

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E FABRICAÇÃO DO AEROFÓLIO TRASEIRO DE UM CARRO DE COMPETIÇÃO
EM MATERIAL COMPÓSITO

por

Pedro Arthur Grizotti Fetter

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da
Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2018

PROJETO E FABRICAÇÃO DO AEROFÓLIO TRASEIRO DE UM CARRO DE COMPETIÇÃO
EM MATERIAL COMPÓSITO

por

Pedro Arthur Grizotti Fetter

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 11 de junho de 2018.

Aos meus pais, Fernando e Marisa, por todo o amor, compreensão e suporte.

Ao meu orientador, Professor Rogério “Rato” Marczak, por todos os ensinamentos e pelo apoio imensurável oferecido ao longo deste trabalho.

Aos meus parceiros Evandro, Flávio e Felipe, por construírem a Sigma a cada dia.

Aos pilotos, Felipe e Jindra, que tornaram todo este projeto possível.

Aos meus amigos e familiares.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

FETTER, P. A. G. **Projeto e fabricação do aerofólio traseiro de um carro de competição em material compósito**. 2018. 15 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Nas últimas décadas o automobilismo de competição tem sido dominado pelas constantes evoluções aerodinâmicas que proporcionam carros cada vez mais rápidos e capazes de maiores acelerações. Isso se dá graças ao aumento da sustentação negativa aliado à redução do arrasto aerodinâmico. O elemento aerodinâmico mais importante em um carro de corridas atualmente é a sua asa, ou aerofólio traseiro. Sendo um componente sujeito a grandes carregamentos e posicionado em grande altura em relação ao centro de massa do veículo, uma asa leve e bem dimensionada pode proporcionar grandes ganhos em desempenho. O uso de materiais compósitos, como fibras de vidro impregnadas com resina epóxi, tem sido a solução mais utilizada para este tipo de componente estrutural, e exige técnicas de dimensionamento diferentes das usadas para materiais isotrópicos. Este trabalho detalha o dimensionamento, construção e testes de um aerofólio traseiro para o protótipo Sigma P1, conforme projeto aerodinâmico prévio. A estrutura da asa foi dimensionada por métodos analíticos e sua construção e testes iniciais apresentaram ótimos resultados, cumprindo com sucesso os objetivos do trabalho. A ocorrência de uma falha não relacionada ao dimensionamento é também documentada e validada por métodos numéricos.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais compósitos, aerofólio traseiro, automobilismo de competição.

FETTER, P. A. G. **Design and manufacturing of a composite material race car rear wing.** 2018. 15 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

During the last decades, auto racing has been dominated by constant aerodynamic evolutions, resulting in cars that are faster and capable of higher accelerations. This can be traced to increasingly higher levels of aerodynamic downforce and gradually lower aerodynamic drag. The most important aerodynamic element in a race car nowadays is its rear wing. Being subjected to high loads and positioned high above the cars' center of mass, a light and well sized rear wing can proportionate important performance improvements. The usage of composite materials, like fiberglass reinforced epoxy plastics, has been the most common solution for this kind of structural element, demanding different analysis techniques than those used for isotropic materials. This graduation thesis details the design, construction and testing of a rear wing for the Sigma P1 sport prototype, according to previous aerodynamic studies. The wing's structure was dimensioned by analytical methods and its construction and initial testing presented great results, achieving the projected objectives. The occurrence of a failure not related to the design process is also shown and validated by numerical analysis.

KEYWORDS: Composite materials, race car rear wing, motorsports.

INDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. O PROTÓTIPO SIGMA P1	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1. Aerodinâmica no automobilismo de competição.....	3
3.2. Regulamento do Campeonato Brasileiro de Endurance	4
3.3. Materiais compósitos.....	4
3.3.1. Anisotropia	4
3.3.2. Critérios de falha	5
3.3.3. Estruturas em sanduíche	5
4. DESENVOLVIMENTO DO AEROFÓLIO	6
4.1. Carregamento aerodinâmico	6
4.2. Materiais utilizados e suas propriedades	6
4.3. Dimensionamento	7
4.4. Construção da asa	8
4.4.1. Núcleo de poliestireno expandido	9
4.4.2. Insertos estruturais e <i>dry micro</i>	9
4.4.3. Laminação por impregnação remota	10
4.5. Acabamento	10
5. TESTES DO PROTÓTIPO.....	11
5.1. Primeiro evento oficial	11
5.2. Falha estrutural	12
5.2.1. Investigação	12
6. VALIDAÇÃO NUMÉRICA DO MODO DE FALHA	13
7. CONTINUAÇÃO E NOVA ESTRUTURA TRASEIRA DO PROTÓTIPO.....	14
8. CONCLUSÕES.....	14
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15

1. INTRODUÇÃO

A influência da aerodinâmica em automobilismo de competição é crescente desde as origens das modalidades esportivas de alta velocidade. O arrasto aerodinâmico é o principal componente limitante da velocidade máxima dos veículos, enquanto o uso de elementos aerodinâmicos que geram sustentação negativa tornou possível o aumento expressivo nas acelerações laterais máximas possíveis durante o contorno de curvas. Destes elementos, o aparato mais notável e normalmente mais importante é o aerofólio traseiro (Katz, 1995).

Em um veículo de competição o aerofólio traseiro é o principal responsável por trazer o centro de sustentação negativa mais para perto do eixo traseiro, tornando o carro mais estável no contorno de curvas. Isso torna a asa traseira também um componente de segurança extremamente importante, pois uma falha precedente a uma curva de alta velocidade pode levar à súbita perda de controle do veículo.

Ao mesmo tempo, por ser um componente montado extremamente alto em relação ao restante do carro, sua massa tem grande influência na altura do centro de gravidade, e consequentemente nas características dinâmicas do veículo. Estando afastado do chassi, seus longos suportes também são dimensionados conforme seu momento de inércia em curvas, portanto uma asa mais leve pode trazer ganhos expressivos ao desempenho do carro.

Desde a década de 1980 a solução mais usual para os aerofólios traseiros é a sua fabricação com materiais compósitos, especialmente fibras de vidro ou carbono com matriz de resina epóxi. Estes materiais, com propriedades muito diferentes as dos materiais metálicos mais utilizados no passado, exigem técnicas adequadas para seu dimensionamento.

O objetivo deste trabalho é dimensionar, construir e testar o elemento principal do aerofólio traseiro do veículo de competição Sigma P1, fabricado em material compósito, conforme os carregamentos previamente calculados por fluidodinâmica computacional (CFD) e os métodos de fabricação disponíveis.

2. O PROTÓTIPO SIGMA P1

O protótipo P1 (Figura 2.1) é desenvolvido pela empresa Sigma Kart Ltda., voltado para o mercado de corridas de longa duração, como as 500 Milhas de Londrina e as 12 Horas de Tarumã. Este tipo de prova impõe certas exigências que não são comuns em outras formas de corridas, como um grande tanque de combustível, capacidade de reabastecimento rápido, facilidade para trocas de pneus e manutenção em geral, e rápida adaptabilidade do carro a diferentes pilotos. Estas categorias diferem um protótipo de *endurance* de um carro voltado para corridas contra o relógio (*time-attack*), subida de montanha (*hillclimb*) ou força livre, mesmo que sejam externamente similares.



Figura 2.1 - Imagem de divulgação do protótipo Sigma P1.

Mais especificamente, o Sigma P1 foi desenvolvido para o mercado nacional deste tipo de competição, onde os orçamentos das equipes são bastante limitados quando comparados às competições europeias ou mundiais. Isso se reflete nos métodos construtivos e materiais empregados, começando pelo chassi tubular em liga de aço cromo-molibdênio (e não monocoque ou semi-monocoque), passando pelas carenagens em compósito de fibras de vidro (e não fibras de carbono) e incluindo o trem de força de preparação nacional.

Considerando as características das pistas para as quais o carro foi projetado, os possíveis trens de força disponíveis e as margens de segurança aceitáveis, a velocidade nominal máxima para o carro é de 252 km/h (70 m/s). Esta velocidade raramente deve ser atingida em condições normais de uso, sendo possível apenas em configuração de baixo arrasto, potencia temporariamente elevada (como é comum em treinos classificatórios, por exemplo) e em pistas com retas extremamente longas.

O projeto aerodinâmico do carro iniciou-se durante a execução da monografia de diplomação de Flávio Luçardo Duarte, denominada “Análise das Forças Aerodinâmicas Sobre um Veículo de Competição Empregando CFD”. O projeto foi refinado conforme o restante do projeto mecânico do carro e chegou a uma versão final executiva entre 2016 e 2017. A figura 2.2 ilustra a evolução do período.

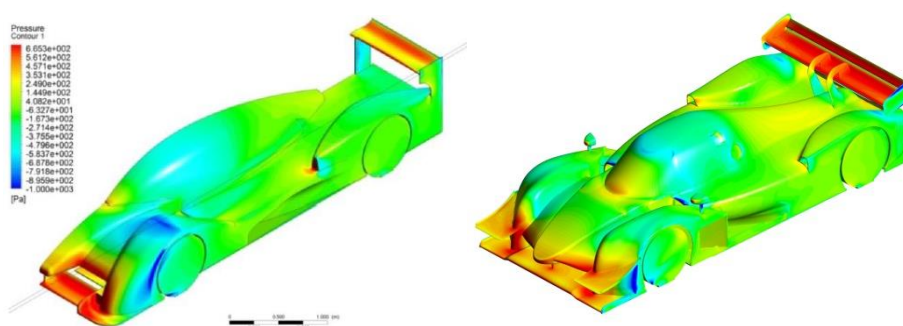


Figura 2.2 - Evolução do projeto aerodinâmico do Sigma P1; à esquerda imagem apresentada em 2015 (Duarte, 2015), à direita versão final de 2017.

Neste período foram definidas as formas dos componentes aerodinâmicos, métodos de fixação e componentes auxiliares, como os *endplates* nas pontas do aerofólio traseiro. O suporte da asa é do tipo “*swan neck*”, ou pescoço-de-cisne, chamado desta forma por seu formato curvo. A asa é, neste caso, suspensa sob o suporte, e não apoiada por baixo. A vantagem deste tipo de suporte é permitir que a superfície inferior da asa tenha um escoamento mais limpo, retardando o descolamento da camada limite nas proximidades dos suportes. Este tipo de montante oferece ganhos de até 15% em sustentação negativa para o mesmo arrasto, quando comparado aos tradicionais suportes inferiores (Fuller, 2012).

A análise dos perfis de asa disponíveis e suas interações com o restante do carro sob diversas condições de uso foi desenvolvida pela empresa neste período e seu detalhamento foge do escopo deste projeto estrutural.

O perfil de asa selecionado é um perfil comercial de super alta sustentação, composto por dois elementos, sendo um elemento principal maior e um elemento secundário de menor dimensão, também chamado de *flap*. Nas extremidades são montadas placas planas chamadas de *endplates*. As dimensões gerais e uma vista de detalhe do perfil principal são mostradas na Figura 2.3.

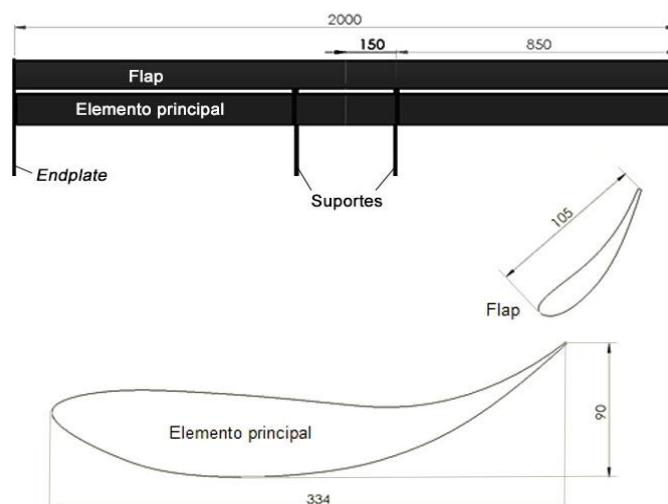


Figura 2.3 - Dimensões gerais do aerofólio e vista em detalhe do perfil aerodinâmico dos dois elementos selecionados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Aerodinâmica no automobilismo de competição

Em um carro de corridas, todas as acelerações relevantes (aceleração, frenagem e contorno de curvas) são criadas no contato entre o pneu e a pista. Estas forças de atrito são fortemente afetadas pela força vertical aplicada nos pneus e são limitadas pelo máximo coeficiente de atrito, a partir do qual o carro irá deslizar. Se pudermos aumentar a força normal sobre o pneu, pressionando-o contra o asfalto, a força de atrito máxima será aumentada e maiores acelerações serão possíveis. Aumentar a força-peso pode aumentar a força de atrito, mas a massa maior afetará igualmente a força necessária para acelerar o veículo. Sustentação aerodinâmica negativa, porém, aumenta a força normal sobre os pneus sem aumentar diretamente a massa do carro (Katz, 1995).

Desde os primórdios do esporte motorizado houve o gradual desenvolvimento de motores, pneus e suspensão, levando a avanços praticamente lineares no desempenho dos carros, ano após ano, como pode ser observado no gráfico da figura 3.1. No final da década de 1960, porém, houve uma variação expressiva no ângulo da curva, o que pode ser grandemente atribuído aos experimentos aerodinâmicos desta época, especialmente com asas dianteiras e traseiras (Katz, 1995).

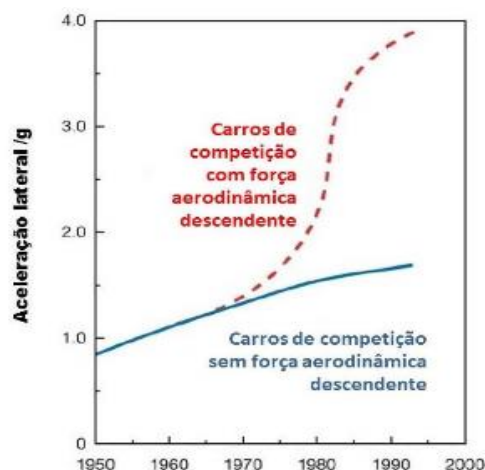


Figura 3.1 - Evolução da aceleração lateral máxima em carros de competição. Adaptado de Katz, 1995.

A quantidade de energia disponível para os elementos aerodinâmicos aumenta com o quadrado da velocidade do veículo e linearmente com a densidade do ar (Milliken, 1995).

3.2. Regulamento do Campeonato Brasileiro de *Endurance*

O regulamento técnico-desportivo do Campeonato Brasileiro de *Endurance* não impõe qualquer tipo de limite quanto à quantidade e dimensões dos elementos aerodinâmicos para protótipos da categoria GP1 (FGA, 2018), na qual o Sigma P1 irá competir. Havia, em 2016, uma limitação para as máximas dimensões do perfil aerodinâmico da asa traseira; este limite foi removido a partir de 2017.

3.3. Materiais compósitos

Materiais compósitos, como o termo indica, são formados pela união heterogênea de materiais com diferentes propriedades. Estes tipos de materiais apresentam inúmeras vantagens técnicas quando utilizados adequadamente, oferecendo propriedades estruturais que não são possíveis com materiais isotrópicos tradicionais. Podem ser classificados entre materiais reforçados com partículas e materiais reforçados com fibras. Ainda, nos materiais reforçados com fibras, as fibras podem ser contínuas (alinhadas) ou descontínuas.

Dois vantagens evidentes de materiais compósitos reforçados por fibras alinhadas sobre materiais de aplicação mecânica comuns, como ligas metálicas, são os altos valores de resistência específica e módulo específico. Isto significa que estes materiais têm alta resistência e alto módulo em relação à densidade do material. São, portanto, materiais fortes e rígidos enquanto leves (Choo, 1990). Estas características são extremamente valiosas nos setores aeronáutico e aeroespacial, assim como no automobilismo de competição.

As fibras, porém, tem custo elevado em relação a ligas metálicas, e a manufatura de componentes em materiais compósitos é cara, lenta e exige mão-de-obra qualificada e intensiva. A dificuldade para se automatizar os processos de laminação é um dos principais fatores que limitam maior uso destes materiais na indústria (Choo, 1990).

3.3.1. Anisotropia

Diferentemente de materiais metálicos comuns, as propriedades mecânicas dos materiais compósitos reforçados com fibras contínuas dependem da orientação escolhida, ou seja, são materiais anisotrópicos (sem isotropia). Isso exige que a lei de Hooke, que relaciona as tensões às deformações, seja expressa em sua forma mais geral (Equação 3.1), sem as simplificações por simetria aplicadas nos casos de materiais isotrópicos (Jones, 1999).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

A matriz \underline{C} representa a rigidez do material e os demais tensores são definidos conforme apresentado na Figura 3.2. Materiais com propriedades simétricas podem ser

avaliados por formas simplificadas da lei de Hooke, como materiais ortotrópicos ou transversalmente isotrópicos (Jones, 1999).

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\delta u}{\delta x} & \varepsilon_2 &= \frac{\delta v}{\delta y} & \varepsilon_3 &= \frac{\delta w}{\delta z} \\ \gamma_{23} &= \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} & \gamma_{31} &= \frac{\delta w}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta z} & \gamma_{12} &= \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x}\end{aligned}$$

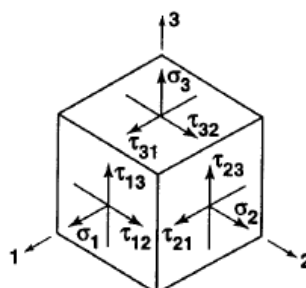


Figura 3.2 - Tensões em um elemento (adaptado de Jones, 1999).

3.3.2. Critérios de falha

Para o dimensionamento de estruturas em materiais com propriedades anisotrópicas, diferentes critérios são propostos, desde o simples critério de máxima tensão até métodos iterativos mais complexos, como os de Tsai-Wu, que adicionam mais termos visando maior representatividade de dados experimentais (Jones, 1999). Neste trabalho usaremos apenas o critério da máxima tensão, onde se avalia a resistência em cada um dos eixos principais do material. Considera-se que as tensões normais devam estar entre as resistências máximas de tração e compressão, e que tensões cisalhantes sejam menores em módulo à resistência ao cisalhamento do material.

3.3.3. Estruturas em sanduíche

Estruturas em sanduíche ocupam uma grande proporção das aplicações de materiais compósitos. Elas resultam da união – ou colagem – de duas finas cascas de material resistente a um núcleo de material leve, usado para manter as camadas finas espaçadas entre si. Suas propriedades oferecem baixo peso e super alta rigidez à flexão (Gay, 2003).

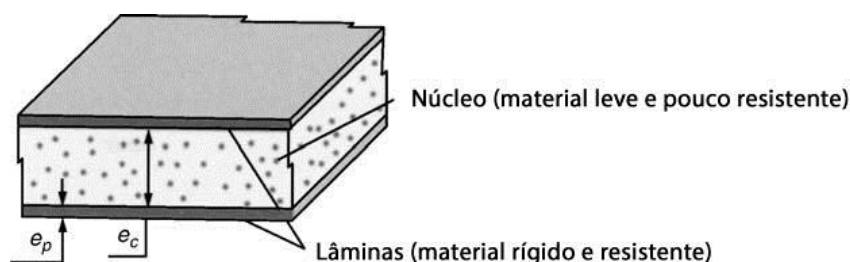


Figura 3.3 – Representação de uma estrutura em sanduíche (adaptado de Gay, 2003).

Em uma estrutura em sanduíche sob flexão, é possível considerar que os esforços normais ocorrem apenas nas laminas, e os esforços de cisalhamento ocorrem apenas no núcleo. As laminas sob compressão estão sujeitas à flambagem ou dobramento (do inglês *buckling*) devido à baixa rigidez do núcleo.

4. DESENVOLVIMENTO DO AEROFÓLIO

4.1. Carregamento aerodinâmico

O carregamento do aerofólio, calculado pela empresa com o uso de CFD (Figura 4.1), inclui a influência do restante do carro no escoamento. A velocidade de projeto é de 70m/s e a asa está ajustada em configuração de máxima sustentação, com o *flap* montado e ângulo de ataque de 6° no elemento principal. Os dados foram fornecidos pela integração das pressões estáticas de dez seções de 100mm de comprimento cada ao longo da semi-asa.

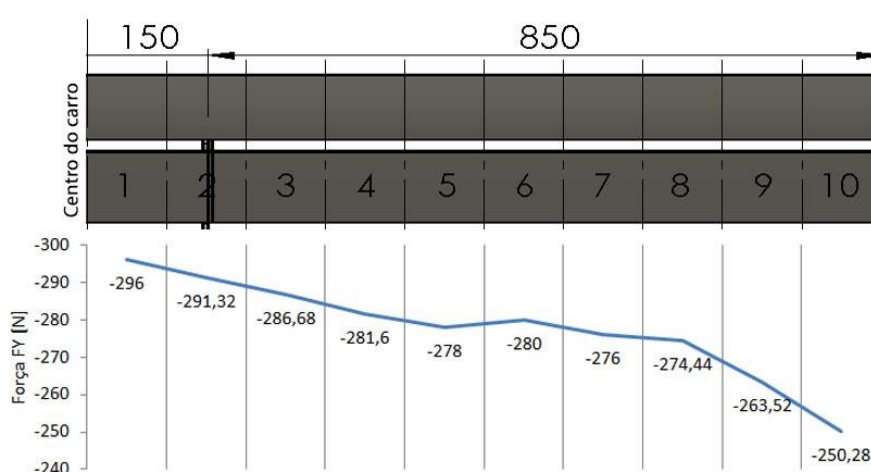


Figura 4.1 - Distribuição do carregamento aerodinâmico dividido em dez seções iguais ao longo do comprimento da semi-asa, com sobreposição da vista traseira da asa.

O carregamento vertical total sobre a asa é de 5555 N (566 kgf). A força de arrasto calculada para a mesma condição é de 955 N (97 kgf).

4.2. Materiais utilizados e suas propriedades

Os materiais utilizados na construção da asa têm suas propriedades apresentadas na Tabela 4.1. O núcleo da asa é fabricado em poliestireno expandido de média densidade, material normalmente utilizado para isolamento térmico na construção civil. Insertos estruturais para a fixação dos suportes e *endplates*, que não serão detalhados neste projeto, serão feitos com alumínio comum e madeira.

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados (Gay, 2003).

Material	Resistência à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Densidade [kg/m ³]
Fibra de vidro tipo E	2000	74	2600
Resina epóxi	130	4,5	1200
Laminado tecido fibra de vidro tipo E + epóxi (0-90°)	1000	35	2000
Poliestireno expandido tipo IV	0,15	0,02	18,0

A asa será laminada com tecido bidirecional de fibras de vidro tipo E, disponível em rolos com até 1,2m de largura, suficientes para cobrir a asa inteira sem necessidade de emendas. Estes tecidos são trançados com fibras nas direções 0 e 90°, e estão disponíveis em diferentes gramaturas (peso por metro quadrado), definidas pela espessura e quantidade de fios por área da trama. Para este projeto usaremos tecidos de 120 e 200 g/m².

Finalmente, a resina a ser utilizada será do tipo epóxi bifásica, com tempo de cura de aproximadamente 24h. Este tipo de resina tem ótimas propriedades de adesão para as fibras, espumas, madeira e metais, podendo ser usada não apenas na laminação final, como também na colagem dos componentes internos.

4.3. Dimensionamento

Considerando-se os procedimentos usuais da indústria local, o dimensionamento da asa decorreu-se da forma descrita a seguir. O ponto chave é, em simples termos, decidir quantas camadas sobrepostas de tecido de fibras de vidro serão necessárias.

Primeiramente, algumas simplificações: considerando a geometria delgada do perfil da asa, e o fato de que as forças de arrasto são muito menores do que as forças de sustentação negativa, apenas o esforço de flexão por sustentação será considerado para cálculo. Os esforços de flexão por arrasto, cisalhamento e torção são naturalmente muito menores neste tipo de estrutura (delgada apenas no sentido de flexão por sustentação). Para o presente estudo estrutural, consideraremos que o elemento principal será o responsável por suportar a totalidade dos carregamentos, ignorando a parcela dos esforços suportada pelo *flap*, transmitidos pelos suportes centrais e *endplates*.

Ainda, uma vez que a asa tem suportes espaçados 0,3 m entre si, considera-se apenas a porção da semi-asa a partir destes pontos, distantes portanto 0,15 m do centro do carro. Para o cálculo estrutural, o ponto do suporte passa a ser o zero do sistema. Dessa forma o carregamento se apresenta na forma da tabela 4.2.

Tabela 4.2: Decomposição do carregamento considerando a posição do suporte.

Distância centróide [m]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
FY [N]	-286,68	-281,6	-278	-280	-276	-274,44	263,52	-250,28

Somando-se os momentos nestes segmentos temos uma força concentrada de 2190 N aplicada em um ponto a uma distância x da origem. O centroide x foi calculado por:

$$x = \frac{\sum FY * x}{\sum FY} = \frac{968 Nm}{2190 N} = 442 mm \quad (4.1)$$

E o momento aplicado sobre a asa em relação à origem (suporte) é dado como:

$$M_y = \sum FY * x = 967740 Nmm \quad (4.2)$$

Em nova simplificação, a asa é considerada uma viga “I” sob flexão pura, permitindo o cálculo para máxima tensão axial na região das fibras conforme o momento fletor interno (Popov, 1978).

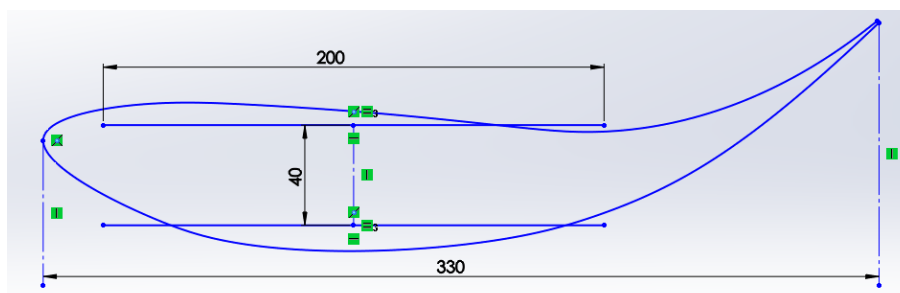


Figura 4.2 - Sobreposição do perfil de asa real e as dimensões propostas para uma viga "I" aproximadamente equivalente.

O momento de inércia desta hipotética viga é calculado levando-se em conta apenas as contribuições da parcela de fibras na direção longitudinal da asa, desprezando-se a resistência do núcleo de poliestireno expandido e da resina que forma a matriz do composto.

$$\sigma_{xx} = \frac{M_y}{I} \quad (4.3)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_y * c}{I_{zz}} \quad (4.4)$$

Sendo o momento interno da viga dado pelas equações:

$$I_{zz} = \Sigma(I_0 + Ad^2) \quad \text{onde } I_0 \simeq 0 \quad (4.5)$$

$$A = l * h \quad (4.6)$$

Sendo a espessura de fibras h a variável de interesse (que nos levará ao número de camadas de tecido), podemos isolá-la a partir das equações 4.4 e 4.5. Considera-se também que c é igual a d neste caso:

$$h_{min} = \frac{M_y}{\sigma_{max} * l * d} \quad (4.7)$$

Considerando-se a tensão de ruptura das fibras de 2000 MPa e que teremos apenas metade da espessura em fibras dispostas na direção longitudinal da asa, temos a espessura mínima h_{min} igual a 0,0605 mm. Sendo a espessura de uma única camada de tecido de 200 g/m² igual a 0,075 mm, e aplicando-se generosa margem de segurança, decide-se pelo uso de duas camadas na mesma orientação. Uma terceira camada de tecido mais fino, com 120 g/m², será aplicada para garantir melhor acabamento superficial, levando o fator de segurança (em espessura) final a aproximadamente 3.2.

4.4. Construção da asa

Existem diversas formas de se fabricar uma asa com materiais compósitos, com diferentes graus de dificuldade e custos associados. As asas de competição fabricadas para categorias de ponta são normalmente fabricadas com fibras de carbono e resinas de alto desempenho, curadas sob alta pressão e alta temperatura em autoclaves industriais, com avançadas técnicas de laminação manual e tecidos pré-impregnados. Estas técnicas, apesar de oferecerem resultados excelentes, são economicamente inviáveis para o mercado de automobilismo de competição nacional. Ocorre ainda indisponibilidade total ou parcial das matérias primas, insumos e infraestrutura necessários localmente para viabilizar tecnicamente construções destes tipos.

Para o desenvolvimento deste protótipo, portanto, foram investigadas quais as técnicas mais utilizadas no mercado regional de peças estruturais em materiais compósitos. Asas de competição fabricadas localmente costumam utilizar reforços tubulares internos de alumínio, com uma “casca” externa em fibras de vidro laminada em moldes separados, com as metades posteriormente unidas por colagem. Esta técnica permite a moldagem a vácuo das duas metades, e ótimo acabamento superficial diretamente do molde. As linhas de colagem entre as metades, porém, são pontos extremamente frágeis. A maior parte do carregamento acaba sendo suportado pela estrutura metálica interna, e o bordo de ataque da asa sofre ruptura com facilidade.

Outra técnica muito utilizada é o uso de um núcleo em espuma para definição do formato da peça, com as fibras sendo manualmente laminadas em torno deste núcleo. Esta técnica é muito utilizada para a fabricação de pranchas de *surf*, oferecendo bom desempenho, baixo custo inicial, porém mais operações de acabamento. Enquanto na manufatura de pranchas usa-se laminação manual, combinaremos as práticas de definição de forma e acabamento das pranchas com outra técnica de laminação, chamada infusão remota (detalhada na seção 4.4.3).

4.4.1. Núcleo de poliestireno expandido

O perfil de poliestireno expandido, utilizado como núcleo do sanduíche, é o componente que define o formato da asa. Para garantia deste formato, o corte dos blocos foi feito em máquina de corte a fio controlada por comando numérico (CNC), em uma empresa especializada no pré-corte de núcleos para pranchas de *surf* e *stand-up paddle*.

A dimensão máxima disponível nos blocos é de 1 metro, portanto foram feitas duas peças de cada perfil para se atingir a largura de asa de 2 metros.

4.4.2. Insertos estruturais e *dry micro*

A etapa seguinte ao corte do núcleo consiste na execução dos alojamentos para os insertos estruturais. Estes insertos, que foram feitos conforme recomendações dadas por profissionais do mercado local de compósitos, visam aumentar a área de transmissão dos esforços dos suportes às superfícies de fibra de vidro. Onde são montados parafusos ou prisioneiros, pequenas peças de alumínio foram inseridas. No centro da asa e nas extremidades também foram colocadas algumas peças em madeira. Todos os insertos foram colados com a mesma resina epóxi usada na laminação.

Após essa etapa, uma camada fina de uma massa pastosa chamada *dry micro* é aplicada a fim de suavizar a superfície rugosa da espuma cortada a fio quente, preparando-a para a laminação. Esta massa, composta por microesferas ocas de sílica e resina epóxi, deve ser idealmente aplicada poucas horas antes da laminação em si, garantindo melhor adesão entre o núcleo e as lâminas.



Figura 4.3 – Insertos estruturais colados ao núcleo antes da aplicação de *dry micro*.

4.4.3. Laminação por impregnação remota

Para a laminação utilizou-se uma técnica chamada impregnação remota, do inglês *remote wetting*, que consiste na impregnação do tecido de fibras de vidro pela resina epóxi ainda fora da peça ou molde.

O tecido é disposto sobre um filme plástico estendido em uma mesa plana de grandes dimensões. A resina é misturada com seu catalisador e é em seguida derramada sobre o tecido. Um novo filme plástico é colocado sobre o tecido com resina, e com o uso de espátulas plásticas a resina é manualmente espalhada. O excesso é removido pelas bordas e ao final é feita uma “raspagem” com as espátulas. Isso garante que o volume de resina aplicado à peça é igual ou pouco superior ao necessário para o preenchimento adequado da matriz, sem excessos que tornariam a asa apenas mais pesada, sem ganhos estruturais.

O filme plástico superior é então delicadamente removido e o tecido é colado ao núcleo de espuma como um tecido pré-impregnado comum. Depois de garantida a adesão do tecido à superfície do núcleo, novamente com o uso de espátulas, o filme plástico inferior é também delicadamente removido. O procedimento é então repetido para cada uma das camadas aplicadas.

Primeiramente são aplicados reforços internos localizados, próximos aos insertos, seguidos da longarina em “C” no centro do perfil. Após secagem “ao toque” destas lâminas, foram aplicadas em sequência as três camadas envolventes do perfil principal, com pequenas sobras nas pontas e no bordo de fuga da asa.

4.5. Acabamento

Após a secagem e cura da superfície laminada, as bordas são cortadas e a peça é inspecionada. A asa recebe então uma camada fina de massa plástica, normalmente utilizada em funilaria automotiva, para preenchimento de pequenas falhas e suavização da superfície. A cada aplicação a asa é cuidadosamente lixada, evitando-se atingir as fibras. Quando o acabamento é considerado satisfatório, a asa é limpa e envelopada com um filme adesivo estético automotivo de alta resistência. Com o adesivo, o peso final da asa é de 4,5 kg.

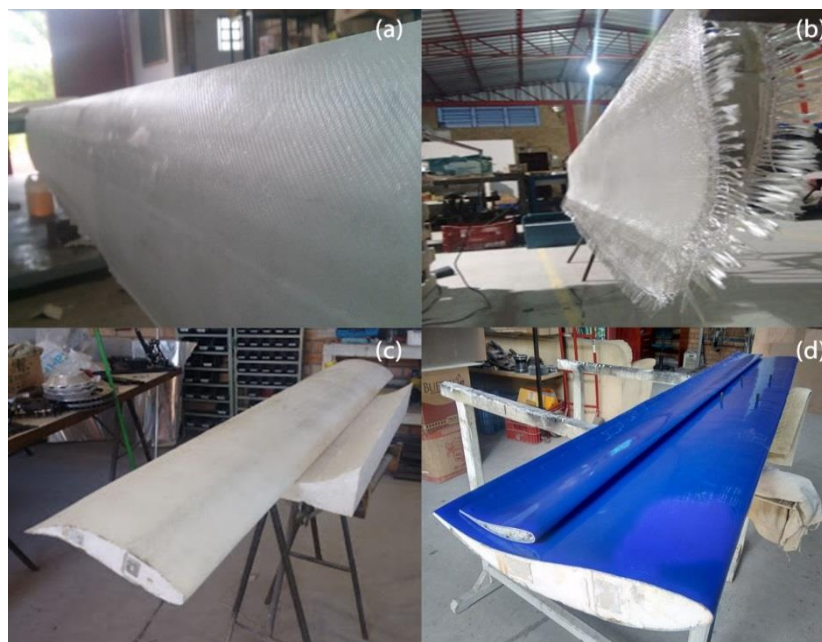


Figura 4.4 - (a) Asa imediatamente após a laminação e (b) durante a secagem. (c) Acabamento superficial com massa plástica e corte das rebarbas. (d) Peça final envelopada com adesivo automotivo.

5. TESTES DO PROTÓTIPO

Uma vez concluída, a asa foi montada no Sigma P1 para seus primeiros testes. Inicialmente utilizou-se uma posição de montagem de baixa sustentação negativa e baixo arrasto, aumentando-se as velocidades e o ângulo de ataque até a posição máxima. Uma câmera foi instalada no teto do carro, voltada para trás, para acompanhar os deslocamentos da asa sob carregamento. A máxima velocidade atingida nos testes foi de 230 km/h. Entre treinos e testes a asa concluiu aproximadamente 250 voltas de uso nominal.



Figura 5.1 - Aerofólio traseiro montado no protótipo e primeiros testes em pista.

5.1. Primeiro evento oficial

Em dezembro de 2017 o protótipo participou de seu primeiro evento oficial, homologado pela Federação Gaúcha de Automobilismo e supervisionado pela Confederação Brasileira de Automobilismo. A “12 Horas de Tarumã” é uma corrida festiva anual cujo regulamento técnico é idêntico ao do Campeonato Brasileiro de *Endurance*. A prova tem largada lançada à meia-noite de sábado e a vitória é dada ao carro que completar o maior número de voltas até o meio dia do domingo. Não tendo participado dos treinos classificatórios, o P1 largou dos boxes e competiu por aproximadamente 4 horas até abandonar por problemas elétricos. Foram completadas 69 voltas rápidas sem indicações de falha ou enfraquecimento no aerofólio.



Figura 5.2 - Participação do Sigma P1 na prova “12 Horas de Tarumã 2017”, equipado com o aerofólio traseiro desenvolvido neste trabalho (foto: Dudu Leal).

5.2. Falha estrutural

Durante novo treino de rotina realizado no Autódromo de Tarumã em maio de 2018, a asa sofreu falha catastrófica inesperada.

Ao completar a sétima volta do treino, na reta principal, em velocidade registrada em *log* de 224km/h, a asa traseira quebrou-se aproximadamente no centro, com as extremidades subitamente caindo até os *endplates* se chocarem e se apoiarem nos para-lamas traseiros. O piloto não percebeu a falha de imediato mas foi capaz de contornar a primeira curva sob controle, sendo imediatamente avisado pela equipe pelo rádio. A falha ocorreu após um total de aproximadamente 300 voltas de uso nominal, conforme registros da equipe. Não houve qualquer sinal ou indicação de falha parcial nas voltas anteriores.

Após o carro retornar ao box, a asa foi desmontada e uma análise prévia indicou a ocorrência de flambagem (*buckling*) do material laminado na face inferior da asa, parte submetida à compressão.



Figura 5.3 - À esquerda, a asa quebrada após desmontagem. À direita, os cortes em uma parte não danificada (acima) e no centro da asa (abaixo).

5.2.1. Investigação

Após desmontagem, a asa que sofreu a falha foi cortada em seções com uma serra fita manual, a fim de se revelar o estado do núcleo sem ocasionar novos danos. Imediatamente constatou-se a presença de uma grande região de vazio no núcleo nas proximidades do ponto de falha. A espuma apresentou claros sinais de degradação térmica, com toda a superfície do vazio indicando derretimento do poliestireno. A causa pôde ser imediatamente relacionada ao tubo de exaustão do motor do protótipo.

O tubo de saída do escapamento, também chamado de *downpipe*, é uma curva de aço inoxidável que leva os gases da saída da turbina até a atmosfera através da superfície do capô traseiro, aproximadamente na linha de centro do carro. A montagem deste tubo na turbina é feita por flanges circulares que se encaixam e são travados em posição por uma abraçadeira metálica do tipo *V-band*. Este tipo de acoplamento permite que os flanges girem livremente entre si até que se faça o travamento com a *V-band*, possibilitando que a saída do escape fique voltada mais para cima ou mais para baixo a cada remontagem.

É impossível determinar se a totalidade do dano térmico no núcleo da asa foi ocasionado a partir da montagem mais recente do escapamento, ou se o dano se deu gradativamente ao longo dos meses de testes que antecederam a falha. A solução, porém, é relativamente simples e consiste na modificação do tubo de escape para que ele seja totalmente direcionado para trás, e não para cima, impedindo o lançamento direto dos gases quentes em direção à superfície inferior do aerofólio.

6. VERIFICAÇÃO NUMÉRICA DO MODO DE FALHA

A fim de se verificar numericamente o modo de falha ocorrido, simulações foram feitas em um software de análise por elementos finitos, o *Ansys 2015*, pela plataforma *Mechanical APDL*. A asa foi simulada a partir do suporte, tendo a seção 850 mm de comprimento. O modelo consiste em uma casca externa de três camadas de tecido de fibras de vidro impregnadas com epóxi, totalizando 0.195mm de espessura, com o núcleo em poliestireno expandido. As propriedades dos materiais estão descritas na tabela 4.1.

A peça foi engastada na face de suporte e o carregamento foi aplicado em seções, distribuído em toda a superfície externa, de forma proporcional ao apresentado na Tabela 4.2, aumentando gradativamente conforme um fator multiplicador até que se atingisse a instabilidade da peça. O modelo numérico contou com uma malha de elementos de casca representando a estrutura de fibra de vidro, e o núcleo de poliestireno expandido foi modelado como um elemento sólido preenchendo a cavidade do perfil. Foi realizada uma análise de grandes deslocamentos (não linearidade geométrica) para levantar a curva de deslocamento conforme a carga até que se observasse instabilidade por ponto limite.

Este procedimento foi executado para dois casos: um com o núcleo de espuma completo e o outro com o núcleo removido, visando extrapolar o derretimento da espuma ocorrido no centro da asa antes da falha.

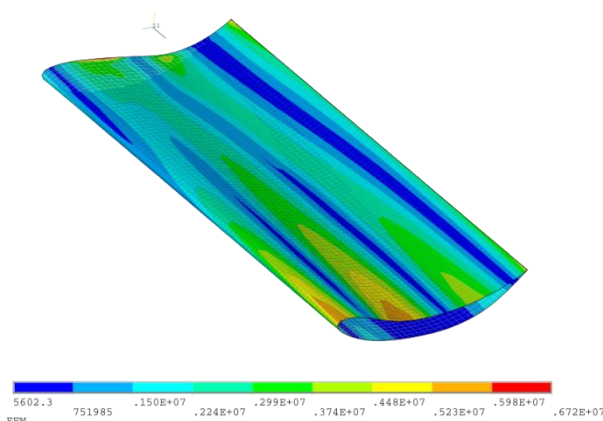


Figura 6.1 – Representação das tensões na superfície da asa sob carregamento, conforme simulado numericamente.

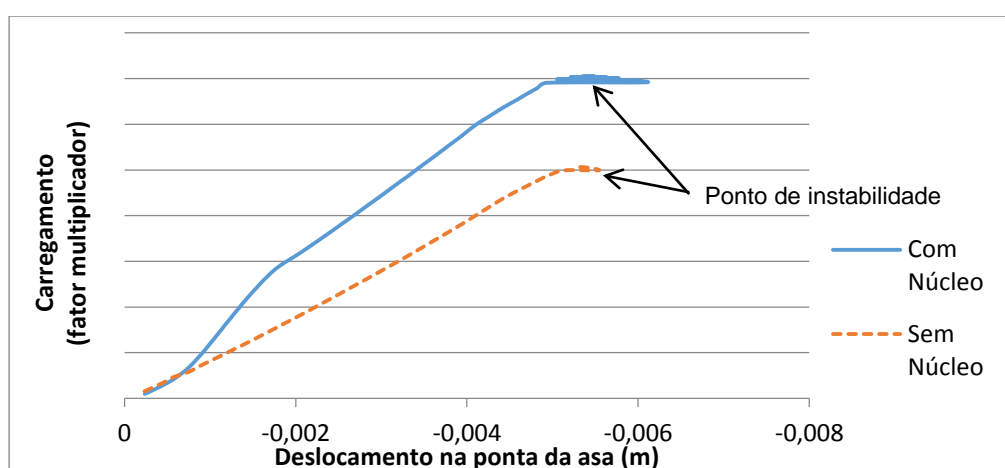


Figura 6.2 – Deslocamento da ponta da asa conforme aumento do carregamento, até o ponto de instabilidade.

A Figura 6.2 ilustra os resultados obtidos na simulação numérica para as duas situações analisadas. Nota-se claramente a influência do núcleo não apenas na rigidez à flexão da asa, mas também no valor da carga limite. O derretimento do núcleo não elimina totalmente o

material, de forma que as curvas da Figura 6.2 representam limites superiores e inferiores. O caso real, portanto, deve se encontrar entre essas duas curvas. Invariavelmente, fica evidente que a remoção do núcleo reduz em cerca de 30% a resistência à flambagem. Soma-se a isso às imperfeições geométricas da peça real, que fazem com que a instabilidade ocorra antes do que estes modelos ideais preveem.

7. CONTINUAÇÃO E NOVA ESTRUTURA TRASEIRA DO PROTÓTIPO

Concluída a investigação e a validação numérica do modo de falha, uma nova asa traseira foi fabricada, idêntica à anterior, e está atualmente em uso no carro, tendo completado até o momento aproximadamente 100 voltas rápidas em condições normais.

Por razões técnicas que fogem do escopo deste projeto, decidiu-se pela construção de uma nova estrutura traseira para o protótipo, agora ligando os *endplates* do aerofólio traseiro ao chassi por meio de uma estrutura treliçada de alumínio, que já é responsável pela fixação do difusor e para-lamas traseiros. O novo projeto é ilustrado na Figura 7.1. O carregamento será então distribuído em quatro suportes, oferecendo maior segurança também em caso de pequenas batidas, comuns em corridas de longa duração. O carregamento principal agora não mais causará flexão pura no elemento principal, diminuindo ainda mais as tensões nos pontos críticos da asa. Isto abre espaço para a revisão do dimensionamento atual, possibilitando novas reduções no peso da asa e da estrutura em conjunto.

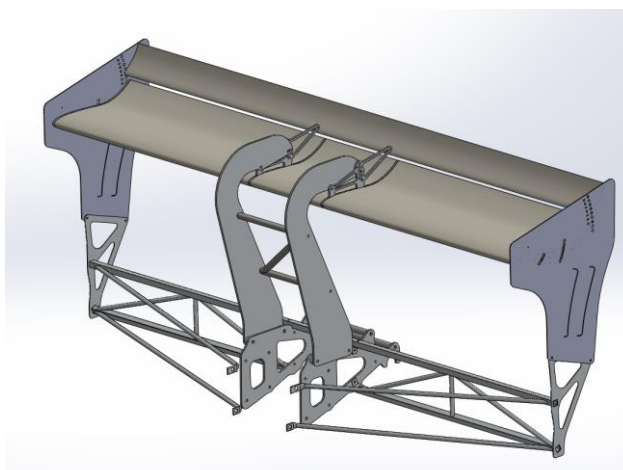


Figura 7.1 – Projeto da nova estrutura traseira do Sigma P1, com o aerofólio estudado.

8. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que o objetivo de se projetar e construir o aerofólio traseiro do protótipo Sigma P1 em materiais compósitos foi cumprido com sucesso. As teorias de Mecânica dos Sólidos para materiais anisotrópicos foram aplicadas de forma analítica e resultaram em uma asa leve, de apenas 4,5 kg, capaz de suportar os carregamentos impostos a velocidades de até 230 km/h. Foram utilizadas técnicas de manufatura diversas adaptadas aos materiais disponíveis no mercado local de compósitos.

Ainda, a ocorrência de uma falha catastrófica em testes foi investigada e relacionada a danos térmicos causados pela exaustão do motor do carro. Uma análise numérica simples foi executada e verificou-se o enfraquecimento causado pelo derretimento do núcleo de espuma.

O dimensionamento foi considerado adequado e uma nova asa, idêntica à anterior, foi fabricada e está atualmente em operação. Novos estudos podem trazer novos ganhos em desempenho considerando-se as modificações recentes na estrutura traseira do carro.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Choo V. K. S.; **“Fundamentals of composite materials”** Knowen Academic, 1990.

Duarte, F. L.; **“Análise das Forças Aerodinamicas Sobre um Veículo de Competição Empregando CFD”**, Monografia de graduação em engenharia mecanica, UFRGS, 2015.

FGA; **“Regulamento Desportivo e Técnico 2018 – Campeonato Gaúcho de Endurance”**, Federação Gaúcha de Automobilismo, Porto Alegre, 2018.

Fuller, M. J.; **“The rise of the swan neck”**, Racecar Engineering, ed. Jan, 2012.

Gay, D., Hoa, S. V., Tsai, S. W.; **“Composite Materials”**, CRC Press, 4ª edição, 2003.

Jones, R. M.; **“Mechanics of composite materials”** Taylor & Francis, 1999.

Katz, J.; **“Race Car Aerodynamics: designing for speed”**, Bentley, 1ª edição, 1995.

Milliken, W. F., Milliken D. L.; **“Race Car Vehicle Dynamics”**, SAE, 1995.

Popov, E. P.; **“Introdução à mecânica dos sólidos”** Blucher, São Paulo, 1978.