 que mostra o C_L contra o ângulo de ataque α das três configurações, pode-se ver que o C_L da asa com três elementos atinge maiores valores com um $\alpha = 35^\circ$. É importante dizer que este aerofólio pode ter maiores valores de C_L se α aumentasse. No entanto, nessa configuração, o aerofólio está no limite superior imposto pela regra (item 3) e portanto, não é possível aumentar o ângulo de ataque mais do que 35° .

4.2.3 Posicionamento dos flaps

A Figura 30(a) mostra que a configuração com três elementos possui uma forte separação da camada limite. Esse fenômeno diminui significativamente o desempenho do C_L e incrementa o arrasto de forma. A fim de reduzir esse fenômeno, será feito uma análise do ângulo δ_f que determina o posicionamento dos *flaps* em relação ao *mainplane*. Deve-se

notar que nesse caso a separação da camada limite ocorre devido a um alto gradiente adverso de pressões gerado pela curvatura da asa. Isso significa que diminuindo sensivelmente o ângulo δ_f , mostrado na Figura 31, pode-se reduzir a curvatura, permitindo a aderência da camada limite à superfície do *flap*.

Figura 29 – Contorno de pressões do aerofólio com três elementos e $\alpha = 35^\circ$. Os *flaps* tem corda de $c = 40\%C$ a 80° relativo à velocidade do ar. Imagem tomada no meio da envergadura do aerofólio.

Figura 30 – Perfil de velocidades para a configuração com três elementos. A imagem (a) mostra o posicionamento inicial dos *flaps*, e a imagem (b) mostra o posicionamento após mudança do ângulo δ_f .

Figura 31 – Ângulo δ_f que determina a posição conjunta dos *flaps* em relação ao *mainplane*.

A Figura 32 mostra o comportamento do C_{Lmax} para diferentes ângulos δ_f . Deve-se lembrar que a posição inicial dos *flaps* está em 80° . O gráfico dessa figura mostra que existe uma região em 77° onde o desempenho é máximo. Pode-se notar que essa região é muito sensível, pois pequenas variações podem reduzir a performance notoriamente. O perfil de velocidades da Figura 30(b), mostra que a camada limite na parte traseira dos *flaps* reduziu consideravelmente quando o ângulo correto de $\delta_f = 77^\circ$ foi colocado. Essa correção melhora o desempenho do C_L em perto de 11%.

Figura 32 – Comportamento do C_{Lmax} em função do ângulo δ_f . Na configuração inicial, $\delta_f = 80^\circ$.

4.2.4 Otimização do gap-overlap

Outra importante consideração é o posicionamento relativo entre dois elementos. Esse espaçamento está definido pelo *gap* e pelo *overlap*. O *gap* é a mínima distância entre dois elementos, perpendicular à corda do elemento inferior. Por outra lado, o *overlap* é a projeção paralela à linha da corda do elemento inferior, da distância desde o bordo de

fuga do elemento inferior até o bordo de ataque do elemento superior. A Figura 33 mostra o *gap-overlap* no *slot* inferior.

Figura 33 – *Gap-overlap* do *slot* inferior do aerofólio traseiro.

Inicialmente, no primeiro *slot* foi colocado um *gap* de $1.2\%C_{r1}$, onde C_{r1} é a corda dos dois elementos inferiores, ou seja o *mainplane* e o primeiro *flap*; e o *overlap* foi fixado em $2.4\%C_{r1}$. Logo depois, várias posições foram testadas a fim de achar a melhor geometria para acelerar o fluxo, mantendo a camada limite colada na asa. É muito importante destacar que no processo da otimização do *gap-overlap*, a posição onde se encontra o máximo valor de C_L não necessariamente é a mesma posição onde a asa gera maior *downforce* devido à existência de variações na área de referência A . Em outras palavras, o máximo valor de *downforce* é dado pelo máximo valor do produto $C_L \cdot A$. Por essa razão a Figura 34 mostra o máximo *downforce* em função de diferentes dimensões do *gap*. Pode-se ver que esse máximo valor de *downforce* é atingido quando o *gap* é colocado em $2.2\%C_{r1}$ e o *overlap* em $4.5\%C_{r1}$.

Figura 34 – Comportamento do *downforce* máximo em função de diferentes tamanhos do *gap* para diferentes tamanhos de *overlap*.

O mesmo processo foi desenvolvido para o segundo *slot*, ou seja, o espaçamento entre os dois *flaps*. Foi encontrado que o melhor desempenho do *downforce* é conseguido fixando o *gap* em $2.2\%C_r$ e o *overlap* em $2.9\%C_r$. A corda combinada dos dois *flaps* é $C_r = 272,6 \text{ mm}$. Na Figura 35 pode ser observada a quantidade de *downforce* em função da dimensão do *gap* no *slot* superior, para vários tamanhos de *overlap*.

Figura 35 – Comportamento do *downforce* máximo em função de diferentes tamanhos do *gap* para diferentes tamanhos de *overlap* do *slot* superior.

4.2.5 Gurney Flap

O *Gurney flap* deve seu nome ao piloto de corridas *Dan Gurney*. Esse dispositivo aerodinâmico é uma placa plana colocada no bordo de fuga, perpendicular à linha da corda do último elemento do aerofólio. Segundo Wang (2008), a altura do *Gurney flap* deve ser da ordem da espessura da camada limite local. Em um estudo experimental feito por Liebeck (1978), foi encontrado que o *Gurney flap* com uma altura de $1.25\% C$ pode fornecer um incremento no C_L e reduzir o arrasto ao mesmo tempo. No entanto, pode-se melhorar o *downforce* em até 12% com alturas próximas ao $3\% c$ com pequenos incrementos no arrasto. No estudo de Liebeck, é estabelecido que o *Gurney Flap* pode mudar o campo de fluxo na região do bordo de fuga mediante a criação de dois vórtices contrarrotantes, o qual altera a condição de Kutta e a circulação. Esses vórtices descrevem uma região de baixa pressão que acelera o fluido atrás do último *flap*, atrasando a separação da camada limite.

Na asa traseira foram testados vários comprimentos do *Gurney flap* a fim de encontrar o desempenho ótimo. A Figura 36 mostra o comportamento do C_L contra diferentes comprimentos do *Gurney flap* a 90° , expressados em termos da corda total da asa C . Nesse gráfico pode-se observar que a partir de $7\%C$ o valor do C_L tende a estabilizar. Por outro lado, a Figura 37 mostra o comportamento do C_D contra o comprimento do *Gurney flap*. Comparando esses dois últimos gráficos, pode-se ver que apesar de que o C_L pode

crescer um pouco a mais depois do $7\%C$, o C_D continua aumentando significativamente. Por essa razão, o comprimento de $7\%C$ foi escolhido para esse modelo.

Figura 36 – Comportamento do C_L em função do comprimento do *gurney flap*, dado em termos da corda total C da asa traseira.

Figura 37 – Comportamento do C_D em função do comprimento do *gurney flap*, dado em termos da corda total C da asa traseira.

Em Jang, et. al. (1998), Wang, et. al. (2008) e Nikolic (2006) é sugerido que o *Gurney flap* deve estar localizado a 90° da corda do elemento em que está posicionado. No entanto, nesse modelo foram testados diferentes ângulos em torno a 90° , levando em conta que o campo de fluxo nesta asa pode ter comportamentos diferentes devido ao baixo valor de $\mathcal{R}$.

A Figura 38 mostra o comportamento do C_L em função do ângulo γ do *gurney flap*. Pode ser visto que para 93° o C_L atinge seu máximo desempenho. A imagem da Figura 39 mostra o campo de velocidades perto do *gurney flap*, na qual podem ser observados os dois vórtices contrarrotantes na parte superior deste dispositivo. O *gurney flap* fornece uma melhoria no aerofólio próxima a 4% no C_L .

Figura 38 – Comportamento do C_L em função do ângulo γ do *gurney flap* na asa traseira.

Figura 39 – Perfil de velocidades perto do *flap* superior que mostra os dois vórtices contrarrotantes criados pela ação do *gurney flap* na asa traseira.

4.2.6 Beamwing

A estratégia de usar asas bi-plano foi amplamente usada em Fórmula 1 alguns anos atrás, antes de ser banida pelas autoridades da FIA¹. Esse método de acrescentar carga aerodinâmica pode ter muitas variações e formas de otimização. No caso da asa traseira do E13, foi decidido aproveitar a parte inferior da asa principal para colocar um *beamwing*.

O perfil usado foi o *DBHL* com a metade da corda do *mainplane*. No seu posicionamento foram considerados diferentes parâmetros. O *beamwing* gera uma região de alta pressão dentro da região de baixa pressão da asa principal. Isso pode prejudicar o desempenho do *mainplane* e fazer com que a asa seja menos eficiente. Por esse motivo foram testados diferentes posições ao longo do eixo x (longitudinal) e concluiu-se

¹Federação Internacional de Automobilismo

que a posição que menos prejudicaria o performance da asa principal seria aquela onde o *beamwing* ficasse o mais afastado possível da região onde o ar tem a maior velocidade quando passa pela asa principal, ou seja na parte com maior espessura do *mainplane*. Por isso o *beamwing* foi posicionado na parte traseira.

Outro parâmetro importante é o ângulo de ataque. Foram testados diferentes ângulos no *beamwing* e foi percebido que naquela região este aerofólio tolera ângulos de ataque mais altos que em outras condições anteriormente vistas. Foi encontrado que a 24° o *beamwing* apresenta seu melhor desempenho, gerando regiões de alta carga aerodinâmica através de altas velocidades. Este comportamento é devido a que o *beamwing* está em uma região de alta energia, pois embaixo da asa principal o ar tem uma media de velocidade de 20 m/s ou 75 km/h e portanto a energia cinética é maior. Isto faz com que a camada limite possua mais energia e seu descolamento seja menos provável. Na Figura 40 pode-se ver o perfil de velocidades e o posicionamento da asa principal e o *beamwing* o qual mostra velocidades até de 34.5 m/s , enquanto que anteriormente o *mainplane* gerava velocidades de 32 m/s .

Figura 40 – Campo de velocidades em um plano localizado no meio da envergadura da asa que mostra o comportamento do fluxo após implementação do *beamwing*.

À partir da implementação do *beamwing*, encontrou-se que apesar de que o *downforce* foi incrementado, o C_L diminuiu devido a que a área de referência da asa inteira aumentou. Deve-se lembrar que para a análise de um aerofólio isolado, a área de referência é a área da vista superior.

4.2.7 Endplates

No início desta seção foi estabelecido um tamanho inicial dos *endplates*, mostrado na Figura 21. No entanto, nestas peças podem ser feitas algumas modificações ou otimizações a fim de controlar, aproveitar ou eliminar fluxos de natureza complexa.

Uma dessas modificações é um corte na parte frontal-inferior dos *endplates*, tal como mostra a Figura 41(a). Esse corte é feito com o objetivo de aproveitar as baixas pressões criadas pela ação dos vórtices gerados por esse corte. Em outras palavras, o corte dá uma componente longitudinal na parte frontal dos *endplates* e faz com que um vórtice seja criado ali, diminuindo a pressão e aumentando a carga aerodinâmica. A Figura 42 mostra uma comparação do comportamento do fluxo perto dos *endplates* com e sem o corte frontal, através do perfil de velocidades e do contorno de pressões. As linhas azuis das Figuras 42(b) e 42(d) mostram os núcleos dos vórtices em um plano vertical a 5 mm do *endplate*. Na Figura 42(d), pode ser observado o vórtice criado no corte frontal do *endplate*, o qual incrementa a baixa pressão naquela região e aumenta o desempenho geral do aerofólio.

Voltando para a Figura 41(b), pode-se ver um segundo corte, o qual foi feito na parte superior-traseira do *endplate*. Este corte aproveita as diferenças de pressões geradas pelo vórtice de ponta de asa criado na parte frontal do *endplate*. Apesar que na parte traseira interna do *endplate* há pressões baixas, como mostram as Figuras 42(b) e (d), por causa do vórtice de ponta de asa na parte traseira- externa-superior do *endplate* a pressão é ainda mais baixa, como mostra a Figura 43. Esse corte age como uma janela que permite que o escoamento seja acelerado desde a parte interna do *endplate* para a parte externa, devido à diferença de pressões anteriormente descrita. Isto faz com que o fluxo nessa região aumente a velocidade e a separação da camada limite seja menor na parte traseira do *flap* superior.

Figura 41 – A imagem (a) mostra o primeiro corte frontal-inferior, e a imagem (b) mostra o corte posterior feito na parte superior-traseira do *endplate*.

Figura 42 – A imagem (a) e (b) mostra o perfil de velocidades e contorno de pressões do aerofólio com *endplates* retangulares. Já na imagem (c) e (d) mostra-se as mesmas cenas da asa com o corte frontal no *endplates*. Os planos onde são tomadas essas visualizações estão a 5 mm do *endplate*.

A terceira e última modificação feita nos *endplates* trata-se de vários cortes horizontais na parte superior-frontal dos *endplates*. Esses cortes procuram diminuir de maneira sensível a diferença de pressão entre ambas as faces do *endplate*, a fim de diminuir o impacto negativo do vórtices de ponta de asa no arrasto induzido do aerofólio. A Figura 44 mostra que esses cortes horizontais afastam o núcleo do vórtice da borda superior do *endplate*, fazendo com que o vórtice de ponta de asa perca magnitude e diminua o arrasto induzido do aerofólio. Além disso, em cada um dos cortes foi colocada uma pequena aba que busca direcionar para acima o ar que está saindo desde a parte interna da asa. Isto é uma maneira de transferir quantidade de movimento desde o aerofólio para o ar e consequentemente criar pequenas quantidades de carga aerodinâmica sem arrasto. A Figura 45 mostra a ação das abas nos cortes laterais. Pode-se notar que as abas direcionam o ar para acima, enquanto que sem abas o fluxo sai dos cortes horizontalmente.

Figura 43 – Contorno de pressões da asa traseira em um plano a 5 mm da parte externa do *endplate* com os dois cortes iniciais.

Figura 44 – Contorno de pressões da asa traseira em um plano a 5 mm da parte externa do *endplate* implementando todos os cortes.

4.2.8 Análise dos resultados

Após implementação de todas as estratégias para otimizar o performance do aerofólio traseiro, pode-se fazer uma análise e um resumo dos objetivos alcançados.

A Tabela 8 mostra os valores de C_L , *downforce*, C_D e arrasto atingidos após cada modificação implementada no aerofólio traseiro. Pode-se notar que acrescentar elementos à asa principal incrementa significativamente o C_L , assim como otimizar a posição dos *flaps* através de pequenas mudanças como o ajuste do ângulo δ_f e a otimização do *gap-overlap*.

Pode-se observar que o *gurney flap* melhora a performance da asa em valores próximos a 4%, muito longe dos valores de 10% achado nos textos aeronáuticos. Uma razão para esse comportamento pode ser a complexidade dos fluxos em torno a um aerofólio com baixa relação de aspecto. Esse tipo de fluxos e comportamento diferenciados começam

aparecer quando $\mathcal{R} < 6$. Considerando que no aerofólio traseiro desse projeto a relação de aspecto $\mathcal{R} = 1.4$, então esse tipo de comportamento é esperado.

Também pode-se ver que o *beamwing* diminui o valor do C_L , no entanto o *downforce* aumenta. Isto é devido a que esse aerofólio incrementa a área de referência da asa inteira. Encontrou-se que o *beamwing* consegue tolerar altos ângulos de ataque pelo fato de estar em uma região de alta energia.

Finalmente, pode-se ver que fazendo modificações pontoais nos *endplates* para lidar com os vórtices, é possível melhorar a carga aerodinâmica em 6% ou mais.

A Figura 46 mostra os resultados do C_L , do C_D e dos resíduos das simulações CFD depois de convergir.

Figura 45 – As imagens (a) e (b) mostram escoamento nos cortes laterais sem e com abas, respectivamente. Pode-se notar que na imagem inferior o fluxo adquire uma componente vertical na saída dos cortes.

Estratégia implementada	C_L	<i>Downforce</i> [N]	C_D	Arrasto [N]
Um elemento	-2.29	128.02	0.54	30.34
Dois elementos	-3.52	222.46	1.21	76.86
Três elementos	-4.06	257.02	1.67	105.18
Ajuste de <i>flaps</i> no ângulo δ_f	-4.38	283.08	1.92	124.09
Otimização <i>gap-overlap</i>	-4.49	290.21	1.98	128.16
<i>Gurney Flap</i>	-4.60	297.14	2.14	138.71
<i>Beamwing</i>	-4.45	319.22	2.21	157.61
Corte inferior no <i>endplate</i>	-4.56	327.11	2.15	153.32
Corte traseiro no <i>endplate</i>	-4.69	336.41	2.18	155.59
Cortes laterais sem abas no <i>endplate</i>	-4.68	335.69	2.04	145.45
Cortes laterais com abas no <i>endplate</i>	-4.71	337.84	2.06	147.02

Tabela 8 – Resultados finais e evolução do C_L , *downforce*, C_D e arrasto após cada estratégia implementada no aerofólio traseiro.

Figura 46 – Resultado do C_L e do C_D e dos resíduos da simulação final do aerofólio traseiro com 1200 iterações.

4.3 Asa Dianteira: configuração e estratégias de otimização

O aerofólio dianteiro também tem regras que limitam seu tamanho. As principais normativas que regulam as dimensões da asa dianteira estabelecem que os limites desse aerofólio são:

1. 700 mm da parte frontal dos pneus dianteiros.
2. A face externa dos pneus dianteiros, medidos à altura da linha central do cubo.
3. Quando seja vista desde a parte frontal do veículo, a parte na frente dos pneus que está a 250 mm por cima do nível do solo, não pode estar obstruída por nenhum dispositivo aerodinâmico, exceto qualquer superfície vertical com espessura menor a 25 mm.

Devido às baixas velocidades e as anteriores regulações do tamanho, a otimização da asa traseira deve ser focada no coeficiente de sustentação C_L .

4.3.1 Configuração do Mainplane

A asa dianteira apresenta uma complexidade superior em relação à asa traseira devido a sua interação com outros elementos, como por exemplo a proximidade com o solo. Como foi analisado no capítulo anterior, o perfil BE 153-155 foi selecionado para ser o *mainplane* da asa dianteira devido, principalmente, a seu comportamento perto do solo.

No entanto, a relação entre o aerofólio dianteiro e o solo não é só uma relação aerodinâmica. Também existe uma relação mais direta relacionada com o movimento do veículo em diferentes situações de pista. Por exemplo, quando o veículo experimenta curvas anguladas, com desníveis ou afundamentos, os *endplates* ou até as pontas do *mainplane* podem bater no chão e estragar ou deteriorar a asa, e por essa razão, nem sempre é possível colocar a altura do *mainplane* no ponto ótimo. À partir desses problemas, decidiu-se projetar um degrau no meio da envergadura do *mainplane* da asa dianteira. Contudo, no capítulo seguinte será feito uma análise detalhada do comportamento deste degrau associado com a altura em relação ao solo e o movimento oscilatório da suspensão do veículo. Já que em cima desse degrau não haverá um esquema multi-elemento devido ao posicionamento do chassi e o bico, o ângulo de ataque do perfil no meio do *mainplane* deve ser menor do que nos extremos. A Figura 47. mostra o *mainplane* usado no aerofólio dianteiro.

Figura 47 – *Mainplane* do aerofólio dianteiro. Note-se o degrau no meio da asa, o qual tem uma corda de $c = 378 \text{ mm}$ e ângulo de ataque 7° . Já nos extremos, o aerofólio possui uma corda de $c = 405 \text{ mm}$ e ângulo de ataque 12° .

4.3.2 Posicionamento dos flaps e Gurney flap

O procedimento usado para posicionar os *flaps* e o *Gurney flap* foi desenvolvido da mesma maneira que foi feito para o aerofólio traseiro. Ou seja, o ângulo δ_f foi posicionado até eliminar a separação da camada limite e depois foi otimizado o *gap-overlap* de cada espaçamento entre elementos. No aerofólio dianteiro também foi escolhido uma configuração de três elementos na asa principal. As Figuras 48 e 49 mostram o comportamento do carga aerodinâmica em função do *gap* para diferentes valores do *overlap* nos dois *slots*.

Figura 48 – Comportamento do *downforce* em função do *gap* no *slot* inferior para diferentes valores de *overlap*.

Depois disso, foram testados diferentes comprimentos e ângulos do *Gurney flap* até achar o melhor performance possível e foi conferido através da criação dos vórtices contrarrotantes na parte traseira dele. A Figura 50 mostra o campo de velocidades da seção multi-elementos da asa dianteira cujos *flaps* têm uma corda 38% da corda total $C = 513 \text{ mm}$.

Na Figura 51 pode-se ver o contorno de pressões da asa dianteira, onde consegue-se observar as baixas pressões criadas pelo *Gurney flap*. O comprimento do *Gurney flap* tem

Figura 49 – Comportamento do *downforce* em função do *gap* no *slot* superior para diferentes valores de *overlap*.

6%C e está posicionado a 91° da corda do *flap* superior. Uma interpretação alternativa do *Gurney flap*, se baseia na ideia que na parte superior dos vórtices contrarrotantes existe um ponto de estagnação. O fluxo de alta velocidade proveniente da parte traseira da asa chega até esse ponto antes de mudar de direção. Em outras palavras, esse ponto de estagnação age como se fosse o bordo de fuga, e consequentemente a asa, incrementasse a sua corda total.

Em geral, pode-se observar uma diferença notável nos contornos de pressões da asa dianteira e traseira, por causa da proximidade e o movimento do solo. A região de baixa pressão não consegue descrever um semi-círculo embaixo da asa principal, como acontece com a asa traseira. Em contraste, essa região se desloca mais para trás e acrescenta a velocidade do fluxo no *flap* inferior. Outra consequência importante é que o ponto de estagnação do *mainplane* agora fica exatamente no bordo de ataque, a diferença do *mainplane* da asa traseira, onde tal ponto está localizado na parte superior do *mainplane*. Isto faz com que o fluxo que escoar por baixo da asa evite fazer o percurso do bordo de ataque e portanto, consiga transitar com maior energia.

4.3.3 Configuração em cascata

Um método que também poderia se classificar dentro de uma asa de vários elementos, é o uso de um bi-plano ou também conhecido como configuração em *cascata*. Diferentemente do *beamwing* implementado na asa traseira, cuja posição foi fixada embaixo do *mainplane*, no aerofólio dianteiro essa configuração consiste de um segundo arranjo de *flaps* colocados em cima do *mainplane*. A parte mais importante desse processo é fixar estes *flaps* em uma região que não prejudique o fluxo dele nem o da asa principal. Ou seja, considerando que a região de baixa pressão da cascata está imersa na região de alta pressão da asa principal, a cascata deve-se posicionar o mais afastado possível das altas pressões, a fim de não interferir no desempenho da asa geral. Caso contrário, podem acontecer eventos

Figura 50 – Campo de velocidades da configuração de três elementos na asa dianteira, a qual tem $\alpha = 44^\circ$. A corda dos *flaps* combinados é de $38\%C$ a 76° relativo à velocidade do ar.

Figura 51 – Contorno de pressões da configuração de três elementos na asa dianteira. Imagem tomada a 25% da envergadura.

de criação de *bubbles* ou bolhas de ar turbulento em cima do *mainplane*. Em uma análise da Figura 50, pode-se ver que essa posição pode ser no extremo superior-frontal da asa. No entanto, foram feitos vários testes com diferentes posições da cascata para confirmar o anterior. A Figura 52 mostra o perfil de velocidades da asa principal e a cascata. No aerofólio principal da cascata foi usado o perfil *DBHL* e no *flap* foi usado o BE 122-155. Esses perfis foram analisados no capítulo anterior. A Figura 53 mostra o campo escalar de pressão em torno ao aerofólio. Pode-se observar que a cascata cria um gradiente de pressões nas duas superfícies dela, acrescentando uma quantidade de *downforce* sem

precisar de um aumento na área de referência da asa. A implementação da configuração em cascata incrementa o *downforce* total da asa em 14%, demonstrando que é uma estratégia eficiente de alta sustentação.

Figura 52 – Campo de velocidades na asa dianteira após implementação da configuração em cascata.

Figura 53 – Contorno de velocidades na asa dianteira após implementação da configuração em cascata.

Após as anteriores implementações, o projeto do aerofólio dianteiro pode ser visto na Figura 54, a qual mostra os contornos de pressões sobre as superfícies de pressão e sucção. Também, pode-se observar que até agora, foi escolhido um tamanho e forma padrão do *endplate*, pois não é possível aumentar seu tamanho inferior devido à proximidade com o solo. No entanto, fazendo algumas modificações no *endplate*, pode-se aproveitar algumas características dos fluxos complexos nessa região para aumentar a carga aerodinâmica.

Figura 54 – A imagem (a) mostra o contorno de pressões na região de pressão em uma versão não final do aerofólio dianteiro, e a imagem (b) mostra a região de sucção.

4.3.4 Endplates

A região dos *endplates* do aerofólio dianteiro permite fazer diferentes modificações e otimizações. Aqui, deve-se ter em mente um aspecto importante: as baixas pressões geradas na criação de vórtices pode contribuir à geração de *downforce* adicional para otimizar o desempenho nas pontas do aerofólio. A fim de aplicar esta última ideia na asa dianteira, foi implementada uma peça aerodinâmica conhecida como *footplate* localizada na parte inferior dos *endplates* em sentido longitudinal. Seu efeito é incrementar a baixa pressão através do aumento na magnitude dos vórtices formados embaixo das pontas da asa devido ao movimento de ar desde a parte externa para a parte inferior da asa dianteira. Uma geometria semicircular ou curva do *footplate* cria um vórtice com maior magnitude em comparação com o *footplate* plano.

Outra importante consideração é que as rodas dianteiras receberão o ar de maneira frontal, e isto, combinado com o a rotação delas pode produzir grandes quantidades de arrasto. Fisicamente, a aerodinâmica associada ao movimento das rodas é um área de grande interesse tanto experimental quanto computacional. Uma das fraquezas dos softwares comerciais de CFD é a falta de capacidade para descrever dados confiáveis da física nessas regiões críticas. Além disso, o entendimento da física básica do escoamento nessa região é limitado devido à complexidade geométrica e as condições de contorno do fluxo associadas com esse problema.

Com o intuito de fornecer uma solução para o arrasto gerado nas rodas devido a sua geometria e à rotação delas, pode ser usando um dispositivo localizado verticalmente na parte traseira do *endplate* de maneira que crie um *camber* efetivo no extradorso da asa e na parte interna do *endplate*, fazendo com que o ar escoe com maior velocidade nessa região. A Figura 55 mostra algumas formas de aplicar esses dois últimos dispositivos (*footplates* e peça vertical no *endplate*) que foram testados -entre outros- ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Figura 55 – A imagem (a) mostra o modelo implementando só a placa vertical no *endplate*; a imagem (b) mostra só com *footplate*; a imagem (c) mostra o modelo usando as duas peças anteriores e a imagem (d) mostra o modelo usando *footplate* e defletor.

Considerando o aerofólio da Figura 55(a), o qual tem uma peça vertical colocada na parte traseira do *endplate*, encontra-se que essa peça incrementa o *downforce* em quantidades entre 2% – 3%, dependendo da largura dele. Os incrementos do arrasto flutuam entre os mesmos valores devido ao aporte do arrasto induzido e do arrasto de forma. No entanto, a implementação dessa peça ainda não resolve o problema do arrasto nas rodas dianteiras. Portanto, esse dispositivo foi substituído por um defletor curvo mais largo, o qual desvia o ar da frente de grande parte das rodas.

Por outro lado, considerando o aerofólio da Figura 55(b) com apenas o *footplate*, os incrementos em *downforce* superaram o 19% com aumentos no arrasto de apenas 4%, em comparação com o aerofólio da Figura 54, o qual não possui *footplates*. Pode-se perceber que esta é uma peça fundamental do aerofólio dianteiro, na qual pode-se aprofundar e otimizar muito mais do que foi realizado no marco dessa pesquisa.

O uso de um defletor na parte superior do *footplate*, como mostra a Figura 55(d), permite aumentar o *downforce* entre 1% e 2%. No entanto, esta peça permite colocar

mais um elemento aerodinâmico em cima dela que pode ajudar a resolver dois problemas: tirar maior quantidade de ar das rodas e desviar ar pro radiador, a fim de garantir a temperatura suficiente para o motor funcionar de maneira adequada. Esta última aplicação de integração entre aerodinâmica e *powertrain* e seus resultados serão detalhados e discutidos no capítulo seguinte.

Esta última peça colocada em cima do defletor é um perfil aerodinâmico localizado de maneira vertical, com o ângulo fixado de maneira que consiga desviar o ar para o radiador na direção correta. Na Figura 56 pode-se ver o contorno de pressões da parte superior e do extradorso da versão final da asa dianteira, após implementação das modificações nos *endplates*.

Figura 56 – Contorno de pressões nas vistas isométrica e inferior do modelo final do aerofólio dianteiro.

4.3.5 Efeito solo

A física do escoamento em uma asa operando perto do solo é claramente diferente do que no escoamento livre. Além disso, a asa dianteira muda sua altura devido ao movimento da suspensão do veículo. Isso pode afetar severamente os níveis de *downforce* e portanto de aderência na pista. Assim, é importante conhecer o comportamento do *downforce* não só por razões de desempenho aerodinâmico, mas por segurança. Nesse sentido, um parâmetro de grande importância na asa dianteira é a razão h/c , onde h é a altura do solo da parte mais baixa da asa e c é a corda. Tem sido demonstrado que o *downforce* experimenta um valor máximo, usualmente entre $0.75 \leq h/c \leq 1.25$ (Zhang, X, et. al., 2006). Para valores menores o *downforce* tende a desaparecer quase subitamente, e para valores maiores o *downforce* experimenta uma diminuição gradual. Geralmente, considerando dimensões padrões de asas dianteiras, em alturas superiores a 100 mm o efeito solo é praticamente improdutivo.

A asa dianteira foi colocada inicialmente em uma altura de $h = 110$ mm. Para ter uma ideia da sensibilidade que a asa pode ter em relação às mudanças de altura, pode-se observar a Figura 57, a qual mostra a diferença da distribuição do coeficiente de pressão C_p na asa principal do aerofólio dianteiro, para $h = 110$ mm e $h = 220$ mm. Outros resultados relevantes considerando posicionamento e o comportamento da altura do aerofólio dianteiro e efeito solo serão tratados no capítulo de Aerodinâmica do veículo inteiro, já que isto depende de outros aspectos do veículo.

Figura 57 – Gráfico comparativo da distribuição do coeficiente de pressão C_p no aerofólio dianteiro, para alturas de 110 mm e 220 mm em relação ao solo.

4.3.6 Análise dos resultados

A Figura 58 mostra o contorno de pressões em um plano transversal na asa dianteira. Podem ser observados que cada *footplate* gera dois vórtices, sendo um deles formado embaixo do próprio footplate e outro na interface entre ele e o *endplate*. Pode-se ver também, um comparativo entre a magnitude desses vórtices e aqueles criados nas pontas da asa. Por outro lado, pode-se observar que os aerofólios verticais colocados em cima dos defletores horizontais nos *endplates* geram *downforce*, além de desviar ar das rodas e enviá-lo para o radiador. Isso pode ser notado através da diferença de pressões que são criadas nas superfícies do defletor que está na parte superior do *footplate*. A Tabela 9 mostra um resumo dos resultados atingidos após implementação de cada estratégia.

Figura 58 – Contorno de pressões em um plano transversal da asa dianteira. Note-se a criação dos vórtices próximos aos *footplates*

Estratégia implementada	C_L	<i>Downforce</i> [N]	C_D	Arrasto [N]
Um elemento (<i>mainplane</i>)	−1.35	73.03	0.88	46.57
Três elementos	−1.94	113.92	1.09	61.01
Ajuste de <i>flaps</i> no ângulo δ_f	−2.02	118.48	1.12	62.53
Otimização <i>gap-overlap</i>	−2.10	123.22	1.14	63.78
<i>Gurney Flap</i>	−2.16	126.92	1.15	63.92
<i>Configuração em cascata</i>	−2.46	138.83	1.13	66.24
<i>Footplates</i>	−2.85	165.21	1.16	68.89
Defletores verticais	−2.97	171.82	1.19	70.95

Tabela 9 – Resultados finais e evolução do C_L , *downforce*, C_D e arrasto após cada estratégia implementada no aerofólio dianteiro.

4.4 Assoalho difusor

O Assoalho difusor é um elemento aerodinâmico usado em automobilismo desde a década de 1970, que tem por objetivo criar altos valores de carga aerodinâmica e com uma relação entre *downforce*/arrasto menor que um aerofólio de alta sustentação. Isso é devido às características do fluxo nos canais formados entre o solo e as seções adequadamente projetadas das superfícies inferiores do veículo. A parte convergente desse dispositivo é conhecida como o bocal, que reduz a área perpendicular à direção de fluxo e provoca um incremento na velocidade do fluido, segundo o princípio da conservação da massa. Com base no Princípio de Bernoulli, essa mudança da energia cinética estará associada a uma redução da pressão estática embaixo do veículo, o que causa a geração de *downforce*. No entanto, a fim de otimizar a região de baixa pressão, após a seção mais estreita do canal, há uma parte divergente conhecida como o difusor, que diminui a velocidade do fluxo, melhorando a extração da massa de ar por baixo do veículo. O ângulo do difusor relativo ao solo desempenha o papel chave na efetividade dele. Na parte traseira o ar deve recuperar a pressão e diminuir a velocidade de maneira que a camada limite se mantenha colada na superfície superior do canal do difusor.

O difusor combina os efeitos do tubo de Venturi e a interação com o solo. Experimentos tem demonstrado que o movimento relativo do solo influi significativamente com o desempenho dos elementos próximos a ele, como o difusor, a asa dianteira ou as rodas (Zhang e Zerihan, 2003).

O assoalho difusor desenvolvido nessa pesquisa teve como principal característica o aproveitamento do fundo do carro inteiro, embora isso significasse um maior número de conflitos com outras partes do veículo. O difusor está dividido em três canais: um deles central e dois laterais. A Figura 59(a) mostra o canal central, o qual é o mais baixo devido à altura do carro, enquanto que os canais laterais, mostrados na Figura 59(b), são mais altos, já que estes consideram a posição das bandejas da suspensão e dos semi-eixos da transmissão do veículo. A geometria destes canais estão baseados em uma análise da influência do ângulo de saída no difusor, descrita em Ruhrmann e Zang, (2003). A Figura 60 mostra o CAD básico da distribuição dos canais no difusor.

Figura 59 – Perfis aerodinâmicos dos canais central e laterais usados no difusor.

O comportamento do fluido em um difusor que opera em um veículo de competição é altamente complexo e este é um dos elementos aerodinâmicos que ainda tem mais potencial de pesquisa. A permanente vorticidade nessa região, a proximidade com o solo e a alta vibração, faz com que o fluxo tenha comportamentos imprevisíveis.

Figura 60 – Imagem inferior do difusor básico e distribuição dos canais dentro dele.

4.4.1 Geradores de vórtices

Uma das geometrias mais simples para criar um vórtice é um perfil aerodinâmico simétrico com um ângulo de ataque diferente de zero. Um vórtice cria uma região de baixa pressão devido às suas altas velocidades dentro do núcleo. Nesse difusor foram implementados dois geradores de vórtices em cada entrada lateral do assoalho para aumentar a área de baixas pressões. As Figuras 61(a) e (b) mostram o contorno de pressões no fundo do difusor com e sem geradores de vórtices. Pode-se notar a diminuição da pressão à partir da região onde estão os geradores de vórtices.

4.4.2 Defletores

As altas vorticidades dentro do difusor tem a origem no ar externo que tende a entrar nas regiões de baixa pressão. Devido à inércia do escoamento e a maior concentração de baixa pressão no meio do difusor, o fluxo é afastado dos canais laterais. Um defletor dentro do canal pode diminuir esse efeito e direcionar o vórtice que entra no difusor para a saída dele, melhorando o escoamento dentro dos canais laterais. As Figuras 61(b) e (c) mostra o contorno de pressões no fundo do difusor com e sem defletores na parte traseira.

Figura 61 – A imagem superior mostra o contorno de pressões sem geradores de vórtices e a inferior após implementação deles.

A Figura 62 mostra uma comparação do comportamento das linhas de fluxo do difusor inicial básico e o difusor final com geradores de vórtices e defletores. Note-se que na imagem inferior dessa figura, os canais laterais tem maior fluxo e as velocidades dele são maiores. Finalmente, na Tabela 10 pode-se ver a evolução do desempenho do assoalho difusor após implementação de cada estratégia.

Figura 62 – A imagem superior mostra as linhas de fluxo no difusor básico, ou seja, sem geradores de vórtices nem defletores. Já na imagem inferior são mostradas as linhas de fluxo no difusor final, após implementação dos geradores de vórtices e os defletores.

Estratégia implementada	C_L	<i>Downforce</i> [N]	C_D	Arrasto [N]
Difusor básico com três canais	−0.56	129.94	0.10	25.02
Com geradores de vórtices	−0.58	135.68	0.11	26.02
Com defletores	−0.69	160.10	0.12	27.42

Tabela 10 – Resultados finais e evolução do C_L , *downforce*, C_D e arrasto após cada estratégia implementada no assoalho difusor..

Aerodinâmica do veículo inteiro

5.1 Preliminares

Embora o objetivo dessa pesquisa é projetar um pacote aerodinâmico, a principal motivação é aumentar o desempenho na dinâmica veicular de um carro de corridas. Para conseguir isso, a aerodinâmica deve trabalhar conjuntamente com todos os outros subsistemas do veículo a fim de canalizar seu grande impacto. Ou seja, pelo fato de ser uma aerodinâmica focada no alto *downforce* (e portanto, alto arrasto), as forças e a variação do fluxo implicam uma grande influencia que pode ser positiva ou negativa no desempenho do veículo.

Inicialmente será feita uma análise da dinâmica veicular do carro em diferentes situações de pista, como ventos cruzados e mudança do ângulo de deriva. Além disso, será mostrada a influencia do momento de guinada gerado pelas forças aerodinâmica laterais e seu impacto na estabilidade do veículo.

Por outro lado, será mostrada a maneira em que a aerodinâmica interage com outros subsistemas do veículo. Por exemplo com a suspensão, cuja área se relaciona diretamente com as forças geradas pela aerodinâmica, e o trabalho conjunto delas é o responsável da dirigibilidade, estabilidade, frenagem e balaço do veículo.

Além disso, a aerodinâmica também tem a função de direcionar o ar com a carenagem e outras partes, a fim de distribuir, refrigerar ou controlar fluxos de várias componentes do arrefecimento, admissão do motor, eletrônica e freios.

5.2 Dinâmica veicular

5.2.1 Análise aerodinâmica com ângulos de deriva

Quando o veículo está percorrendo uma curva, existe um ângulo entre a direção relativa do ar e a direção de avanço do veículo, conhecido como o ângulo de deriva β_W . A Figura 63 mostra uma ilustração do ângulo de deriva para o E13 em situação de curva.

Figura 63 – Ângulo de deriva formado entre a direção do vento e a direção de avanço do veículo.

Uma vez que a aerodinâmica é fundamental, principalmente quando o veículo está percorrendo curvas, as simulações CFD apenas com a velocidade do vento alinhada com o eixo longitudinal do veículo, não fornecem dados reais do comportamento dinâmico dele quando está fazendo curvas. Portanto, as simulações que consideram o ângulo de deriva proporcionam dois importantes resultados:

1. Os valores reais de *downforce* e arrasto com o carro em curva. Assim, nos modelos que são utilizados e que consideram o carro em curva com o ângulo de deriva resultante, pode-se saber com maior precisão as forças que actuam no veículo, e a distribuição destas forças entre os dois eixos. Portanto, não é necessário usar a aproximação de que o carro em curva apresentaria as mesmas forças aerodinâmicas do que em reta, algo que não é real.
2. Os valores de momentos de guinada gerados no carro pela aerodinâmica. Com certo ângulo de deriva, o veículo recebe ventos na sua lateral, e isso gera um momento de guinada no veículo, em torno do eixo vertical. Este momento pode trazer estabilidade ou instabilidade para o veículo, e com estas simulações consegue-se quantificá-lo. Com os dados, pode-se incluir este momento em nossas simulações, deixando os resultados mais próximos da realidade.

A Figura 64 mostra o comportamento do coeficiente de sustentação do carro inteiro em função do ângulo de deriva β_w . Em situações de curva, esse ângulo comumente é menor a 5° . No entanto, as simulações foram feitas para ângulos maiores a fim de simular o comportamento do carro em situações em que possa rodar. Pode-se notar que para ângulos inferiores a 3° o veículo apresenta valores de C_L maiores que quando está alinhado com a direção do ar. Da mesma maneira, um incremento se apresenta entre 10° e 15° e depois decresce até 30° .

Figura 64 – Comportamento do C_L do carro inteiro em função do ângulo de deriva β_W .

A Figura 65 mostra o valor de *downforce* em função do ângulo de deriva para os aerofólios dianteiro, traseiro e o difusor quando estão montados no carro. Pode-se observar que o difusor incrementa a carga aerodinâmica para valores menores a 1° . Segundo Katz (1985), isso pode ocorrer pelo incremento do fluxo embaixo do veículo, devido a que grande parte do ar entra lateralmente.

Figura 65 – *Downforce* em função do ângulo de deriva β_W para cada uma das principais componentes aerodinâmicas do carro.

Quando o veículo tem um ângulo de deriva, essa componente do vento que incide lateralmente nele gera uma força resultante M definida como,

$$M = \frac{1}{2} \rho A C_M v^2, \quad (8)$$

onde C_M é o coeficiente de momento e A é a área de referencia, perpendicular à direção de incidência do vento.

A Figura 66 mostra o comportamento do C_M em função do ângulo de deriva β_W . Espera-se que β_W aumente proporcionalmente ao C_M . No entanto, nesse gráfico pode-se observar que entre 10° e 15° está acontecendo algum evento aerodinâmico que causa uma leve diminuição no C_M . Além disso, na Figura 64 pode-se ver que nessa faixa de ângulos se apresenta um incremento do C_L , particularmente na asa traseira e no assoalho difusor, segundo a Figura 65.

Figura 66 – Comportamento do C_M do carro inteiro em função do ângulo de deriva β_W . Note-se a faixa entre 10° e 15° onde é gerado um espaçamento entre os pneus dianteiro e traseiro.

Após uma análise nesses ângulos, encontrou-se que na faixa de 10° e 15° se gera um espaçamento entre os pneus dianteiro e traseiro que recebem o ar incidente. Para compreender melhor, a Figura 67 mostra uma vista alinhada com a direção de incidência do ar para o carro com $\beta_W = 10^\circ$ na imagem esquerda, e $\beta_W = 15^\circ$ na direita. Pode-se notar que quando o veículo tem ângulo de deriva $\beta_W = 10^\circ$, a projeção da borda interna do pneu traseiro está alinhada com a borda externa do pneu dianteiro. A partir daí, nos ângulos seguintes, será gerado um espaçamento que fará com que o escoamento no *beamwing* e na parte baixa da asa traseira seja menos obstruído, aumentando o *downforce*. Da mesma maneira, esse espaçamento permitirá que mais ar consiga entrar pela parte lateral do difusor, incrementando seu desempenho.

Figura 67 – Vista com direção do vento incidente no veículo. Na imagem esquerda o carro tem ângulo de deriva de 10° e na direita de 15° . Note-se o espaçamento entre os pneus dianteiro e traseiro do veículo a partir de 10° .

Considerando o anterior, nessa faixa de ângulos é esperado um aumento no arrasto total, pois a componente de arrasto induzido aumenta por causa do aumento do C_L , e o arrasto de forma aumenta porque a área frontal também é maior. A Figura 68 mostra

o comportamento do coeficiente de arrasto C_D do carro inteiro para diferentes valores do ângulo de deriva β_W . A diminuição inicial do arrasto pode ser explicada à partir da redução do *downforce*. Segundo o anterior, pode-se observar que entre 10° e 15° o arrasto induzido também incrementa, de acordo com o aumento no C_L . Depois de 15° , quando o C_L começa diminuir de novo, o arrasto induzido também decresce, mas o arrasto de forma predomina e o C_D acaba aumentando, porém com uma taxa menor.

Figura 68 – Comportamento do C_D do carro inteiro em função do ângulo de deriva β_W .

5.2.2 Centro de pressão e estabilidade

O centro de pressão cp é o ponto onde agem todas as forças aerodinâmicas resultantes e o momento gerado é zero. A posição do cp relativa ao centro de gravidade (cg), é de relevante importância na estabilidade do veículo quando se consideram ângulos de deriva diferentes de zero, como foi visto na seção anterior.

A força M gerada pelos ventos laterais age diretamente no cp , o qual deve estar atrás do cg para garantir que o carro vai conseguir maior dirigibilidade e estabilidade nas curvas. Para entender melhor o anterior, pode-se ver a Figura 69. Quando o veículo percorre uma curva e existe certo ângulo de deriva, uma força resultante M gerada pelos ventos laterais atua no cp . A força M gerará um torque em torno a um eixo vertical no centro de gravidade, onde o braço x será a distância entre o cp e o cg . Se o cp estiver diante do cg , o torque gerado por M tenderá a aumentar o ângulo de deriva e o veículo perderá estabilidade e poderá apresentar eventos de sobreviragem com probabilidades de rodar.

A Figura 70 mostra a situação contrária. Quando o cp está posicionado atrás do cg , o torque gerado pela força resultante M com braço x gerará uma rotação em torno a um eixo vertical no cg , tentando diminuir o ângulo de deriva e reduzindo a influência da força lateral.

Figura 69 – O centro de pressão diante do centro de gravidade pode gerar instabilidade em situações de curva e $\beta_W \neq 0$.

Figura 70 – No caso onde o centro de pressão está atrás do centro de gravidade, o veículo é mais estável e diminui a influencia das forças laterais provenientes dos ventos cruzados.

A Figura 71 mostra o comportamento da distância x , entre o centro de pressão cp e o centro de gravidade cg , em função do ângulo de deriva. Dado que o eixo x aumenta na direção da velocidade do ar, os valores $x > 0$ representam a posição do cp atrás do cg e os valores $x < 0$ representam o cp diante do cg . À partir desse gráfico, pode-se observar que para ângulos de deriva $3 < \beta_W < 13$ o cp está diante do cg e portanto pode gerar algum tipo de instabilidade em curvas. Isso pode ser causado pela obstrução que os pneus fazem

entre o fluxo de ar e a asa traseira e o difusor. No gráfico pode-se ver que à partir de $\beta_W = 10^\circ$ o cp começa a se deslocar no sentido contrario. Depois, para altos ângulos de deriva, o cp se concentra na parte traseira do veículo, principalmente porque os *endplates* da asa traseira têm uma grande área exposta à incidência do ar.

Figura 71 – Comportamento da posição x do centro de pressão cp em função do ângulo de deriva β_W .

5.3 Integração com outros subsistemas

5.3.1 Suspensão

No capítulo anterior foi visto que o a proximidade da asa dianteira com o solo faz com que ela possua comportamentos diferentes em relação a um aerofólio que está afastado do solo. Em geral, quanto menor é a distância entre o aerofólio e o solo, maior é o *downforce* gerado. No entanto, considerando os efeitos da viscosidade, quando o aerofólio está muito perto do solo entra em situação de *stol* devido a que camada limite se separa por causa da alta sucção e dos gradientes adversos de pressões associados a este fenômeno (Zhang, X., et al., 2006). A Figura 72 mostra essa situação na asa dianteira. Pode-se ver que por baixo dos 100 mm, o aerofólio entra em perda e o performance decresce significativamente.

Por outra parte, o posicionamento dos elementos aerodinâmicos que operam perto do solo deve ser feito considerando o movimento vibratório do carro por causa da compressão e alongamento das molas da suspensão. Segundo os parâmetros do departamento de suspensão da equipe EESC-USP Fórmula SAE, o veículo pode ter uma variação de altura de ± 30 mm. A Figura 72 mostra o comportamento do coeficiente de sustentação da asa dianteira em função da sua altura mínima. Inicialmente, espera-se que a asa dianteira seja posicionada no pico do seu desempenho, ou seja em 100 mm de altura, onde o $C_L = 3.07$ é máximo. No entanto, nesse gráfico pode-se ver que para alturas menores ao pico, a taxa de variação do C_L é muito maior que para alturas superiores ao pico de desempenho. Isto

Figura 72 – Comportamento do C_L em função da altura mínima da asa dianteira.

significa que quando o veículo esteja na altura mínima por alguma irregularidade da pista ou transferência de carga em uma curva, a asa dianteira estará posicionada em 70 mm, onde o $C_L = 2.39$ e portanto, o carro perderá o 23% da carga aerodinâmica na suspensão dianteira. Essa condição pode causar eventos de subviragem, ou seja, os pneus dianteiros perdem aderência, o veículo perde o balanço e tende a seguir trajetórias tangentes nas curvas, colocando em risco a performance do carro e a segurança do piloto. Essa condição é uma das principais causas de perda de performance no automobilismo. Uma solução comumente usada é fixar a asa dianteira em uma altura próxima ao pico de desempenho, porém que permita variações na altura que não comprometam a dinâmica veicular.

Figura 73 – Vista ampliada do pico de desempenho da asa dianteira. A distância entre as linhas verdes denota a faixa da altura que o carro se movimenta. A linha vermelha mostra a posição final da asa.

Segundo o departamento de suspensão, um desequilíbrio de forças de até 10% entre os dois eixos pode ser tolerado pelo nosso veículo, sem apresentar grandes mudanças ou facilmente controláveis pelo piloto. A Figura 73 mostra uma vista mais ampla da região do pico da Figura 72. Pode-se ver que se o balanço do carro é feito fixando a asa dianteira

em uma posição de 110 mm, onde o $C_L = 2.97$, a altura mínima do veículo será de 80 mm, onde o $C_L = -2.67$, obtendo perdas próximas a 9% e garantindo equilíbrio aerodinâmico e performance veicular.

5.3.2 Powertrain

Uma das funções da aerodinâmica é a distribuição do ar em torno ao carro. O motor é uma das componentes do veículo que precisa de suficiente fluxo para conseguir fazer a mistura correta de ar e combustível. Segundo o departamento de Admissão e Exaustão da equipe, precisa-se de uma vazão mássica de ar mínima de $\dot{m} = 0.02$ kg/s. As simulações CFD forneceram dados de $\dot{m} = 0.06$ kg/s, e portanto pode-se garantir o funcionamento da admissão para os diferentes mapas do motor. A Figura 74 mostra as linhas de fluxo que chegam no filtro da admissão.

Figura 74 – Linhas de fluxo que chegam ao filtro de ar da admissão do motor.

A refrigeração do motor também é um fator importante do funcionamento do *powertrain*. Isto conseguiu-se através do radiador, o qual deve receber a quantidade de ar suficiente e aproveitar a sensação térmica dele para baixar a temperatura da água e refrigerar o motor.

A fim de direcionar maior quantidade de ar para região foi implementado um defletor na asa dianteira que tem a função de desviar parte do ar da roda para diminuir o arrasto e posteriormente enviá-lo para o radiador. Esse defletor é um perfil aerodinâmico vertical que está ajustado em um ângulo de ataque que permite desviar o ar para as zonas de interesse. A Figura 75 mostra as linhas de fluxo que passam por esse defletor para ser desviadas das rodas e depois chegar ao radiador.

Figura 75 – Vista superior do carro que mostra as linhas de fluxo que são desviadas da roda pelo defletor na asa dianteira e posteriormente chegam ao radiador.

Segundo dados do departamento de motor da equipe, uma vazão mássica de ar mínima de $\dot{m} = 0.17 \text{ kg/s}$ garante temperaturas que não comprometem a integridade das peças internas do motor. As simulações CFD do carro inteiro mostraram que ao radiador chegam $\dot{m} = 0.26 \text{ kg/s}$. A Figura 76 mostra uma imagem geral das linhas de fluxo que chegam nessa região.

Figura 76 – Linhas de fluxo que chegam ao radiador do veículo.

5.3.3 Freio

A aerodinâmica tem grande influencia na desaceleração do veículo devido à configuração de alto *downforce*. Na dinâmica veicular, o fator mais importante é o desempenho do carro no percurso inteiro da curva. Com a configuração de altas cargas aerodinâmicas, o carro tem maior habilidade para desacelerar mais rapidamente, e portanto o freio pode ser acionado de maneira mais tardia e efetiva, atingido maiores velocidades antes da entrada da curva e mantendo o carro em baixas velocidades por menor tempo.

O arrasto é o fator aerodinâmico que mais influencia diretamente na frenagem do veículo, pois ele se opõe ao avanço do veículo e contribui à desaceleração dele. No entanto, o *downforce* também influencia na frenagem do veículo através da deformação do pneu e ao consequente incremento na fricção entre eles e o asfalto, aumentando a resistência ao rolamento.

Além do mais, essas contribuições ajudam a preservar as pastilhas dos freios, evitando o desgaste prematuro delas, o qual é uma das maiores causas de perda de desempenho no automobilismo. Embora nesse trabalho não foi desenvolvido um projeto focado na refrigeração dos freios, a aerodinâmica comumente coopera nesse tópico.

5.3.4 Bico

O bico foi projetado com o dois principais objetivos: diminuir o arrasto de forma através de uma ponta refinada para diminuir a região de contato de alta pressão, e diminuir a sustentação positiva a través do posicionamento baixo da ponta. Ou seja, uma ponta mais baixa evitaria uma grande região de alta pressão entre a parte inferior do bico e a asa dianteira. A Figura 77 mostra o contorno de pressões em torno à parte frontal do veículo, a qual mostra a ponta refinada e baixa do bico.

Figura 77 – Contorno de pressões em torno à parte frontal do veículo. Pode-se ver a ponta refinada do bico e a pequena região de alta pressão entre ele e a asa dianteira.

5.4 Aerodinâmica do veículo inteiro

5.4.1 Configuração para Aceleração

Na competição de Fórmula SAE há uma prova dinâmica denominada Aceleração, na qual o veículo larga desde o repouso e deve percorrer 75 m em linha reta no menor tempo possível. Nessa prova, quando o veículo está largando precisa altos níveis de aderência entre os pneus traseiros e o asfalto a fim de evitar escorregamento e perdas na transmissão. No entanto, na largada, a velocidade do veículo é muito baixa e a carga fornecida pela aerodinâmica não pode ser aproveitada.

Por outro lado, nessa prova o veículo pode atingir velocidades próximas a 100 km/h (28 m/s) e o arrasto produzido pela aerodinâmica é um fator que acaba prejudicando o desempenho, já que é uma força em direção oposta ao movimento do veículo. Portanto, o veículo deve ter uma configuração aerodinâmica que minimize esse efeito e aumente a sua capacidade para acelerar linearmente.

Visando reduzir os valores do arrasto o máximo possível, foi criada uma configuração que diminui o ângulo de ataque de alguns dos *flaps* do aerofólio traseiro e dianteiro a fim de reduzir a área frontal do veículo. Na Figura 78 pode-se ver a configuração de aceleração adotada nos dois aerofólios, onde procurou-se minimizar a área frontal. A Figura 79 mostra o contorno de pressões em uma vista frontal do veículo, comparando a configuração original e a configuração de baixo arrasto. Segundo as simulações CFD, essa mudança causa uma redução de 21% na área frontal do veículo, de 59% no *downforce* e de 53% no arrasto total.

Figura 78 – Configuração de aceleração nos dois aerofólios para diminuição de arrasto.

A Figura 80 mostra uma comparação das linhas de fluxo passando pelo aerofólio traseiro nas configuração original e na configuração de baixo arrasto. Pode-se notar que na configuração de baixo arrasto os vórtices de ponta de asa são reduzidos, o qual significa que a magnitude do arrasto induzido também diminui.

Figura 79 – Contorno de pressões e comparação da vista frontal do veículo nas configurações original (esquerda) e de baixo arrasto (direita).

A Tabela 11 mostra um resumo dos principais resultados encontrados na simulação do carro inteiro na configuração de aceleração.

Caraterística	Conf. aceleração
Área frontal (m^2)	0.99
C_L	-1.24
C_D	0.68
$Downforce$ [N]	147.08
Arrasto [N]	76.78

Tabela 11 – Resultados das simulação CFD do veículo com a configuração de aceleração.

5.4.2 Análise de resultados

As simulações finais do carro inteiro foram feitas no domínio completo, pois para ângulos de deriva $\beta_W \neq 0^\circ$ a geometria não é simétrica e portanto não é possível usar meio domínio. Contudo, apesar que existe simetria quando $\beta_W = 0^\circ$, a simulação decidiu-se fazer com o domínio inteiro para garantir igualdade de condições e parâmetros. A malha dessa última simulação contém 29 milhões de nós em mais de 10 milhões de células, e foi rodada em torno a 22 horas.

A Tabela 12 mostra os resultados encontrados na simulação do carro inteiro e faz uma comparação com os resultados obtidos com o carro sem pacote aerodinâmico. Pode-se observar que o arrasto aportado pelos pneus diminui no carro com aerodinâmica, pois a asa dianteira afasta parte do ar da frente deles. Também, pode-se ver que o C_L do carro sem aerodinâmica é positivo, o qual é aportado principalmente pelos pneus em rotação.

Figura 80 – Contorno de pressões comparando as linhas de fluxo na asa traseira nas configurações original (superior) e de baixo arrasto (inferior).

Voltando na Figura 65, pode-se observar que a soma do *downforce* aportado pelos principais dispositivos aerodinâmicos montados no carro, não é igual ao *downforce* total do veículo. Isso significa que tem componentes dele que geram sustentação, sendo os pneus os principais contribuidores com valores em torno a 16 [N] em total. O bico aporta 4 [N] e o piloto 2 [N], para citar alguns casos.

O aerofólio traseiro é o dispositivo que mais se prejudica com a obstrução do veículo, pois as simulações entre esse aerofólio no ar livre e montado no carro, mostram uma diminuição de carga aerodinâmica de 63%. Para minimizar esse efeito, foi implementado um conceito inovador na fixação do aerofólio, o qual será detalhado no seguinte capítulo.

Nessa mesma linha, o aerofólio dianteiro teve uma diferença de *downforce* de 21%. Embora esse aerofólio não tem obstrução na parte frontal, algumas partes da carenagem e os pneus influenciam na esteira dele, o qual também prejudica o seu desempenho. Por outro lado, o assoalho difusor apresenta perdas apenas de 14% quando é montado no

Caraterística	Com aerodinâmica	Sem aerodinâmica
Área frontal (m^2)	1.25	0.736
C_L	-2.42	0.285
C_D	1.450	0.876
$Downforce$ [N]	345.02	-23.92
Arrasto [N]	206.72	83.94
$\dot{m}$ no radiador [kg/s]	0.26	0.32
$\dot{m}$ na admissão [kg/s]	0.06	0.11

Tabela 12 – Resultados físicos nas simulação CFD do veículo com a configuração de aceleração.

carro. Embora parece o dispositivo mais obstruído, é o que mostra melhores resultados finais, sendo o contribuidor de maior carga aerodinâmica e menor arrasto. Um estudo futuro poderia estar focado na influencia e interação da asa dianteira com o difusor.

Figura 81 – Imagens das simulações CFD

Figura 82 – Modelo final do E13 em CAD renderizado.

Testes em pista

6.1 Preliminares

“...Sem aerodinâmica eu sinto o carro ganhar velocidade em torno a 15% mais rápido, como se o motor estivesse mais potente. Porém, parece que o freio não funciona direito, o carro fica mais solto e escapa de traseira muito fácil. Já com aerodinâmica, na frenagem, o carro pára aproximadamente 40% mais rápido e fica muito firme, como se estivesse num trilho. Na saída de curva ele senta e ganha estabilidade muito rápido. O ponto negativo da aerodinâmica, é que eu canso mais rápido devido ao peso da direção. No entanto, com aero, eu ganho mais confiança, porque sei que o carro não vai escapar. Sem aero, a correção de direção e pedal é muito maior, e parece que o carro não está na “mão”. Sem aero é mais exaustivo mentalmente. Outro ponto bem legal são as curvas rápidas, pois se você fosse devagar, o carro espalha, então têm que aumentar a velocidade e dá para sentir o carro grudando no chão, e nisso eu sentia o corpo querendo ir pra fora do carro...” Denys Zandonadi, piloto EESC-USP Fórmula SAE.

O anterior faz parte de uma das conversas após um dos testes em pista com um dos pilotos da equipe. Para um aerodinamicista de pista o piloto é o sensor mais importante, pois à partir da interpretação da informação que ele fornece, podem ser feitas modificações e melhoras no veículo. No entanto, o aerodinamicista deve conhecer as capacidades do veículo e deve saber transmitir elas para o piloto, a fim de levar o carro até o limite e tirar a máxima performance possível.

Por outro lado, os sentidos intuitivos do piloto devem se adaptar quando ele pilota um carro com aerodinâmica. Por exemplo, em chicanes de alta velocidade e curvas rápidas, o veículo tende a escorregar e por natureza o piloto reduz a velocidade. Mas, em um carro que usa alta carga aerodinâmica, o piloto deve aumentar a velocidade para diminuir esse comportamento, em procura de maiores níveis de aderência.

Nesse capítulo se irá mostrar o procedimento dos testes em pista, os quais tentam reproduzir as provas dinâmicas da competição ou algumas características delas. Serão mostrados os parâmetros considerados, a análise dos dados obtidos e uma conclusão geral.

6.2 Teste de Skid Pad

A prova de *Skid Pad* visa avaliar a estabilidade do carro em curvas e a sua capacidade de gerar força centrípeta, e entrega apenas 50 pontos para o vencedor, sendo a prova que menor pontuação tem. Apesar disso, para a equipe, e principalmente para o departamento de aerodinâmica, essa prova é muito importante, pois fornece valiosa informação do comportamento do carro em curvas de raio curto e baixas velocidades, que são as principais características dos circuitos das provas que entregam maior pontuação.

Figura 83 – Esquema da pista de *Skid Pad* montado para os testes em pista e que reproduz as medidas estabelecidas na regra.

Inicialmente, foi colocado o *layout* da pista mostrado na Figura 83. Em cada tomada de tempos, o veículo entrava e percorria quatro voltas, das quais só as duas intermediárias eram cronometradas, pois a primeira e a última eram de entrada e saída do circuito. Foram feitas quatro tomadas com cada um dos dois pilotos. Duas das tomadas foram feitas em sentido anti-horário ($T1$ e $T2$) e duas em sentido horário ($T3$ e $T4$). O teste foi desenvolvido inicialmente sem aerodinâmica e depois com aerodinâmica para minimizar os efeitos do cansaço dos pilotos. A Figura 84 mostra o tempo médio de cada uma das quatro tomadas em função das tomadas. Pode-se observar que existem diferenças superiores a 0.5 s entre os resultados com e sem aerodinâmica. Também, note-se que a terceira tomada tem o melhor tempo médio na maioria das tentativas dos dois pilotos, o que significa que esse é o pico de desempenho deles.

A Tabela 13 mostra os tempos médios finais, velocidade média e aceleração centrípeta para cada piloto com o carro sem aerodinâmica. Além disso, mostra um valor médio total dessas quantidades, ou seja, combinando os tempos dos dois pilotos. Da mesma maneira, a Tabela 14 mostra os mesmos valores na situação em que o carro tem aerodinâmica.

Para calcular o *downforce*, o veículo será considerado como um ponto de massa concentrada. Embora existe deformação de pneus, nesses cálculos essa variável será desprezada.

Figura 84 – Tempo médio medido de cada piloto em cada uma das tomadas, no teste em pista de *Skid Pad*

Sem Aerodinâmica	$T_{médio}$ [s]	$v_{média}$ [m/s]	$a_{média}$ [g]
Piloto 1	5.336	10.744	1.291
Piloto 2	5.330	10.756	1.294
Média Total	5.333	10.750	1.293

Tabela 13 – Valores médios totais de tempo, velocidade e aceleração para cada piloto com o veículo sem aerodinâmica.

Com Aerodinâmica	$T_{médio}$ [s]	$v_{média}$ [m/s]	$a_{média}$ [g]
Piloto 1	5.153	11.126	1.384
Piloto 2	5.138	11.159	1.392
Média total	5.146	11.141	1.388

Tabela 14 – Valores médios totais de tempo, velocidade e aceleração para cada piloto com o veículo com aerodinâmica.

À partir dos resultados das Tabelas 13 e 14, pode-se fazer o cálculo do *downforce* lembrando que a força centrípeta experimentada por um corpo com massa M_i em permanente rotação está dada por,

$$\vec{F}_c = M_i \vec{a}_c, \quad (9)$$

onde $\vec{a}_c$ é a aceleração centrípeta. Uma vez que consideramos rotação constante, pode-se afirmar que a força centrípeta $\vec{F}_c$ é causada unicamente pela ação da força de atrito $\vec{f}$ dos pneus, os quais mantêm o veículo na trajetória curva, portanto,

$$\vec{F}_c = \vec{f} = -\mu(\vec{N} \times \hat{u}_i), \quad (10)$$

onde μ é o coeficiente de atrito dos pneus, $\vec{N}$ é a força normal de reação do solo à força descendente do veículo, e $\hat{u}_i$ é o vetor unitário em direção ao avanço de veículo. Combinando as equações 9 e 10, tem-se que,

$$-\mu(\vec{N} \times \hat{u}_i) = M_i \vec{a}_c. \quad (11)$$

A normal $\vec{N}$ é a força de reação às forças descendentes no veículo, ou seja, o peso $\vec{W} = M_i \vec{g}$ e o *downforce* $\vec{L}$, portanto,

$$\mu(\vec{W} + \vec{L}) = M_i \vec{a}_c. \quad (12)$$

Resolvendo a expressão 12 para o *downforce*, e retirando a notação vetorial, obtém-se que,

$$L = W \left(\frac{a_c}{g\mu} - 1 \right) \quad (13)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho A C_L (v_{média})^2 \quad (14)$$

A Tabela 15 mostra alguns parâmetros físicos usados para serem usados nas equações 13 e 14, a fim de calcular o *downforce* e o C_L .

Parâmetro	Valor	Origem
M_1	269 kg	Massa total do carro (205 kg) + Massa do piloto 1 (64 kg)
M_2	278 kg	Massa total do carro (205 kg) + Massa do piloto 2 (73 kg)
M_a	19 kg	Massa do pacote aerodinâmico.
M_{sa}	$M_i - 19$ kg	Massa do carro e o piloto, menos a massa do pacote aerodinâmico.
g	9.8 m/s^2	Valor médio da aceleração gravitacional.
μ	1.3	Valor tomado do <i>data sheet</i> da marca dos pneus Hossier.
ρ	1.184 kg/m^3	Com base na altura de São Carlos e a temperatura no dia do teste.
A	1.25 m^2	Área frontal tomada do modelo testado em CFD.

Tabela 15 – Valores físicos usados para o cálculo do *downforce* e o C_L .

Com a informação das Tabelas 14 e 15, e as equações 13 e 14, pode ser calculado o *downforce* e o C_L . A Tabela 16 mostra esses resultados para cada um dos pilotos e um resultados médio, do teste em pista do carro sem pacote aerodinâmico.

Sem Aerodinâmica	<i>Downforce</i> [N]	C_L
Piloto 1	-16.96	0.337
Piloto 2	-11.31	0.224
Média total	-13.19	0.262

Tabela 16 – Resultados do teste em pista na prova de *Skid Pad*.

Da mesma maneira, a Tabela 17 mostra os resultados do teste em pista de *skid pad* do carro com pacote aerodinâmico.

Com Aerodinâmica	<i>Downforce</i> [N]	C_L
Piloto 1	170.34	-1.89
Piloto 2	192.80	-2.12

Tabela 17 – Resultados do teste em pista na prova de *Skid Pad*.

6.3 Teste de Circuito

À partir desses testes foi usada uma ferramenta para o monitoramento e aquisição de dados chamado *Dash Logger* TDL 4.3, da empresa Pro Tune, patrocinadora da equipe EESC-USP Fórmula SAE. Esse dispositivo possui GPS integrado e acelerômetro nos três eixos, o que permite obter vários parâmetros dinâmicos do veículo, como velocidade, distância, tempo, aceleração lateral e longitudinal, entre outros parâmetros, que podem ser coletados em uma memória SD e depois ser visualizados no software Pro Tune Analyzer. A Figura 85 mostra uma imagem do dispositivo *Dash Logger* TDL 4.3 usado nos testes de circuito e de aceleração.

Figura 85 – *Dash Logger* TDL 4.3, da empresa Pro Tune.

6.3.1 Teste de circuito no Kartódromo Adalberto Cattani

Os testes em circuito buscam validar os dados encontrados nas simulações CFD, em pistas com características similares às pistas da competição. Ou seja, com várias series de *slalons*, *gates* e chicanes; muitas curvas lentas e fechadas, algumas curvas rápidas e poucas retas curtas de máximo 100 - 150 m de comprimento.

Uma das pistas utilizadas para fazer os testes de circuito foi o Kartódromo Adalberto Cattani de Araraquara (SP), o qual foi escolhido pela sua proximidade com São Carlos, sede da equipe, e onde foram feitos a grande maioria dos testes do E13. Pelo fato de ser um kartódromo, essa pista tem uma largura relativamente pequena e a maioria das curvas são de baixa velocidade. No entanto, no circuito foram colocados uma serie de cones a fim de travar ainda mais a pista através de *slalons* e chicanes, o qual obriga o veículo a tomar um número maior de curvas das que a pista original oferece. A Figura 86 mostra uma foto aérea desse circuito.

No teste que será apresentado nesse seção, o piloto dirigiu o veículo através do circuito em sentido anti-horário em voltas independentes, ou seja, no início de cada volta ele

Figura 86 – Kartódromo Adalberto Cattani em Araraquara (SP).

largava desde o repouso, simulando a prova de *Autocross* na competição. Inicialmente o teste foi feito sem aerodinâmica e depois com aerodinâmica, a fim de minimizar os efeitos do cansaço, pois a direção do veículo exige mais esforço quando é usado o pacote aerodinâmico, já que aumenta a força de fricção. As Figuras 87 e 88 mostram o E13 sem pacote aerodinâmico em um dos testes no Kartódromo Adalberto Cattani.

Na segunda parte do teste, o piloto percorreu de novo a pista com pacote aerodinâmico montado no E13, o qual foi balanceado novamente para garantir uma distribuição equilibrada do peso nas duas condições. Finalmente, a melhor volta em cada condição aerodinâmica foi tomada para analisar o comportamento do veículo.

Figura 87 – O E13 sem aerodinâmica na pista de Araraquara.

A Figura 89 mostra o comportamento da magnitude da velocidade em função da

Figura 88 – O E13 sem aerodinâmica na pista de Araraquara. Note-se um *slalom* feito com uma série de cones colocados em fila no meio da pista.

distância percorrida pelo veículo nas duas condições aerodinâmicas. A linha vermelha representa o E13 com aerodinâmica e a linha preta sem aerodinâmica. O carro larga do repouso e nos primeiros 100 m tem uma chicane e uma curva ampla para esquerda, seguida de mais duas chicanes, onde o carro com aerodinâmica tira uma pequena vantagem em velocidade. Entre 100 m e 200 m, o veículo aumenta a velocidade através de uma série de curvas que exigem correções e frenagens mais prolongadas por parte do piloto quando dirige o carro sem aerodinâmica. Na parte mais lenta, entre 200 m e 300 m, o comportamento nas duas condições é similar. Quando o veículo chega a 300 m, o veículo começa sair de uma curva e entra em outra de grande raio. O veículo sem aerodinâmica inicialmente mostra um crescimento maior na velocidade, no entanto, perto de 340 m o piloto deve fazer uma correção, diminuindo a velocidade e retomando em 350 m. Enquanto isso, a correção feita pelo piloto no veículo que usa aerodinâmica é muito menor o que permite ele atingir quase 85 km/h, antes da frenagem em 370 m. Em 490 m começa a reta mais comprida da pista e o carro sem aerodinâmica atinge maior rapidez em relação ao carro com aerodinâmica, mostrando uma diferença de quase 10 km/h no final da reta, antes da maior frenagem do circuito. Em 700 m pode ser observado novamente uma correção do piloto no carro sem aerodinâmica, possivelmente evitando uma derrapagem em meio da curva. Nos últimos 70 m pode ser visto que o carro sem aerodinâmica precisa de menor velocidade para tomar as curvas e portanto, suas frenagens são mais prolongadas em tempo e distância.

A Figura 90 mostra o comportamento da magnitude da velocidade em função do tempo total da volta mais rápida em cada uma das condições aerodinâmicas. A partir dos picos desse gráfico podem ser analisados os pontos onde o veículo com aerodinâmica tira as

Figura 89 – Comportamento da rapidez em função da distância nos testes em pista no kartódromo de Araraquara.

maiores vantagens, em termos de tempo, do carro sem aerodinâmica. Nos primeiros 200 m a diferença chega aproximadamente a 0.6 s. Na frenagem, em 300 m, a diferença aumenta a 1 s, e na curva rápida seguinte, o veículo sem aerodinâmica perde 0.2 s adicionais. Em 490 m, antes de começar a maior reta, o veículo sem aerodinâmica perde 1.5 s, no entanto, no final da reta recupera 0.4 s, e a diferença antes da frenagem, em 560 m, cai para 1.1 s. Porém, depois dessa frenagem e das duas seguintes curvas rápidas o veículo sem aerodinâmica perde 0.7 s e a diferença aumenta para 1.8 s. No *slalom* final o veículo com aerodinâmica ganha 0.3 s adicionais e finalmente chega na linha de meta. O resultado final mostra uma diferença de 2.09 s a favor do veículo com aerodinâmica.

A Figura 91 mostra o comportamento da aceleração lateral em função da distância, nas duas condições aerodinâmicas. Note-se que a magnitude da aceleração lateral do carro com aerodinâmica é superior nos picos, em relação ao veículo sem aerodinâmica, atingindo um máximo de 26 m/s^2 em 340 m e em 700 m, o que mostra que a aderência do veículo melhora quando a velocidade aumenta. Nesse parâmetro, o carro sem aerodinâmica mostra que os picos de aceleração lateral são aproximadamente iguais. Os dados mostram que a velocidade média para o carro com aerodinâmica foi de 64.6 km/h , e para o carro sem aerodinâmica foi de 62.1 km/h .

6.3.2 Teste de circuito no ECPA

Outra das pistas usada para realizar os testes em pista foi o Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo (ECPA), o qual é um autódromo maior que o Kartódromo de Araraquara, e foi escolhido por ser a sede da competição nacional de Fórmula SAE, o que

Figura 90 – Comportamento da rapidez em função do tempo nos testes em pista no kartódromo de Araraquara.

Figura 91 – Comportamento da aceleração lateral em função da distância nos testes em pista no kartódromo de Araraquara.

proporcionaria dados mais reais do asfalto da pista. A Figura 92 mostra uma foto aérea desse circuito localizado na cidade de Piracicaba (SP), o qual tem maiores dimensões que a pista de Araraquara, e portanto, espera-se uma velocidade média superior.

Nesses testes, o piloto dirigiu o E13 durante uma serie de voltas contínuas, ou seja, diferentemente do teste realizado em Araraquara, o veículo largou do repouso só no início do teste, simulando a prova de Enduro na competição, e foram tomados os dados da melhor volta tanto do carro com aerodinâmica quanto sem ela. A Figura 94 mostra o comportamento da magnitude da velocidade em função da distancia percorrida dessas duas voltas.

Figura 92 – Autódromo Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo (ECPA), em Piracicaba (SP).

Figura 93 – Feedback do piloto em um dos testes no ECPA.

Nos primeiros 110 m, o veículo experimenta um U de grande raio, seguido de uma curva em sentido contrario. Note-se na linha azul, a qual representa o carro sem aerodinâmica, que o piloto faz uma correção em cada uma das curvas do U a fim de controlar o veículo, causando uma perda de velocidade em relação ao carro com aerodinâmica, o qual mostra um aumento de velocidade mais constante. Depois da forte frenagem, em 140 m, há uma reta onde o carro com aerodinâmica mostra limitações de aceleração linear à partir de 70 km/h. Entre 200 m e 490 m, o veículo percorre varias curvas rápidas nos dois sentidos, onde o carro sem aerodinâmica faz frenagens mais fortes, causando perda de tempo significativa. Entre 490 m e 600 m encontra-se a maior reta do circuito, e a diferença de velocidade máxima é de 7 km/h a favor do carro sem aerodinâmica. Depois da frenagem mais forte do circuito, em 615 m, aparece uma reta com uma chicane em 670 m. Pode-se ver que o carro sem aerodinâmica tem que diminuir a velocidade para tomar a chicane, enquanto que o carro com aerodinâmica mantém um aumento de velocidade mais regular. Da mesma maneira que na anterior reta, o veículo com aerodinâmica perde

7 km/h antes de acionar o freio em 740 m. Entre 780 m e 860 m, há uma série de fortes curvas nos dois sentidos, as quais podem ser tomadas com maior velocidade pelo carro com aerodinâmica.

Pode-se notar que o carro sem aerodinâmica consegue uma diferença favorável de 7 km/h no final das retas em quatro pontos da pista, sendo estes em 200 m, 600 m, 730 m e 910 m. No entanto, em zonas de curvas, perde até 15 km/h durante longos trechos, como por exemplo entre 300 m e 400 m. O resultado final mostra uma diferença de tempo total de 2.38 s a favor do veículo com aerodinâmica.

Figura 94 – Comportamento da rapidez em função da distância nos testes em pista no autódromo do ECPA.

A Figura 95 mostra o comportamento da aceleração linear em função da distância percorrida pelo veículo nas duas condições aerodinâmicas. Pode-se observar que em quase todo o percurso, a aceleração linear positiva é menor no veículo com aerodinâmica, o qual é causado pelo arrasto gerado principalmente pelos aerofólios. No entanto, esse arrasto somado ao aumento do atrito devido ao *downforce*, fazem com que as acelerações negativas sejam maiores, já que a frenagem é mais efetiva. Ou seja, o carro com aerodinâmica consegue parar mais rápido e em uma distância menor. Em zonas de aceleração em curva, como entre 660 m e 680 m, pode-se observar que o veículo sem aerodinâmica tem dois picos negativos, que representam duas frenagens no meio da curva, realizadas para corrigir o veículo que tende a derrapar e sair da trajetória. Fenômenos similares acontecem entre 80 m e 100 m, e entre 500 m e 515 m. Nesses trechos, o veículo que usa aerodinâmica não precisa fazer esse tipo de correções, o que favorece a estabilidade, o desempenho e a segurança.

A Figura 96 mostra o comportamento da aceleração lateral em função da distância. Note-se que os picos máximos de aceleração no carro sem aerodinâmica atingem níveis

Figura 95 – Comportamento da aceleração longitudinal em função da distância nos testes em pista no autódromo do ECPA.

similares. Enquanto que no veículo que implementa aerodinâmica, os picos de aceleração lateral conseguem valores superiores em curvas de alta velocidade, confirmando mais uma vez que -no caso do carro com aerodinâmica- a aderência, e portanto a força de fricção, aumenta quando a velocidade se incrementa.

Figura 96 – Comportamento da aceleração lateral em função da distância nos testes em pista no autódromo do ECPA.

6.4 Testes de aceleração e arrasto aerodinâmico

Os testes de aceleração foram realizados no campus 2 da Escola de Engenharia de São Carlos, e têm por objetivo validar o comportamento e os dados de arrasto do E13, encontrados na simulações CFD. Os testes foram divididos em duas partes: teste de aceleração e de desaceleração. Nesses testes foram implementadas as três configurações aerodinâmicas do veículo, isto é, com a aerodinâmica total, com *set up* de aceleração, o qual foi detalhado do anterior capítulo, e sem aerodinâmica. A Figura 97 mostra imagens tomadas o dia do teste com as três configurações aerodinâmicas usadas.

6.4.1 Teste de Aceleração

O objetivo é avaliar a influencia do arrasto aerodinâmico no comportamento do veículo quando este acelera linearmente em um percurso de 100 *m* em linha reta, a maneira de simular a prova de aceleração da competição de Fórmula SAE. Foram feitas 5 tomadas com cada uma das configurações aerodinâmicas, das quais foram usadas para análise as tomadas com valores médios. A Figura 98 mostra o comportamento da velocidade em função da distância para cada configuração aerodinâmica. Pode-se observar que à partir de 20 *m* a diferença entre as três configurações começa a ser significativa, de maneira que a medida que a velocidade aumenta, o arrasto mostra maior influencia. Em 100 *m* o veículo sem aerodinâmica atinge 84 *km/h*, enquanto que o veículo com *set up* de aceleração consegue chegar a 78 *km/h*. Nesse ponto o veículo com aerodinâmica atinge apenas 74 *km/h*.

A Figura 99 mostra a variação da distância em função do tempo. Pode-se ver que em 100 *m* a diferença de tempo entre o carro com e sem aerodinâmica é 0.45 *s*, ou de 6.63%, e o tempo do veículo com o *set up* é 0.22 *s* menor, ou 3.84% mais rápido que o carro que usa aerodinâmica. A Tabela 18 mostra a diferença da aceleração média, a velocidade máxima e o tempo entre as três configurações aerodinâmicas no teste de aceleração.

	$\bar{a}$ [<i>m/s</i> ²]	$V_{m\acute{a}x}$ [<i>km/h</i>]	Tempo [<i>s</i>]	Dif. %
Sem Aerodinâmica	3.43	84	6.79	-
Com set up de acel.	3.10	78	6.98	2.79
Com Aerodinâmica	2.89	75	7.24	6.63

Tabela 18 – Resumo dos resultados do teste de aceleração.

6.4.2 Teste de Coast Down

O *Coast Down* é um dos testes mais frequentemente usados na industria automotiva, e consiste em acelerar o veículo até uma determinada velocidade e depois desengatar as marchas, deixando o carro avançar no neutro até parar. O principal objetivo desse teste é

Figura 97 – Imagens do E13 com as três configurações aerodinâmicas usadas nos testes de aceleração.

avaliar os valores das forças de resistência que agem sobre o veículo sob algumas condições de velocidade e de pista, a fim de determinar características aerodinâmicas, resistência ao rolamento ou consumo de combustível.

Nesse caso, o *coast down* será realizado a fim de validar e comparar os valores do arrasto aerodinâmico encontrados nas simulações numéricas. Usando cada uma das configurações

Figura 98 – Comportamento da velocidade em função da distância no teste de aceleração.

Figura 99 – Comportamento da distancia percorrida em função da tempo, no teste de aceleração.

aerodinâmicas, foram feitas cinco tomadas, nas quais o piloto acelerou o E13 até o motor cortar o giro em terceira marcha. Isso garantiria uma velocidade muito próxima a 50 km/h em todas as tomadas. Á partir dos dados adquiridos com o *Data logger*, pode-se analisar a Figura 100, a qual mostra o comportamento da velocidade do veículo em função da distancia percorrida. Pode-se observar que sem aerodinâmica, o veículo atinge o ponto de corte de giro do motor aproximadamente 10 m antes que o veículo que usa aerodinâmica, além da velocidade ser maior em 3 km/h . No entanto, em 50 m os testes nas três condições têm uma velocidade similar. Depois desse ponto, rapidamente o carro sem aerodinâmica mostra que acelera negativamente com uma taxa maior que as outras duas condições. Depois dos 290 m os veículos sem aerodinâmica e com *set up* de aceleração devem acionar o freio, pois chegam no limite da reta de testes, enquanto que o carro com aerodinâmica consegue para em 255 m sem acionar o freio.

Figura 100 – Comportamento da velocidade em função da distância no teste de Coast Down.

A fim de desconsiderar o trecho onde os veículos sem aerodinâmica e com *set up* devem acionar o freio, na Figura 101 é analisado o comportamento da velocidade do veículo em função do tempo entre o ponto de máxima velocidade (v_m) e o ponto onde o veículo atinge $v_f = 12 \text{ km/h}$. Esse gráfico fornece informação importante, pois à partir da linha que une esses dois pontos, pode-se calcular a aceleração negativa média ($\bar{a}_m$) do veículo através da relação

$$\bar{a}_m = \frac{v_f - v_m}{\Delta t}, \quad (15)$$

onde Δt é o tempo gasto entre v_m e v_f .

Figura 101 – Comportamento da velocidade em função do tempo no teste de Coast Down.

Usando novamente a Segunda Lei de Newton, pode-se calcular a força externa exercida

no veículo, portanto,

$$F_T = M_i \bar{a}_m, \quad (16)$$

onde M_i é a massa do veículo e o piloto. Para o carro sem aerodinâmica, a massa total é 246 kg e para o carro com aerodinâmica e com set up a massa total é 265 kg. A força total F_T é uma soma do arrasto aerodinâmico D , e a força de resistência ao rolamento F_r , tal que,

$$F_T = D + F_r. \quad (17)$$

Essa força se origina na zona do pneu que entra em contacto com o solo, a qual se deforma e aquece, consumindo energia em forma de calor. Este fenómeno chama-se histerese e é a principal causa da resistência ao rolamento dos pneus, a qual está definida como

$$D = M_i g C_r, \quad (18)$$

onde $C_r = 0.014$ é o coeficiente de rolamento dos pneus, o qual é tomado do *data sheet* do pneus de competição *Hossier* usados no E13. Assim, pode-se calcular a força de arrasto através de

$$D = M_i (\bar{a}_m - g C_r), \quad (19)$$

o qual permite encontrar o coeficiente de arrasto C_D , comparando com,

$$D = \frac{1}{2} \rho A C_D (v_m)^2, \quad (20)$$

de maneira que, resolvendo o anterior para o C_D , obtêm-se que,

$$C_D = \frac{2 M_i (\bar{a}_m - g C_r)}{\rho A (v_m)^2}. \quad (21)$$

A Tabela 19 mostra o resumo dos resultados encontrados no teste de *Coast Down*, fazendo uma comparativa com os valores obtidos nas simulações CFD.

	$\bar{a} [m/s^2]$	$D [N]$	C_D (testes)	C_D (CFD)	Dif. %
Sem Aerodinâmica	-0.515	92.88	0.891	0.876	1.71
Com set up de acel.	-0.522	101.90	0.773	0.680	13.68
Com Aerodinâmica	-0.789	172.85	1.196	1.450	17.52

Tabela 19 – Resumo dos resultados do teste de *Coast Down*.

6.5 Outros testes

O *Data Logger* usado para adquirir os dados também permite saber o comportamento da temperatura interna do motor. Esse parâmetro é importante para aerodinâmica, afim de validar qualitativamente o refrigeração fornecida pela quantidade de ar que chega ao radiador. Embora não é possível saber de maneira precisa a vazão de ar que entra na

parede frontal do radiador, pode ser analisada a temperatura do motor em um teste com mais de 15 minutos de duração. A Figura 102 mostra o comportamento da temperatura do motor em função do tempo transcorrido em um teste de Enduro. Pode-se observar que a temperatura varia entre 88° e 90°. Se essa temperatura chegasse aos 99° ou 100°, a água se evaporaria e não conseguiria fazer a troca de calor com o ambiente na região do radiador. Entre 400 s e 500 s o carro é desligado para fazer a troca de piloto e portanto a temperatura sobe pois a velocidade relativa do ar é nula ou muito próxima a zero. Nesse momento a ventoinha é acionada e regula a temperatura até o momento em que o carro começa a andar de novo em 520 s.

Figura 102 – Comportamento da temperatura do motor em um teste da prova de Enduro

Análise dos resultados

Nesse capítulo serão analisados e comparados os resultados encontrados nos testes em pista e nas simulações CFD, a fim de obter uma validação do comportamento do veículo. Basicamente serão comparados os valores de C_L e C_D dos capítulos 5 e 6. Embora alguns desses resultados já foram mostrados anteriormente, nesse capítulo serão apresentados de novo com o objetivo de analisar as possíveis causas de erro. Também será feita uma análise dos resultados obtidos nos testes de circuito, os quais mostram uma visão geral do aporte que a aerodinâmica faz no desempenho do veículo.

7.1 Resultados de coeficiente de sustentação C_L

A Tabela 20 mostra uma comparação dos resultados do coeficiente de sustentação C_L encontrados nas simulações CFD, com os resultados dos testes de *skid pad* feitos em pista.

	Com Aerodinâmica			Sem Aerodinâmica		
	CFD	Testes	Dif (%)	CFD	Testes	Dif (%)
C_L Piloto 1	-2.42	-1.89	21.9	0.285	0.337	18.24
C_L Piloto 2	-2.42	-2.12	-12.39	0.285	0.224	-21.4
C_L Médio	-2.42	-2.01	16.94	0.285	0.262	-8.07

Tabela 20 – Comparativa dos resultados do C_L no teste de *skid pad* e nas simulações CFD.

Encontra-se que com aerodinâmica, existe uma diferença entre o piloto 1 o piloto 2 de 10.8%. Essa diferença só pode ser por causa das diferenças no estilo de pilotagem ou à diferente massa de cada piloto. Para ver a influencia da diferença da massa, pode-se ver que à partir da equação 12, obtêm-se que,

$$\mu Mg = M \frac{(v_{média})^2}{R} - \frac{1}{2} \mu \rho A C_L (v_{média})^2, \quad (22)$$

onde R é o raio médio da circunferência da pista de *skid pad*. Resolvendo a anterior

equação para a velocidade média, tem-se que,

$$v_{média} = \sqrt{\frac{2R\mu gM}{2M - R\mu\rho AC_L}}. \quad (23)$$

A Figura 103 mostra o comportamento da anterior equação, a qual representa a variação da velocidade média tangencial do veículo percorrendo a circunferência de *skid pad*, em função da massa total. Considerando que a massa total do carro com o Piloto 1 é $M_1 = 269 \text{ kg}$ e com o piloto 2 é $M_2 = 278 \text{ kg}$, observa-se que a diferença de velocidade, para estilos de pilotagem idênticos, é inferior a 0.1%, e portanto, pode-se concluir que a diferença de massa dos pilotos não é uma causa prática da diferença no desempenho.

Figura 103 – Comportamento da velocidade tangencial em função da massa total do veículo no teste de *skid pad*.

Portanto, conclui-se que o Piloto 2 teve um melhor desempenho que o Piloto 1 e assim, os resultados dele são mais próximos à realidade e serão usados para comparar com os valores encontrados nas simulações CFD. A Tabela 20 mostra que existe uma diferença de -12.39% entre o valor tomado do teste do piloto 2 e a simulação.

7.1.1 Possíveis causas de erro no C_L

Ângulo de deriva β_W

No teste de *skid pad*, foi colocada uma configuração da suspensão (*toe out*) para ajudar no controle do carro por parte do piloto, a qual faz com que o veículo tenha um pequeno derrape da parte traseira dele durante a maior parte do percurso, e portanto deve existir um ângulo de deriva β_W . Saber o valor desse ângulo de deriva no teste não é possível com os elementos tecnológicos que a equipe possui. Contudo, o ângulo de deriva existe, e segundo Smith (1978), está na faixa de $0.5^\circ < \beta_W < 3^\circ$. Com base na Figura 64, a qual mostra o comportamento do C_L em função do ângulo de deriva, pode-se calcular o erro associado a cada possível ângulo de deriva, o qual é mostrado na Tabela 21. Por exemplo, se o ângulo de deriva estiver próximo a 2° , o erro estaria perto de 0%.

β_W (°)	Erro %
0.5	11.66
1	9.79
1.5	5.78
2	0.93
2.5	7.07
3	14.59

Tabela 21 – Relação entre o possível valor de ângulo de deriva no teste em pista de *Skid pad*, e o erro associado em relação ao valores obtidos nas simulações CFD.

Massa concentrada e movimento permanente

Nos cálculos feitos à partir dos tempos tomados no teste em pista, foi considerado o veículo como uma partícula, ou seja, toda a sua massa estaria concentrada no seu centro de gravidade cg , e as forças agiriam nesse ponto. Embora essa aproximação pode fornecer resultados relativamente aceitáveis, as simplificações nas equações induzem erros, já que a transferência de carga e a deformação dos pneus influenciam no comportamento do veículo. Outra dessas aproximações se baseia na ideia que o veículo está percorrendo uma circunferência perfeita com velocidade constante. No entanto, na realidade o piloto escolhe fazer uma trajetória mais parecida com um oval. Por outro lado, a velocidade varia em uma pequena faixa, devido às correções que o piloto faz com o acelerador. Ou seja, o piloto não mantém o acelerador apertado constantemente, mas aciona ele de maneira intermitente para manter o carro no limite da aderência.

Pilotagem

Embora os pilotos da equipe são treinados, existe uma tolerância de erro de pilotagem e provavelmente eles não consigam levar o carro até o limite das suas capacidades. Portanto, o piloto 2, cujos resultados foram usados para comparar com as simulações CFD, não necessariamente tirou a máxima capacidade de aderência e desempenho do E13, provocando pequenas diferenças entre os resultados numéricos e os testes.

7.2 Resultados de coeficiente de arrasto C_D

A Tabela 22 mostra uma comparação dos resultados obtidos à partir do teste em pista *coast down* e os resultados das simulações CFD. Pode-se observar que a diferença nos resultados do veículo sem aerodinâmica é de 1.7%, relativamente pequenos em comparação com os resultados que implementam o pacote aerodinâmico. Isto pode ser devido a que o veículo sem aerodinâmica apresenta uma geometria mais simples, e portanto, a complexidade do fluxo é muito menor que nos outros casos. Uma vez que grande parte do arrasto deve-se ao desenvolvimento da esteira, o veículo com maior esteira, ou com mais

vorticidade nela, pode induzir maiores erros. Dessa maneira, o veículo que usa o *set up* de aceleração mostra um erro de 13.68%, o que é maior que o veículo sem aerodinâmica, porém, menor que o veículo com a aerodinâmica completa (17.52 %).

	$\bar{a} [m/s^2]$	$D [N]$	C_D (testes)	C_D (CFD)	Dif. %
Sem Aerodinâmica	-0.515	92.88	0.891	0.876	1.71
Com set up de acel.	-0.522	101.90	0.773	0.680	13.68
Com Aerodinâmica	-0.789	172.85	1.196	1.450	17.52

Tabela 22 – Resumo dos resultados do teste de *Coast Down*.

7.2.1 Possíveis causas de erro no C_D

Arrasto gerado pelos pneus

Os pneus são uma das principais causas de arrasto aerodinâmico. Devido a sua interação com o solo e à sua rotação, o campo de fluxo perto deles tem alta complexidade por causa da vorticidade. Uma das fraquezas do CFD, é que não tem conseguido descrever de maneira precisa o comportamento do ar nessa região, o qual induz erros nos resultados finais.

Regime permanente e transiente

As simulações CFD foram realizadas considerando regime permanente na dinâmica do fluido, no entanto, no *coast down*, o veículo sofre uma aceleração negativa causada pela variação da velocidade. Portanto, a mudança da velocidade produz uma variação do fluxo no tempo, e isso significa que o veículo apresenta características de regime transiente, o qual provoca erros nos resultados.

Perdas por fricção

Embora foi considerada a resistência à rolagem, existem outras fontes de arrasto dentro do veículo. Por exemplo, por segurança, o sistema de freios tem uma precarga nas rodas que faz com que elas não fiquem totalmente livres na rotação. Por outro lado, apesar que o veículo está no neutro, também existem pequenas forças de atrito dentro do motor e da transmissão que reduzem a velocidade do veículo, o que pode acrescentar pequenos erros nos resultados.

7.2.2 Outras possíveis causas de erro no C_L e no C_D

Manufatura

Embora foram implementadas várias estratégias para manter a geometria dos aerófilos e do assoalho difusor o mais parecida com os modelos projetados, deve-se considerar

erros na manufatura das peças, associadas com pequenas diferenças nos moldes negativos e rugosidade nas superfícies de fibra de carbono, entre outras. Também, o valor da área frontal do veículo pode apresentar algumas mudanças devido a pequenas diferenças na manufatura geral do carro.

Parâmetros de pista

As condições ambientais da pista podem induzir erros nos valores encontrados no veículo em testes, em relação aos valores em CFD. A densidade do ar ρ usada nos testes foi a mesma que a usada em CFD, o qual foi feito com base na altura e a temperatura média do lugar do teste. No entanto, cada dia apresenta mudanças de temperatura e umidade, e portanto também de densidade. Outro parâmetro que pode gerar um erro é a velocidade do ar, uma vez que ele pode ter uma rapidez diferente do zero mesmo quando o veículo está parado.

Outras possíveis causas de erro estão associadas à rugosidade do solo que pode influir no desempenho da asa dianteira e do assoalho difusor. Da mesma maneira, a dinâmica do veículo apresenta vibrações produzidas pelos amortecedores da suspensão ou como consequência da explosão interna do motor.

Parâmetros de CFD

Apesar de que o CFD é uma ferramenta poderosa na análise dos fluidos, seus resultados ainda não são completamente confiáveis. Isto acontece principalmente porque nesse projeto, o modelo de turbulência usado é o RANS, o qual simplifica muitas das equações de Navier-Stokes e isso já induz um erro. Além disso, há muitos parâmetros dentro da malha e das características físicas que poderiam ser refinados para obter resultados ainda mais próximos, porém, isso precisaria de grandes clusters e tempos computacionais, o qual não é prático para esse tipo de projeto.

7.3 Resultados dos testes em circuito

Embora não foi possível tomar dados de C_L e C_D nos testes em circuito, estes oferecem uma visão geral da diferença do comportamento do veículo implementando aerodinâmica. A estratégia de usar um pacote aerodinâmico com alto *downforce*, permite obter vantagens em qualquer tipo de curva. Nas curvas lentas, entre 20 – 40 km/h, a diferença é menos notória. Porém, nas curvas intermediárias ou rápidas, a melhora no desempenho é maior. Isto significa que nesses trechos o veículo pode ganhar entre 0.4 s e 1 s em relação ao veículo sem aerodinâmica. Esse comportamento se torna evidente nos resultados da aceleração lateral, já que seus valores são maiores nesse tipo de curvas. Isto acontece porque nas curvas com essas características, quando o veículo está no limite de aderência,

um aumento da velocidade faz com que o desempenho se incremente, enquanto que o carro sem aerodinâmica deve diminuir a velocidade para evitar derrapar o tomar uma trajetória tangente à curva. Nas zonas de desaceleração, o veículo com aerodinâmica tira vantagens significativas, já que utiliza menos tempo e distância na frenagem, gerando acelerações negativas até 15% maiores. Além disso, a velocidade mínima que o veículo com aerodinâmica precisa para tomar a curva é próxima a 5% maior que o veículo sem aerodinâmica. Por outro lado, o veículo com aerodinâmica mostra um comportamento desfavorável quando acelera linearmente, pois o arrasto diminui a taxa de crescimento da velocidade. No entanto, esse comportamento negativo não compensa as vantagens que mostra o uso da aerodinâmica.

Finalmente, as melhoras em tempo estiveram em torno a 4.4% nos testes de circuito. Para ter um parâmetro de comparação nessa diferença no automobilismo, nas sessões de classificação da Fórmula 1, um veículo não pode participar da corrida se o tempo da sua melhor volta é superior a 7% da melhor volta do veículo mais rápido, o qual não acontece faz quatro anos. Isso significa que atualmente a faixa entre os veículos mais rápidos e mais lentos está por volta de 6% ou menos. Então, pode-se concluir que se a aerodinâmica fornece melhoras de 4.4%, essas podem ser consideradas altamente significativas no desempenho.

Finalmente, o dia 4 de outubro o E13 consagrou-se campeão da Competição Nacional de Fórmula SAE entre 36 equipes brasileiras, obtendo os troféus de *Skid Pad*, Autocross, Custos e Manufatura, prêmio ao melhor Projeto e Campeão Geral.

Figura 104 – O E13, da Equipe EESC-USP Formula SAE, campeão 2015 do Campeonato Nacional de Formula SAE.

Conclusão

Criou-se um pacote aerodinâmico com uma configuração de alto *downforce*, composta principalmente por três elementos aerodinâmicos, que melhoram o desempenho do veículo principalmente em curvas, incrementando a velocidade e a aceleração lateral, como resposta ao aumento de aderência fornecido pelo acréscimo em carga aerodinâmica, o qual é evidenciado no tempo de volta de provas dinâmicas como *Skid Pad*, Autocross e Enduro.

Os resultados das simulações computacionais de fluidos CFD são altamente sensíveis para variações do domínio computacional. Ou seja, o tamanho do espaço retangular que simula ser um túnel de vento, deve ter umas dimensões mínimas, as quais devem estar o suficientemente afastadas do corpo de estudo, a fim de não influenciar nos resultados finais. Igualmente, a implementação de meio domínio e vários volumes de controle em torno ao corpo de estudo, são uma estratégia efetiva de otimização de tempo computacional.

Por outro lado, a análise de independência da malha foi um procedimento importante, o qual permitiu conhecer a distribuição do refinamento e a quantidade mínima de nós para garantir resultados confiáveis nas simulações. Para situações de refinamento inferiores ao ponto que a análise de independência da malha permite conhecer, os resultados se tornam altamente sensíveis a variações da malha. Da mesma forma, os resultados são altamente sensíveis às variações no refinamento das células na camada limite.

Criou-se uma nova seção aerodinâmica, nomeada DBHL, a qual possui características apropriadas para a geração de um alto coeficiente de sustentação C_L .

Projetou-se um aerofólio traseiro com características para a geração de um alto coeficiente de sustentação, com valor de $C_L = 4.71$. A estratégia de usar múltiplos aerofólios para incrementar a circulação na asa, pode aumentar o C_L em valores próximos a 80%, sendo o método mais eficiente para aplicações de alta sustentação. Igualmente, o posicionamento adequado dos elementos adicionais, através do ajuste do ângulo δ_f e da otimização do *gap-overlap*, pode resolver problemas de separação da camada limite, fornecendo aumentos no C_L com valores próximos a 10%.

O *Gurney flap* melhorou o escoamento do ar na região de sucção do aerofólio, principalmente onde os eventos de separação de camada limite podem aparecer, aumentando o

C_L em valores próximos a 3%. Pelo fato de ter valor relativamente baixo de $\mathcal{R} = 1.5$, o aerofólio traseiro apresenta altos valores de arrasto induzido e vorticidade. Isso pode diminuir o desempenho esperado de dispositivos como o *Gurney flap*, o qual deveria fornecer melhoras próximas a 10%.

Fazer alguns cortes e modificações pontoais nos *endplates* pode aumentar o C_L em valores próximos a 6%. Os cortes na parte inferior da borda frontal criam uma superfície com uma componente na direção do fluxo. Isso induz vórtices nessa região o qual melhora o desempenho do aerofólio.

A implementação de um perfil aerodinâmico com propriedades para aproveitar o efeito solo na asa dianteira, traz vantagens importantes no aumento do C_L nesse aerofólio. Da mesma forma, a implementação da configuração em cascata, fornece melhoras de 14% no valor de C_L , sendo uma das estratégias mais eficientes e inovadoras.

Os *endplates* do aerofólio dianteiro desempenham uma função muito importante devido às altas vorticidades nessa região e à necessidade de diminuir o arrasto gerado pelos pneus dianteiros. Para isso, podem ser implementadas peças como os *footplates* e defletores, os quais podem melhorar o desempenho do aerofólio em torno a 20%.

O assoalho difusor é um elemento de grande importância, já que na análise do carro inteiro, é o dispositivo que mais *downforce* aporta. O uso dos defletores, e em menor medida os geradores de vórtices, melhoram o desempenho do difusor em valores próximos a 23%.

A influencia do ângulo de deriva β_W pode afetar negativamente o C_L em valores próximos a 40% para os primeiros 5°. Essa influencia tem um crescimento quase constante nos primeiros 30°, exceto na faixa entre 10° e 15°, onde o fluxo lateral na asa traseira e no difusor melhora.

O posicionamento do centro de pressão cp nos primeiros 3° está diante do centro de gravidade cg , o que pode gerar algum tipo de instabilidade no comportamento do veículo. No entanto, à partir de 3°, até os 13° o cp passa para a parte traseira do cg , diminuindo o efeito negativo do ângulo de deriva ou dos ventos cruzados.

Fazer o posicionamento da asa dianteira, considerando o trabalho da suspensão, pode evitar perdas de 13% nesse aerofólio, e portanto um desequilíbrio nas forças aerodinâmicas.

Foi garantido o fluxo no radiador e na admissão do motor, a fim de garantir a refrigeração e o bom funcionamento do motor.

Foi criado um *set up* de aceleração que diminui o arrasto do veículo em 40% em situações de aceleração linear, onde não se precisa da carga aerodinâmica.

Foram realizadas uma serie de testes em pista que tiveram por objetivo validar os resultados dados nas simulações. Esses testes compararam o desempenho do carro com e sem aerodinâmica, mostrando melhoras significativas no tempo de volta.

Os resultados mostraram diferenças entre os testes em pista e as simulações, para o C_L aproximadamente $-7\% < \epsilon < 9\%$, dependendo do ângulo de deriva, sendo que se

$\beta_W \approx 2$ o erro $\epsilon \approx 0$.

Os resultados no C_D mostraram diferenças entre $1\% < \epsilon < 17\%$, sendo o menor erro o caso em que o veículo não usa aerodinâmica e o maior erro, o caso com aerodinâmica total. Entre as possíveis causas dos erros tanto no C_L , quanto no C_D , está o ângulo de deriva, cujo valor preciso é desconhecido, falhas na pilotagem e simplificações nos cálculos analíticos. Quanto às causas de erro associados ao CFD, pode ser mencionada a fraqueza dele para descrever de maneira adequada o arrasto gerado pelos pneus, eventos transientes e simplificações no modelo de turbulência usado. Também podem ser considerados possíveis causas de erro as variações ambientais, as vibrações e outros parâmetros da pista.

Trabalhos futuros

- ❑ Estratégias na asa dianteira, bico e *cockpit* para a diminuição de arrasto.
- ❑ Otimização dos cortes horizontais nos *endplates* da asa traseira.
- ❑ Aumento da vorticidade através de um *footplate* com efeito cadeia.
- ❑ Estudo detalhado da influencia da fixação da asa traseira e otimização do seu posicionamento.
- ❑ Verificação dos dados através de um modelo em escala em um túnel de vento.
- ❑ Otimização do assoalho difusor através do estudo detalhado da influencia com o o aerofólio dianteiro.
- ❑ Otimização do assoalho difusor através de um estudo detalhado da sua altura.
- ❑ Otimização do assoalho difusor através de um estudo detalhado dos perfis nos canais.
- ❑ Otimização do assoalho difusor através da implementação de geradores de vórtices na saída dele.
- ❑ Otimização do assoalho difusor através de um estudo detalhado da influencia da variação da altura devida à oscilação da suspensão.

Referências

AHMAD, N.; ABO-SERIE, E.; GAYLARD A.; Mesh Optimization for Grround Vehicle Aerodynamics, **CFD Letters**, 2, 1, 2010.

ANDERSON, D.; EBERHARDT, S.; Understanding Flight, **McGraw-Hill**, 2° edição, 2009.

ANDERSON, J.D.; Computational Fluid Dynamics: the Basics with Applications, **McGraw-Hill**, 1995.

ANDERSON JR, J.D.; Fundamentals of Aerodynamics, **McGraw-Hill**, 3° edição, 2001.

BABINSKY, H.; How the wings work, **Phys. Educ.**, 497, 38, 2003.

BENZING, E.; Wings. Their design and applications to racing cars, **Giorgio Nada Editore**, 2° edição, 1992.

BLAZEK, J.; Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications, **Elsevier**, 2001.

HOUGHTON, E.L.; CARPENTER, P.W.; Aerodynamics for engineering students, **Butterworth-Heinemann**, 5° edition 2003.

JANG, C., et al.; Numerical Investigation of an airfoil with a Gurney flap, **Aircraft Design**, 1, 75 - 88 ,1998.

JAWAD, B. A. et al.; Aerodynamic drag and fuel economy in a Formula SAE racing style vehicle, **SAE Technical papers**, 1, 2001.

KATZ, J.; Aerodynamics of race cars, **Annu. Rev. Fluid. Mech.**, 38, 2006.

KATZ, J.; Investigation of negative lifting surfaces attached to an open-wheel racing car configuration, **SAE Technical Papers**, 850283, 1985.

- KATZ, J; MOREY, F; Aerodynamic of Large-Scale Vortex-Generator in Ground-Effect. **J.Fluids Eng.**, 130, 7, 2008.
- KATZ, J.; Race Car Aerodynamics. Designing for Speed, **Bentley Publishers**, Cambridge, 1995.
- KATZ, J.; PLOTKIN, A.; Low-Speed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods, **McGraw-Hill**, 1991.
- KOIKE, M; NAGAYOSHI, T; HAMAMOTO, N; Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators. **Mitsubishi Motors Technical Review**, 16, 2004.
- KUYA, Y; TAKEDA, K; ZHANG, X; BEETON, S; PANDALEON, T; Flow Separation control on a Race Car Wing With Vortex Generators in Ground Effect. **J. of Fluida Eng.**, 131, 2009.
- LIEBECK, R.H.; Design of subsonic airfoils for high lift, **Journal of Aircraft** 15, 9, 1978.
- McBEATH, S.; Competition car aerodynamics, **Haynes Publishing**, 2º edição, 2011.
- McKAY, N.J.; GOPALARATHNAM, A.; The effect of wing aerodynamics on race vehicle performance. **SAE Motorsports Engineering Conference & Exhibition.**, 2002.
- NIKOLIC, V.; Additional aerodynamic features of Wing-Gurney flap flows, **Journal of Aircraft**, 43, 5, 2006.
- RUHRMANN, A.; ZHANG, X.; Influence of diffuser angle on bluff body in ground effect, **J.Fluids Eng.**, 125, 2, 2003.
- SENIOR, A.; ZHANG, X.; The force and pressure of a diffuser-equipped bluff body in ground effect, **J. Fluids Eng.**, 123, 2001.
- SMITH, N.; **Phys. Teach.**, 451, 10, 1972.
- SMITH, A.M.O.; High-Lift Aerodynamics, **Journal of Aircraft**, 12, 6, 1975.
- SMITH, C; Tune to Win, **Aero Publishers, Inc.**, 1978.
- SOSO, M. D.; WLSO, P.A.; Aerodynamics of a wing in ground effect in generic racing cars wake flows. **Proc. Inst. Mech. Eng. Part D, J. Automob. Eng.**, 220, 1, 2006.
- VASUDHEVAN, D; SHANJAY, E; SUJITH, H; ABHILASH, N; ASWIN, D; KUMAR, S; Studies on Race Car Aerodynamics at Wing in Ground Effect. **Inter. J. of Mech. Aero. Ind. Mechtr. ans Manuf. Eng.** 8,7, 2014.

- WAKABAYASHI, M; KOMURO, K; PEDOUSSAUT, O; OGURI, Y; SUZUKI, T; Improving Vehicle Performance by Aerodynamic Devices in Formula SAE. **SAE Technical papers**, paper number 200971103, 2009.
- WANG, J.J.; LI, Y.C.; CHOI, K.S.; Gurney flap - Lift enhancement, mechanisms and applications, **Progress in Aerospace Science**, 44, 2008.
- WELTNER, K.; A comparison of explanations of aerodynamical lifting force, **Amer. J. Phys.**, 55, 1, 1987.
- WORDLEY, S.; PETTIGREW, J.; SAUNDERS, J.; Aerodynamics for Formula SAE: On-Track Performance Evaluation, **Society of Automotive Engineers**, 1, 2007.
- WORDLEY, S.; SAUNDERS, J.; Aerodynamics for Formula SAE: a numerical, wind tunnel and on-track study, **SAE Technical papers**, paper number 2006010808, 2006.
- WORDLEY, S.; SAUNDERS, J.; Aerodynamics for Formula SAE: Initial Design and performance Prediction. **SAE Technical papers**, paper number 2006010806, 2006.
- WRIGHT, P.W.; The influence of aerodynamics on the design of Formula One racing cars, **Int. J. Veh. Des.** 3, 1982.
- ZERIHAN, J.; ZHANG, X.; Aerodynamics of a single element wing in ground effect, **Journal of Aircraft**, 37, 6 2000.
- ZHANG, X.; ZERIHAN, J.; Aerodynamics of a Double-Element Wing in Ground Effect, **AIAA Journal**, 41, 6, 2003.
- ZHANG, X.; ZERIHAN, J.; Vortices of a Double-Element Wing in Ground Effect, **Journal of Aircraft**, 41, 5, 2004.
- ZHANG, X.; TOET, W.; ZERIHAN, J.; Ground effect aerodynamics of race cars, **Appl. Mech. Rev.**, 59, 2006.

Manufatura, materiais e estrutura

A etapa da manufatura das peças usadas no pacote aerodinâmico requer de especial atenção, pois dela depende grande parte da validação dos dados encontrados nas simulações. Por exemplo, os perfis aerodinâmicos dos aerofólios e dos canais do difusor tem geometrias especiais que precisam se manter acorde com o modelo simulado. Além disso, quando essas peças aerodinâmicas estão agindo, são submetidas a diferentes distribuições de pressões e esforços que podem comprometer a integridade delas. Por isso, os materiais e a estrutura usada, devem garantir a resistência das peças à tração, flexão e ao cisalhamento.

A.1 Manufatura da asa traseira

Decidiu-se usar moldes negativos para os aerofólios maiores, a fim de garantir alta fidelidade na geometria do projeto. O molde negativo permite que a superfície externa de cada asa, a qual ficará exposta na peça final, tenha contato direto com o molde na hora de ser manufaturada, e assim, adquira as propriedades dele. Ou seja, a geometria do molde e o acabamento deste serão transmitidas diretamente à peça final.

Outra vantagem do uso dos moldes negativos é que na manufatura podem ser adicionadas várias camadas do matriz de fibra (de carbono ou vidro), e isso não influi na geometria da peça, pois essa espessura cresce para dentro da peça, mas não para fora. No caso dos canais do difusor, os moldes usados são positivos, já que a superfície relevante é a interna. O material usados para fabricar os moldes foi a madeira MDF e a sua forma final foi dada em um oram manufaturados em uma máquina CNC de quatro eixos na empresa Eikotec, em São José dos Campos (SP). A Figura 105 mostra o resultado final dos moldes depois de serem usinados na máquina CNC, depois de 29 horas de trabalho. Na parte inferior esquerda dessa imagem pode-se ver o molde dos canais laterais do difusor, e na direita dele, o molde da superfície inferior do *mainplane* da asa dianteira, no qual pode-se notar o degrau central. Na parte inferior direita se observa a molde do canal central do difusor.

Figura 105 – Moldes fabricados em MDF e usinados em CNC na empresa Eikotekc.

Cada aerofólio está composto por dois moldes, de maneira que depois de serem laminadas, as duas peças devem ser unidas a través de uma junção na superfície de pressão e no borde de fuga para dar a forma final da asa. A Figura 106 mostra a maneira como a geometria da asa forma-se à partir dos dois moldes.

Figura 106 – Duas metades do molde do *mainplane* do aerofólio dianteiro.

A superfície do molde precisa de um tratamento especial para dar o acabamento adequado, o qual será refletido nas superfícies das peças. Esse acabamento é dado com massa rápida, a qual permite ser lixada facilmente até conseguir uma superfície totalmente lisa. A imagem esquerda na Figura 107, mostra o molde do *flap* superior da asa traseira depois de ser tratado com massa rápida e lixa de varias gramaturas.

Figura 107 – A imagem esquerda mostra o molde em MDF depois de fazer nele um tratamento com massa rápida e dar um lixamento com várias gramaturas ate ficar com acabamento destacado. Na imagem da direita pode-se ver a peça final depois de ser curada e desmoldada.

Materiais usados para laminação

A laminação das peças foi feita com materiais compósitos fornecidos pelas empresas Redelease e Eikotec. O principal material usado como reforço estrutural é a fibra de carbono 200, com trançado sarja, o qual fornece maior resistência à flexão e tração, e também foi usada fibra de vidro 300, com trançado reto. À partir de estudos feitos pela equipe em corpos de prova, foi determinada uma quantidade de duas camadas de fibra de carbono e uma camada de fibra de vidro para cada peça. Além disso, foi usada como matriz polimérica a resina epoxi, a qual se endurece quando é aplicado o catalisador. Depois de ser laminada a peça, use-se um material chamado *peel ply*, o qual permite extrair o excesso de resina e depois ser depositado em um feltro que se coloca em torno à peça. Isto é introduzido em uma sacola plástica, a qual está conectada a uma bomba de vácuo através de uma mangueira. Depois, o ar é puxado dentro da sacola o que aumenta a pressão entre a fibra e o molde e garante a extração do excesso de resina.

Finalmente, o molde e a sacola são colocados dentro de um forno a 80°, o qual ajuda a que a cura e a resistência da peça serão apropriadas. A imagem direita na Figura 107 mostra, a peça final depois de ser desmoldada. Note-se o acabamento superior, devido aos moldes negativos e a um procedimento de laminação adequado.

Estrutura interna e fixações

Apesar que a fibra de carbono apresenta características de dureza, usando pouca massa, precisa-se de uma estrutura interna que diminua a flexão nas peças e distribua os carregamentos de maneira mais uniforme, tal como é feito na indústria aeronáutica. Essa estrutura interna é feita de uma série de nervuras unidas através de uma longarina de fibra de carbono. As fixações também fazem parte importante da estrutura da asa, pois elas devem estar em uma posição adequada para distribuir os esforços, evitando que a peça rompa.

A Figura 108 mostra a distribuição dos esforços e as flexões produzidas na estrutura interna da asa traseira, introduzindo condições de contorno extremas, ou seja, a estrutura foi feita para suportar carregamentos produzidos pelo *downforce* e o arrasto gerados a 200 km/h.

Figura 108 – Análise estrutural da asa traseira, o qual mostra que tem uma flexão máxima de 3 mm na região central do primeiro *flap*, a 200 km/h

Como pode ser visto na Figura 108, a fixação da asa traseira não tem uma forma e posição tradicionais, ou seja, através de barras localizadas embaixo do *mainplane*, mas está posicionada saindo desde a parte superior dele, a fim de não obstruir a região de sucção da asa traseira, tentando diminuir sua influencia na aerodinâmica.

A Figura 109 mostra a manufatura do *endplate* e as fixações, cujas bordas e furos foram feitos em CNC, a fim de garantir o posicionamento alinhado e nivelado dos aerofólios. Embora a fibra de carbono é um material altamente resistente, nos *endplates* precisa-se de maior rigidez a fim de evitar a flexão produzida pela diferença de pressões. Igualmente, nas fixações são necessárias peças com espessura e rigidez superiores, devido a que nelas está concentrada toda a força que o aerofólio transmite para o chassi do veículo. Para fornecer essas características nestas peças, foi usada uma espuma estrutural, fornecida pela empresa alemã Evonik, a qual é implementada atualmente na indústria aeronáutica

e automobilística. Essa espuma aporta alta rigidez e poucas quantidades de massa devido às suas baixas densidades, similares ao isopor. Essa espuma está feita de células fechadas, o que favorece a absorção de resina epoxi só nas superfícies externas dela, evitando o aumento de massa devido ao consumo excessivo de resina.

No caso dos *endplates*, essa espuma foi laminada com duas camadas de fibra de vidro e duas de fibra de carbono em cada face deles. Já nas fixações, foram usadas oito camadas de fibra de carbono de cada lado, já que são as peças de maior responsabilidade estrutural. A Figura 110 mostra a manufatura das nervuras usadas na estrutura interna, nas quais foram usadas quatro camadas de fibra de vidro de cada lado. Nas pontas das asas foram colocadas umas peças em alumínio com o formato do perfil aerodinâmico. A imagem direita da Figura 110, mostra essas peças —cortadas com laser—, nas quais foram colocadas buchas roscadas para que vários parafusos pudessem fixar o aerofólio no *endplate*.

Figura 109 – Na imagem esquerda pode-se ver a manufatura do *endplate* no CNC. A imagem direita mostra uma das fixações da asa traseira depois de ser cortada no CNC.

Figura 110 – A imagem esquerda mostra as nervuras da estrutura de interna sendo cortadas no CNC. A imagem direita mostra as peças em alumínio —cortadas com laser— colocadas nas pontas da asa.

A Figura 111 mostra o uma fotografia onde está sendo posicionada a estrutura interna do *beamwing*, composta pelas nervuras, as pontas das asas em alumínio e a longarina. Na fotografia pode-se ver a superfície inferior do aerofólio, o qual está encostado ainda no molde. Depois desse processo, será posicionada a superfície superior da asa e finalmente será fechada de maneira definitiva. Na Figura 112, pode-se ver uma comparação do modelo CAD da estrutura interna da asa traseira com a montagem final.

Figura 111 – Posicionamento das nervuras, as pontas de alumínio e a longarina no *beamwing*. Esse procedimento deve ser altamente preciso, pois todos os aerofólios da asa traseira devem ter exatamente a mesma medida da envergadura, para que o *endplate* fique posicionado de maneira correta.

Figura 112 – A imagem esquerda mostra a estrutura interna e fixações no modelo em CAD, e a imagem direita mostra a montagem final da estrutura interna, fixações e *endplates* da asa traseira.

A.2 Manufatura da asa dianteira e do difusor

Asa dianteira

Os aerofólios de menor tamanho da asa dianteira foram manufaturados com moldes positivos. Ou seja, dentro desses aerofólios não foi colocada uma estrutura interna, mas foi utilizada a espuma estrutural usada nos *endplates* e fixações da asa traseira. Uma vez que essa espuma fornece grande rigidez nas peças, só foi necessário laminar esses aerofólios com uma camada de fibra de carbono, dando como resultado um aerofólio resistente e leve. A imagem da esquerda da Figura 113, mostra os núcleos em espuma estrutural dos aerofólios da asa dianteira, os quais foram usinados em CNC para garantir uma geometria fiel aos modelos.

Dessa maneira, unicamente o *mainplane* da asa dianteira foi manufaturado usando moldes negativos de madeira e portanto tem uma estrutura interna que também suporta as fixações. Um esquema dessa estrutura interna na asa dianteira pode ser vista na imagem direita da Figura 113.

Figura 113 – A imagem esquerda mostra a os núcleos dos aerofólios de menor tamanho feitos em espuma estrutural e usinados em CNC. A imagem direita mostra a estrutura interna e fixações da asa dianteira.

Assoalho difusor

A espuma estrutural também foi usada para dar rigidez nas partes planas do assoalho difusor, pois sua grande área faz com que ela tenda a fletir. A manufatura dele foi realizada em três partes, sendo cada uma dessas partes um dos canais. Finalmente, os três canais foram colados lateralmente, dando forma final à peça. A imagem superior da Figura 114 mostra uma imagem superior do difusor, enquanto que a imagem inferior mostra uma vista inferior dele, a qual tem um acabamento destacado, devido a que o fluxo percorre essa superfície. Na manufatura do assoalho difusor, foram usadas duas camadas de fibra de vidro e duas camadas de fibra de carbono.

Finalmente, a Figura 115 mostra o momento em que o E13 saiu da oficina da equipe pela primeira vez, o dia 2 de junho de 2015.

Figura 114 – Assoalho difusor do veículo. Note-se os defletores e geradores de vórtices na imagem inferior.

Figura 115 – O E13 saindo pela primeira vez da oficina da equipe EESC-USP Fórmula SAE.