

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E
MANUFATURA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**METODOLOGIA PARA FABRICAÇÃO DA CARENAGEM NÃO
ESTRUTURAL DO PROTÓTIPO AUTOMOTIVO ELÉTRICO DA
EQUIPE EESCUDERIA MILEAGE EM FIBRA DE CARBONO
PELO PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO**

ALUNO: Guilherme Capelatto Lahr
ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís Carlos Passarini

São Carlos
2019

GUILHERME CAPELATTO LAHR

**METODOLOGIA PARA FABRICAÇÃO DA CARENAGEM NÃO
ESTRUTURAL DO PROTÓTIPO AUTOMOTIVO ELÉTRICO DA
EQUIPE EESCUDERIA MILEAGE EM FIBRA DE CARBONO
PELO PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Passarini

São Carlos

2019

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.

C953m Capelatto Lahr, Guilherme
Metodologia para fabricação da carenagem não estrutural do protótipo automotivo elétrico da equipe EESCuderia Mileage em fibra de carbono pelo processo de infusão a vácuo / Guilherme Capelatto Lahr; orientador Luís Carlos Passarini. São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

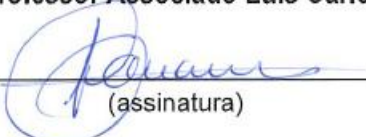
1. peça não estrutural. 2. eficiência energética. 3. polímero reforçado com fibras. 4. infusão a vácuo. 5. manufatura. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Guilherme Capelatto Lahr
Título do TCC: Metodologia para Fabricação da Carenagem Não Estrutural do Protótipo Automotivo Elétrico da Equipe EESCuderia Mileage em Fibra de Carbono pelo Processo de Infusão a Vácuo
Data de defesa: 22/11/2019

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Associado Luís Carlos Passarini (orientador)	<i>Aprovado</i>
Instituição: EESC - SMM	
Professor Doutor Volnei Tita	<i>Aprovado</i>
Instituição: EESC - SAA	
Professor Associado Antônio Carlos Canale	<i>aprovado</i>
Instituição: EESC - SMM	

Presidente da Banca: **Professor Associado Luís Carlos Passarini**


(assinatura)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Luís Carlos Passarini pela orientação neste trabalho e ao longo de três anos nos projetos desenvolvidos dentro da equipe extracurricular EESCuderia Mileage, sempre me ensinando e motivando meu desenvolvimento pessoal.

Às empresas Ephoxal, Texiglass, Redelease, MSC, UPR, CRC Composites e seus proprietários por embarcarem comigo neste desafio e fornecer recursos e conhecimentos essenciais para a realização do projeto.

Aos meus amigos e amigas da equipe EESCuderia Mileage por todo o aprendizado que me proporcionaram, companheirismo nos desafios enfrentados e momentos divertidos que pudemos compartilhar.

Agradeço a minha família, Djalma Lahr Filho, Maria Cristina Capelatto Lahr e Pedro Capelatto Lahr por sempre me apoiarem durante a graduação, me orientar nos momentos difíceis e nas decisões importantes.

A minha namorada Bruna de Castro Zambuzi que sempre esteve comigo em todos os momentos, ajudando a construir meu caráter.

Aos membros da banca por se disponibilizarem a avaliar o presente trabalho.

Ao Professor Marcelo Leite Ribeiro e ao aluno Pedro Wolf por fornecerem o workshop que incentivou a construção da carenagem por infusão a vácuo e por compartilharem os conhecimentos sobre construção de moldes.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura e da Universidade de São Paulo e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram com minha graduação.

RESUMO

LAHR, G. C. **Metodologia para fabricação da carenagem não estrutural do protótipo automotivo elétrico da equipe EESCuderia Mileage em fibra de carbono pelo processo de infusão a vácuo**. 2019. 35p. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

A *Shell Eco Marathon* é uma competição entre equipes universitárias cujo propósito é projetar e construir veículos eficientes em termos de energia. Resistência do ar e peso são dois dos parâmetros que recebem foco nos carros vencedores, por influenciarem diretamente em seus consumos energéticos. Para tornar a equipe EESCuderia Mileage competitiva com seu protótipo veicular elétrico o autor produziu, a partir de um modelo aerodinâmico, uma carenagem não estrutural e de baixa massa, com base nos regulamentos das competições desta categoria. Buscando colocar em prática o aprendizado da sala de aula e desenvolver contato com o atual mercado de trabalho em forma de parcerias com empresas do setor, a peça foi manufaturada em polímero reforçado com fibras de carbono pelo processo de infusão a vácuo, que permite atingir alta rigidez e baixo peso. Para chegar a peça final, o autor também manufaturou o molde para infusão a vácuo, testou o processo, montou o plano de laminação e atuou na confecção da peça final. O resultado obtido foi a carenagem com massa de 2,8kg, com geometria fiel ao modelo aerodinâmico e rigidez adequada para as competições. Bolhas de ar foram encontradas no laminado. Portanto a infusão a vácuo foi o processo adequado para a manufatura da carenagem e a metodologia utilizada permite ser replicada para produção de peças de pequeno, médio e grande porte.

Palavras-chave: peça não estrutural, eficiência energética, polímero reforçado com fibras, infusão a vácuo, manufatura.

ABSTRACT

LAHR, G. C. **Methodology for the fabrication of the non-structural fairing of the EESCuderia Mileage team's automotive electric prototype in carbon fiber by the vacuum infusion process.** 2019. 35p. Monograph (Undergraduate Thesis) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Shell Eco Marathon is a competition between college teams whose purpose is to design and build energy efficient vehicles. Air resistance and weight are two of the parameters that are focused on winning cars because they directly influence their energy consumption. To make the EESCuderia Mileage team competitive with its electric vehicle prototype, the author produced, from an aerodynamic model, a non-structural and low mass streamlined body, based on the competition rules of this category. Seeking to put classroom learning into practice and develop contact with the current market in the form of partnerships with industry companies, the piece was manufactured from carbon fiber reinforced polymer by the vacuum infusion process, which allows it to reach high levels of rigidity and low weight. In order to reach the final piece, the author also manufactured the vacuum infusion mold, tested the process, set up the lamination plan and acted in the final piece fabrication. The result was a streamlined body with 2.8kg mass, with geometry faithful to the aerodynamic model and adequate rigidity for the competitions. Air bubbles were found in the laminate. Therefore the vacuum infusion was the appropriate process for the fairing manufacture and the methodology used allows to be replicated for the production of small, medium and large parts.

Keywords: non-structural piece, energy efficiency, fiber-reinforced polymer, vacuum infusion, manufacture.

Sumário

1 Introdução	9
1.1 A Competição	9
1.2 A Equipe	10
1.3 Objetivos e motivação.....	11
2 Revisão bibliográfica.....	13
2.1 Materiais compósitos.....	13
2.2 Reforços.....	13
2.3 Matriz polimérica	14
2.4 Laminação manual	14
2.5 Infusão a vácuo	15
3 Materiais, Métodos e Resultados	16
3.1 Design.....	16
3.2 Molde	17
3.2.1 Pré-molde (PM)	18
3.2.2 Laminação manual do Molde.....	20
3.3 Infusão a Vácuo	22
3.3.1 Testes de infusão a Vácuo e Corpos de Prova.....	23
3.3.2 Testes de Rigidez no CP.....	27
3.3.3 Manufatura da carenagem.....	28
4. Resultados	32
5. Conclusão	34
6. Referências.....	36

1 Introdução

1.1 A Competição

Com o intuito de estimular a criatividade dos estudantes e os fazerem colocar em prática os conceitos aprendidos nas universidades, as maratonas de eficiência energética movem estudantes do mundo todo, unindo-os em equipes organizadas para criação de protótipos veiculares de alta eficiência energética. O funcionamento da competição gira em torno de medir o consumo energético de cada protótipo em função de sua distância percorrida. Os vencedores são nomeados obtendo-se o menor consumo em cada categoria, dividida pelo tipo de motor: elétrico, etanol e gasolina.

Os parâmetros de eficiência mais explorados para produção dos protótipos são aerodinâmica, peso do carro, controle no fornecimento de energia para os motores e demais atritos. Os carros vencedores das competições possuem *design* elaborados e contam com peças leves, sendo estes constantes desafios para os estudantes.



Figura 1: Protótipo elétrico da Universidade de Joanesburgo (Retirado do site da *Shell Eco Marathon*)

Cada maratona possui seu próprio regulamento, com uma lista de regras e exigências muito bem detalhadas para satisfazer um elevado nível de

segurança e criar uma condição mínima afim de equalizar o nível dos automóveis participantes. O carro deve comportar um(a) motorista com mínimo de 50kg de massa e atingir uma média mínima de velocidade de 25km/h, estipulada pelas organizações dos eventos.

Os principais eventos da categoria “Eficiência Energética” que acontecem no Brasil são a *Shell Eco Marathon Brasil (SEM)* e a *Maratona Universitária de Eficiência Energética (MUEE)*. Nesta última, a EESCuderia Mileage é dona do recorde na categoria carros elétricos, conquistado em 2013, fazendo uma marca de 533km/kWh.

1.2 A Equipe

O trabalho motivou-se no grupo extracurricular de desenvolvimentos automobilísticos EESCuderia Mileage. Fundada em 2006, a equipe é formada por alunos da Universidade de São Paulo, Campus São Carlos, de diversos cursos como Engenharias, Ciências da Computação, Arquitetura e Urbanismo e outros.

Coordenada pelo Professor Doutor Luís Carlos Passarini, o principal foco é projetar e confeccionar protótipos veiculares movidos a motores elétrico e combustão interna para competir nas maratonas de eficiência energética. Os valores que constituem a identidade dos membros e fornecem as diretrizes para os trabalhos são resumidos em forma de tripé: sustentabilidade, proatividade e eficiência.

Quando se faz necessária a busca por conhecimento para elaboração dos projetos, focam-se os esforços em contatar empresas e profissionais atuantes no setor. Esta linha de ação faz com que o aluno inicie sua inserção no mercado de trabalho. Em 2016 e 2017 concebeu-se um novo projeto: o Venturo.

A estrutura organizacional da equipe EESCuderia Mileage apresenta uma divisão com seis principais seções, que são:

- Marketing e RH: responsável pela captação de recursos para construção do automóvel, visibilidade da equipe no Campus da USP e cidade de São Carlos e pela gestão das pessoas envolvidas nos projetos.

- Powertrain: responsável por aumentar a eficiência dos motores elétrico e a combustão desenvolvendo e programando controladores, telemetria e injeção eletrônica. É o “coração do carro”.
- Esterço e Frenagem: responsável por projetar e manufaturar sistema de direção que gere o mínimo de atrito possível entre os pneus e o asfalto, que tenha um sistema de freio que responda com a exigência de segurança de cada competição.
- Estruturas: responsável pelo projeto do chassis do automóvel e toda peça que sofra solicitação mecânica, sempre com foco em melhorar a eficiência energética do carro.
- Aerodinâmica: responsável pelo projeto da carenagem não estrutural visando reduzir a resistência do ar sobre o veículo.
- Materiais Compósitos: responsável por desenvolver soluções para substituir os materiais metálicos presentes nos projetos estruturais e não estruturais do carro, com finalidade de reduzir peso, gerar reforços e criar peças com geometrias características. Nesta seção se desenvolveu o processo de manufatura da carenagem apresentada neste trabalho.

1.3 Objetivos e motivação

A partir de uma solução conciliatória envolvendo aerodinâmica, estética e a produção da carenagem, esta monografia tem como foco apresentar o processo de produção de uma peça monolítica polimérica reforçada com fibras pelo processo de infusão a vácuo. A meta é fazer com que peças de pequeno, médio e grande porte possam ser confeccionada seguindo as orientações aqui contidas.

Para isso projetou-se um sistema para aplicar a resina epóxi na fibra de carbono com o intuito de obter uma carenagem não estrutural. Essa carenagem é um componente do protótipo veicular elétrico Venturo da equipe EESCuderia Mileage que participa de maratonas de eficiência energética.

Portanto, a finalidade é produzir uma peça que apresente baixo peso e aerodinâmica projetada para reduzir a resistência do ar, assim diminuindo o consumo energético do automóvel.

As principais motivações foram a possibilidade de colocar em prática os conceitos aprendidos e aprofundar os conhecimentos adquiridos na disciplina SMM0308 - Materiais Compósitos e estabelecer parcerias com empresas especializadas, a fim de consolidar o aprendizado nos assuntos envolvidos e que se fez necessário nas diversas etapas de processos. Graças às parcerias, que cederam recursos (materiais, treinamentos e espaços físicos), foi possível viabilizar os trabalhos.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Materiais compósitos

Ao unir dois ou mais materiais com fases distintas em um só corpo, é possível combinar as principais propriedades de cada um deles. O material resultante recebe o nome de compósito (CALLISTER, 2002).

As fases que formam o compósito são normalmente classificadas como aglomerante (matriz) e fase dispersa (reforço) (TITA, 2011). O aglomerante exerce a função de manter a união da fase dispersa e transmitir a carga aplicada sobre a estrutura para os reforços. Estes irão atuar suportando o carregamento.

2.2 Reforços

Os reforços são basicamente classificados em partículas e fibras (TITA, 2011). Reforços particulados podem ser orientados aleatoriamente ou preferencialmente e normalmente utiliza-se fibras como reforço de matrizes poliméricas. As fibras podem ser posicionadas de modo a se obter uma única camada, mais de uma camada ou em uma disposição multiaxial. A Figura 2 apresenta as classificações quanto à disposição dos reforços.

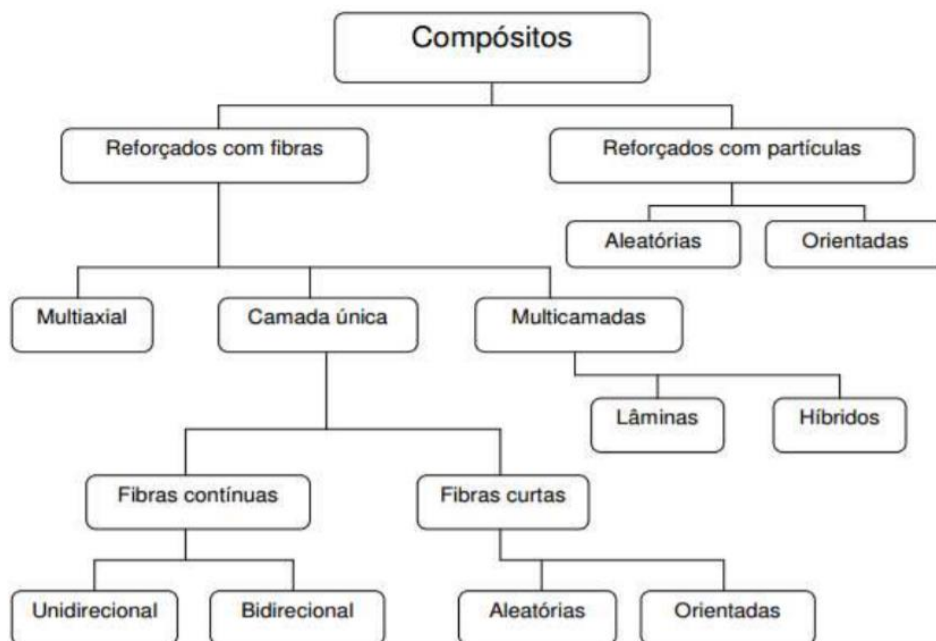


Figura 2: Classificações dos materiais compósitos (Fonte: NETO E PARDINI, 2006)

Apesar de suportar as solicitações mecânicas no material composto, as fibras exibem fragilidade e baixa tenacidade à fratura (TARPANI, 2015). Os reforços mais comuns são as fibras de vidro, carbono e aramida (MARINUCCI, 2011).

2.3 Matriz polimérica

Também chamadas de resinas, são polímeros, monômeros ou mistura de aditivos reativos. Podem ser classificadas como termoplásticas e termofixas. As termoplásticas se fundem com inserção de calor podendo ser conformadas e reprocessadas. Destacam-se: polietileno, polipropileno e poliamidas. As resinas termofixas sofrem processo de cura, o que impede o reprocessamento com o aumento da temperatura. Destacam-se: epóxi, poliéster e fenólica (TITA, 2011)

Além de manter os reforços unidos e posicionados a matriz evita que trincas se propaguem de forma catastrófica e os protege de ambientes agressivos, impactos e abrasão. Define as propriedades elétricas e químicas do material e a aplicação em função da temperatura de trabalho (TARPANI, 2015).

2.4 Laminação manual

A laminação manual, ou *Hand Lay Up*, é o processo mais simples e de menor investimento para fabricação de materiais poliméricos reforçado com fibras. Os equipamentos são simples e facilmente encontrados. É praticada em molde aberto, limpo e com desmoldante previamente aplicado sobre toda a superfície a fim de evitar a adesão do laminado. O desmoldante pode ser a cera de carnaúba ou o álcool polivinílico (COOPMACO, 2014).

Em seguida pode ser feita a aplicação do *gel coat*, uma resina com características específicas. Dependendo de sua composição esta resina pode proporcionar acabamento liso e proteção contra raios ultravioletas e ambientes quimicamente agressivos (MARINUCCI, 2011).

As fibras juntamente com a resina catalisada são assentadas sobre o *gel coat* com o auxílio de pincel ou espátula. Um rolete metálico pode ser utilizado para compactar as camadas de reforço e remover bolhas de ar presentes na

matriz. Este passo se repete até que a espessura desejada seja atingida. Não recomenda-se aplicar mais que três camadas consecutivas devido à alta liberação de calor durante a cura exotérmica da resina, podendo provocar empenamento da peça, queima do *gel coat* e degradação. A cura pode se dar a temperatura ambiente ou em estufa, conforme orientação do fabricante (COOPMACO, 2014).

2.5 Infusão a vácuo

Nasseh (2014) explica que no método de infusão a vácuo todo material é colocado seco dentro do molde e então fechado com uma bolsa de vácuo. Mangueiras são conectadas ao sistema e funcionam como entrada de resina e saída de vácuo. Ao ligar a bomba a diferença de pressão interna e externa faz com que a resina seja transferida para os reforços.

Este método permite produzir laminados mais resistentes comparado ao *Hand Lay Up*, pois chegam a um teor de fibra de 60% enquanto 20% a 30% é atingido pelo processo manual (NASSEH, 2014). Segundo Tita (2011), alterando-se as proporções de reforço e matriz em volume é possível obter rigidez e resistência mecânica comparadas a metais, como mostra a Figura 3.

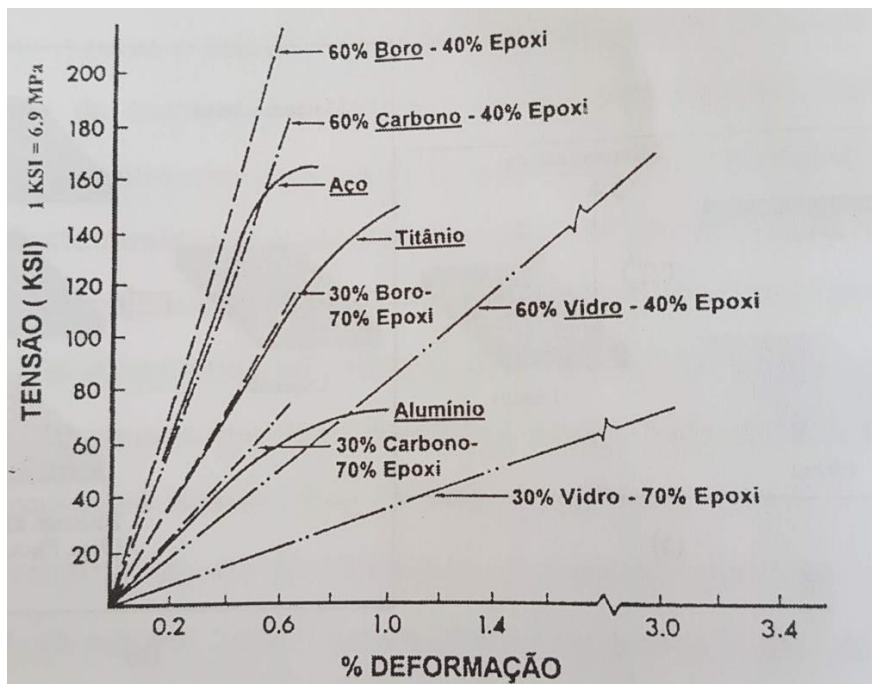


Figura 3: Curvas tensão-deformação para alguns compósitos poliméricos (Fonte: TITA, 2011)

3 Materiais, Métodos e Resultados

3.1 Design

O perfil da carenagem foi todo desenvolvido pelo time de Aerodinâmica. Inicialmente esboçou-se uma ideia voltada para design com o objetivo de expor a forma geométrica primária. Na sequência estudou-se o comportamento aerodinâmico por meio de simulações em *software* CFD, fazendo-se necessárias modificações atingindo-se o perfil ideal para a ideia esboçada

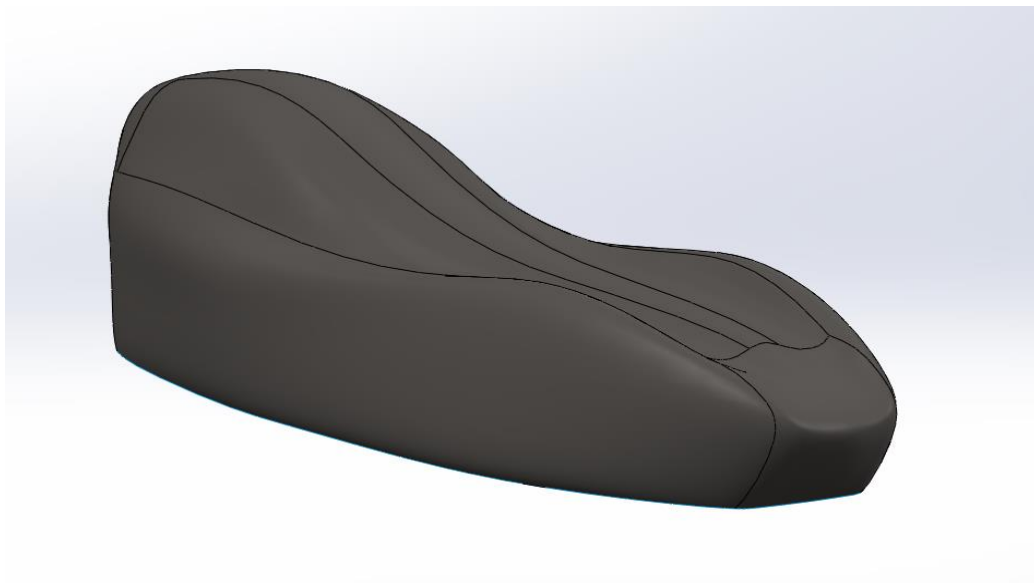


Figura 4: Modelo aerodinâmico da carenagem (Fonte: Autor, 2016)

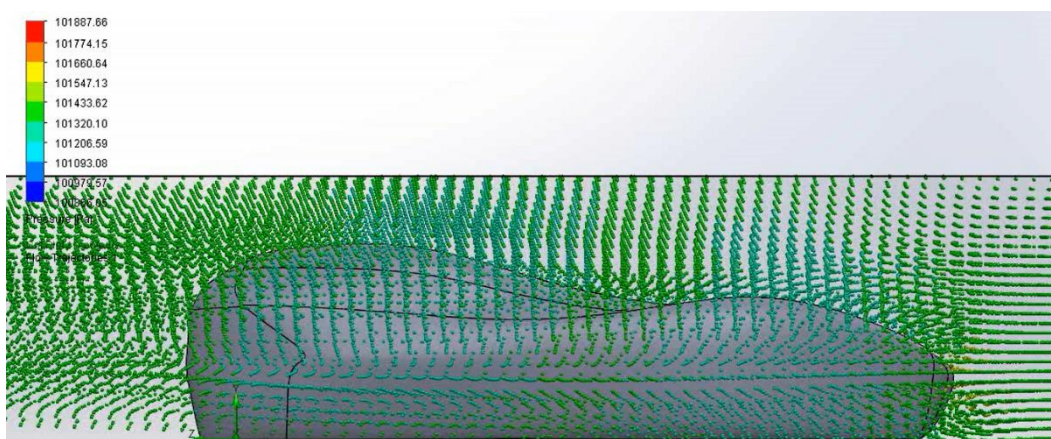


Figura 5: Simulação do Modelo em *software* CFD (Fonte: Autor, 2016)

Posteriormente, em trabalho integrado com a seção de Materiais Compósitos, notou-se que devido à geometria com bordas negativas não seria possível fazer o desmolde da peça final, exigindo-se novas modificações, dessa vez com foco na manufatura da carenagem.

Chegou-se a forma final que atendia tanto aos requisitos de manufatura quanto aerodinâmicos e estéticos do projeto.

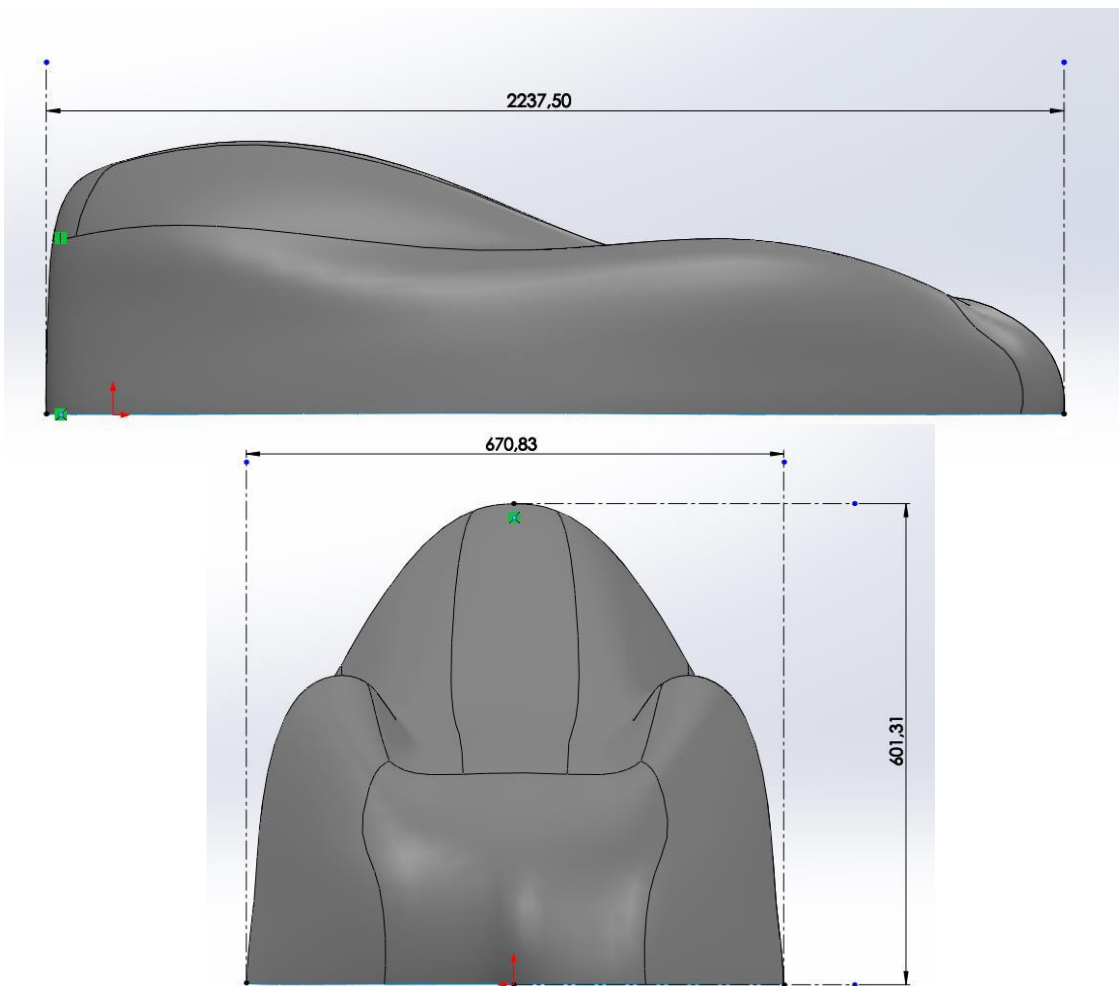


Figura 6: Representações do perfil lateral e frontal escolhido para a carenagem. (Fonte: Autor, 2016)

3.2 Molde

O início de todo o trabalho de manufatura se deu pelo projeto e confecção do molde.

Wolf (2016) conta que para o processo de infusão a vácuo pode-se trabalhar com molde de PRFV de basicamente três tipos (informação verbal)*:

- Molde macho: acabamento interno;
- Molde fêmea: acabamento externo;
- Molde bipartido: acabamento interno e externo, porém com maior complexidade e custo de produção se comparado aos outros dois tipos;

Portanto, selecionou-se o molde fêmea, pois nele os requisitos aerodinâmicos são melhor atendidos quando se produz uma superfície lisa com menor interação física com o ar. A manufatura do molde foi dividida em duas etapas: o pré-molde e a laminação manual do molde.

3.2.1 Pré-molde (PM)

Iniciou-se parceria com a empresa *MSC – Modelação São Carlos*, um centro de usinagem especializado em fabricação de moldes em materiais poliméricos, metálicos e madeira.

Em reunião com o técnico da MSC, Alexandrin (2017) orienta que para obter-se o molde fêmea de PRFV no perfil e tamanho solicitado é necessário a fabricação de um PM em “isopor”. O PM será fraturado para que possa ser desmoldado do PRFV após a laminação. Também se faz necessário o prolongamento na altura do PM pela região das bordas em 25mm para que a peça final tenha uma margem para remoção de rebarbas (informação verbal)†.

Os materiais utilizados na confecção do PM foram:

- Blocos de Poliestireno Expandido (EPS) de 800mm x 700mm x 250mm;
- Massa acrílica;
- Resina epóxi;
- Cera de carnaúba;
- Lixa para madeira granulometria 200;

Uniu-se com cola própria os blocos de EPS afim de originar o volume de trabalho do PM. Com manufatura subtrativa usinou-se todo o volume em

* Informação fornecida por Pedro Wolf em São Carlos, em 2016.

† Informação fornecida por Reginaldo Wagner Alexandrin em São Carlos, em 2017.

fresadora CNC a partir do desenho em CAD e depositou-se uma fina camada de resina epóxi na superfície do EPS. Segundo Alexandrin (2017) esta camada tem o objetivo de proteger o EPS de solventes presentes na resina poliéster (informação verbal)* (que utilizou-se na laminação do molde, que será visto a frente).

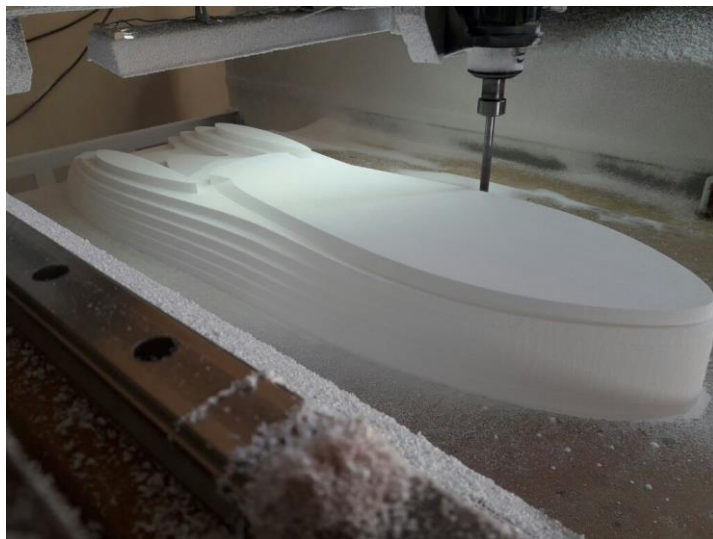


Figura 7: Usinagem do EPS (Fonte: Autor, 2017)

Para obtenção de acabamento o PM recebeu a massa acrílica por toda sua extensão, que foi lixada e encerada pelo autor (Figura 8).



Figura 8: Pré-molde finalizado com 25mm de comprimento a mais em sua base (Fonte: Autor, 2017)

* Informação fornecida por Reginaldo Wagner Alexandrin em São Carlos, em 2017.

3.2.2 Laminação manual do Molde

Com o objetivo de conceber um molde em PRFV por *Hand Lay Up* desenvolveu-se parceria com a empresa *UPR – União Plásticos Reforçados*, especializada em produção de tubos e tanques em material compósito polimérico. Antenor Loterio, proprietário da empresa, cedeu os materiais utilizados (com exceção do PM), espaço físico e equipe especializada, viabilizando a produção do molde final.

Os materiais utilizados foram:

- Pré-molde;
- Resina Poliéster para laminação manual com catalizador MEK;
- Manta de fibra de vidro;
- *Gel Coat* preto para molde;
- Chapa de aço (utilizada como base);
- Espátulas e pincéis;
- Cera de carnaúba;
- Equipamentos de proteção individual (EPIs) (óculos de proteção, máscaras para químicos, luvas e jalecos);

Todo o sistema foi montado sobre a chapa de aço encerada, que realizou a função de base para a laminação. Recobriu-se inteiramente o PM com o *Gel Coat* preto para molde. O recobrimento foi estendido sobre o aço até uma região de 50mm em volta do PM. Na sequência, após 15 minutos de cura parcial do *Gel Coat*, iniciou-se o processo de laminação manual da manta de fibra de vidro com resina poliéster catalisada. Como esperado, o solvente da resina não dissolveu o EPS.

Para receber a infusão a vácuo o molde precisa ser rígido suficiente para não distorcer e afetar o perfil da carenagem e a desmoldagem da peça final. Loterio (2017) informa que laminados de manta de fibra de vidro com aproximadamente 15mm de espessura suportam a pressão de vácuo sem se deformar e que para fixação do *Tacky Tape* no processo de infusão deve-se acrescentar uma aba de 25mm que percorre toda a lateral do molde (informação verbal)*.

* Informação fornecida por Antenor Loterio em Rio Claro, em 2017.

Seguindo-se as orientações concluiu-se a deposição de fibras e resinas sobre o PM. Após aguardar 24 horas para cura total do laminado efetuou-se o desmolde rompendo-se o EPS do PM.



Figura 9: face externa do molde em PRFV (Fonte: Autor 2017)



Figura 10: face interna do molde com demonstração do *gel coat* e abas laterais para fixação do *tacky tape* (Fonte: Autor 2017)

3.3 Infusão a Vácuo

Para desenvolver todo o processo de produção da carenagem iniciou-se contato com o Paulo Camatta. De 2005 a 2017, Paulo foi Gerente Executivo da *ALMACO – Associação Latino - Americana de Materiais Compósitos* e hoje atua com consultoria em sua empresa *CRC Composites*, que tornou-se parceira na orientação deste trabalho.

Utilizou-se os seguintes materiais (Figura 11):

- Resina epóxi e endurecedor, com tempo de trabalho de 20 minutos e cura em 24 horas a temperatura de 25°C, segundo ficha técnica fornecida pela empresa *EpHoxal*. Stubing (2017), proprietário da empresa, reforça o conceito de que para a resina percorrer o laminado é necessário que possua baixa viscosidade (informação verbal)*;
- Tecido bidirecional de fibra de carbono, gramatura 200g/m² (fornecida pela empresa *Texiglass*);
- Mold Cleaner, Selante e Desmoldante (fornecidos pela empresa *Redelease*);
- Peelply, Media Flow, Tacky Tape, bolsa de vácuo, feltro de poliéster e adesivo de contato aerossol (comprados na empresa *MAP*);
- Mangueira transparente reforçada de diâmetro 1/4” – Figura 11.b;
- Estranguladores para mangueira – Figura 11.d;
- Espiroduto de 1/4”;
- Bomba de vácuo de 3/4HP – Figura 11.c;
- Vacuômetro – Figura 11.d;
- Detector de vazamentos;
- Resin Trap (manufaturado em tubos de PVC) – Figura 11.a;
- Chapa de vidro de dimensões 600mm x 800mm;
- Molde da carenagem;
- EPIs;

* Informação fornecida por Hans Peter Stubing em Taboão da Serra, em 2017.



Figura 11: a) Resin trap preso ao pé da bancada. b) Mangueira transparente reforçada. c) Bomba de vácuo. d) Vacuômetro e estranguladores. (Fonte: Autor 2017)

3.3.1 Testes de infusão a Vácuo e Corpos de Prova

Antes de iniciar os testes de infusão, é importante a obediência aos requisitos da carenagem previstos nos regulamentos das competições:

- a) É uma peça de estrutura secundária, não fazendo parte da estrutura principal do carro. Sua função é proteger o piloto de intempéries que possam prejudicar sua performance. A estrutura primária é um chassi tubular em alumínio que suporta todo o peso do sistema e protege o piloto de colisões;
- b) Pelas regras da MUEE, deve suportar uma esfera de massa 5kg sobre sua superfície sem se romper ou se soltar dos pontos de fixação;
- c) Deve ser sólida e impermeável a pequenos objetos (pedregulhos e porcas);
- d) Atender ao projeto aerodinâmico;

Camatta (2017) explica que porque a carenagem não é uma peça de estrutura primária e nem de alta precisão dimensional, pois as pequenas distorções não causarão impacto sobre a aerodinâmica do carro, o Procedimento do Projeto para Estruturas em Compósito Reforçado com Fibras e a Teoria Clássica de Laminados apresentados por Tita (2011) podem ser flexibilizados (informação verbal)*.

Continuando a explicação, a infusão a vácuo é um processo que não aceita correções em caso de erros graves. Para montar o sistema de infusão no interior do molde da carenagem e evitar erros de processo o autor desenvolveu testes iniciais para entender o comportamento dos materiais utilizados, principalmente a permeabilidade dos reforços, a fluidez da resina de baixa viscosidade e a rigidez dos Corpos de Prova (CPs) produzidos. Permite-se assim estimar o tempo de infusão completa na peça final. Isto será explicado mais à frente.

Montou-se um sistema de bancada (RIBEIRO; WOLF, 2016) para produção de três CPs. A chapa de vidro serviu de base, ou molde, para a montagem. Fez-se a limpeza e selagem da face superior e depositou-se 5 camadas de desmoldante, com intervalos de 10 minutos entre uma camada e outra para cura completa do filme polimérico, como sugere a ficha técnica da *Redelease*. É importante proteger com fita adesiva o contorno da chapa onde o *tacky tape* será fixado, evitando que ele se descole devido ao desmoldante. Camatta (2017) passa as diretrizes do teste de infusão com sequência de empilhamento das camadas, dimensões e posicionamento dos espirodutos (informação pessoal)†.

- 1 - Camadas de tecidos de fibra de carbono (200mm x 600mm);
- 2 - Uma camada do Peelply pouco maior que os tecidos de carbono (220mm x 620mm);
- 3 - Uma camada do Media Flow (200mm x 550mm, 50mm menor na saída de vácuo);
- 4 - Dois espirodutos ligados a mangueira transparente reforçada (para entrada de resina e saída de vácuo). É importante destacar que os espirodutos

* Informação fornecida por Paulo Camatta em São Paulo, em 2017.

† CAMATTA, P. Teste de infusão. Mensagem recebida por guilhermelahr92@gmail.com em 21 ago. 2017.

devem estar sobre a fibra de carbono para que a bolsa de vácuo não vede as entradas espiraladas quando a bomba for ligada;

5 - Bolsa de vácuo (com dimensões 20% maior que todo o sistema);

Para vedação do sistema utilizou-se o Tacky Tape colocado pelas laterais da chapa de vidro. Duas “orelhas” (RIBEIRO; WOLF, 2017) foram feitas em cada lateral para que houvesse sobra da bolsa de vácuo evitando-se assim o rompimento do filme quando o vácuo exercer tensão sobre as regiões em contato com o espiroduto.

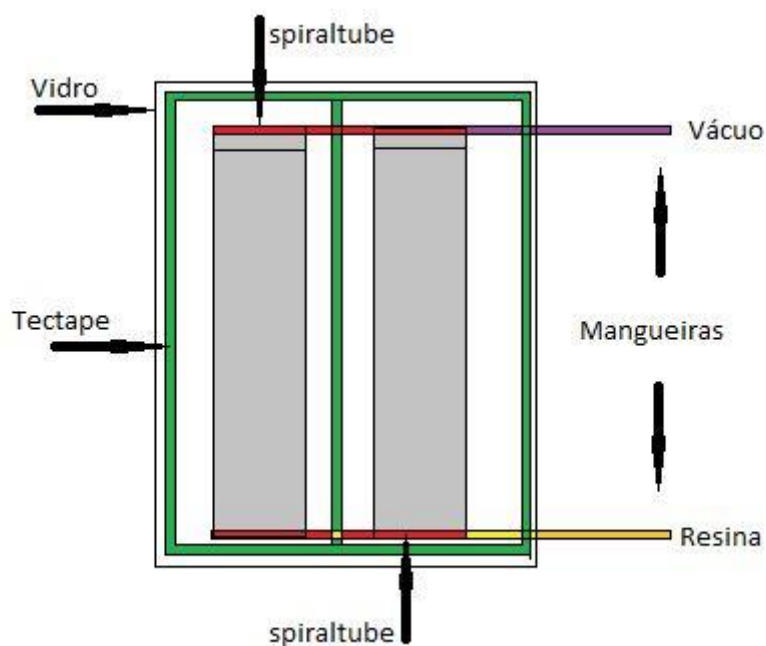


Figura 12: Esquema de montagem do teste de infusão na bancada. (Adaptado de CAMATTA, 2017)

A mangueira de entrada do sistema foi conectada ao balde de resina e a mangueira de saída conectada ao *resin trap* e bomba de vácuo, como representado no esquema a seguir. O vacuômetro foi conectado entre o *resin trap* e a bomba, mantendo a pressão de vácuo em 550 mmHg.

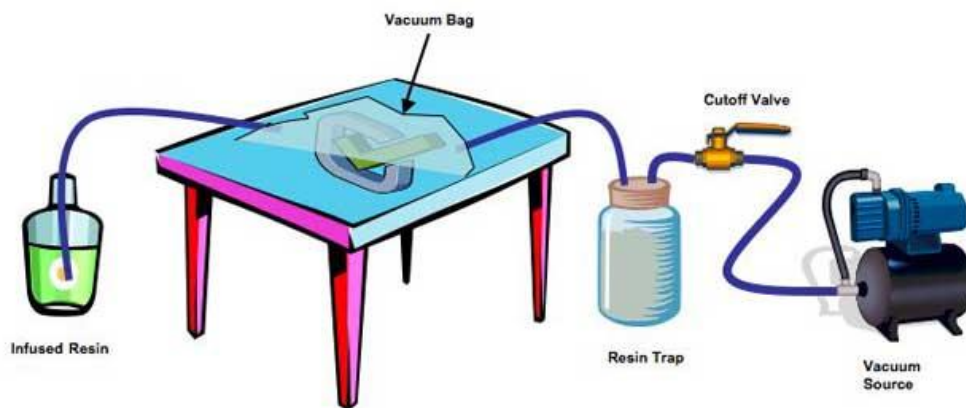


Figura 13: Esquema da montagem periférica à bancada. (Adaptado de CAMATTA, 2017)

Ligou-se a bomba com a entrada de resina fechada pelos estranguladores de mangueira. Isso para que a bolsa de vácuo se acomodasse e exercesse a pressão sobre os tecidos, necessária para infusão. Abriu-se a entrada de resina e iniciou-se o processo de infusão. A partir do momento em que a resina tocou os tecidos disparou-se um cronômetro e a cada 15 segundos demarcou-se com caneta sobre a bolsa de vácuo o perfil do trajeto da resina, como demonstrado na Figura 14.



Figura 14: Resina permeando os tecidos e marcações de seu trajeto (Fonte: Autor, 2017)

A infusão ocorreu a temperatura de 26°C (considerada ideal para viscosidade e tempo de cura da resina, com base no manual da *EpHoxal*). Após 24 horas de cura a temperatura ambiente desmoldou-se os CPs.

Repetiu-se todo o teste para produção de um terceiro CP. Os resultados dos teores de reforço apresentam-se na Tabela 1:

Tabela 1: Teor de reforços de cada CP

CP	Número de camadas de reforço	Massa dos reforços (g)	Massa do laminado (g)	Teor de reforços (%)
1	4 (90°/45°/45°/90°)	100	164	60,97
2	3 (90°/45°/90°)	75	127	59,05
3	2 (90°/45°)	50	86	58,14

Fonte: Autor

Atingiu-se proporção matriz/reforço esperada de aproximadamente 60%, considerada ideal para a rigidez (TITA, 2011).

Os tempos de permeação da resina epóxi nos tecidos de reforços, a cada 200mm, estão apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Tempo de permeação da resina para cada CP

CP	200mm	400mm	600mm
1	1min27s	4min20s	8min23s
2	1min30s	3min33s	7min52s
3	1min31s	3min15s	6min59s

Fonte: Autor

3.3.2 Testes de Rigidez no CP

Devido à alta flexibilidade dos CPs, não foi possível realizar testes de flexão em três pontos. Como as competições de maratonas energéticas não adotam uma norma de ensaio mecânico para avaliação da rigidez/deformação das carenagens dos protótipos veiculares seguiu-se as orientações do regulamento da MUEE.

Com finalidade de simular a inspeção técnica dentro da oficina da EESCuderia Mileage criou-se um ensaio onde os CPs teriam que suportar uma massa pontual de 5kg, em vão livre de 300mm com suas extremidades fixas, sem se romper. A superfície plana e paralela ao solo mais extensa da carenagem possui 30mm, motivando a medida do vão livre.

Os CPs 1 e 2 foram aprovados no teste e o CP 3 apresentou deformação elástica acima do esperado, porém não se rompeu.

Utilizando-se a Teoria Clássica de Laminados seria possível obter uma estimativa do comportamento mecânico dos laminados antes dos CPs serem produzidos, podendo-se assim focar a execução dos testes nas configurações de laminados mais adequados às necessidades do projeto, eliminando-se assim a necessidade do laminado com 4 camadas de tecido.

Também era esperado um empenamento no CP3 que, pela ausência de simetria no empilhamento dos tecidos de reforço, tende a se torcer devido à dilatações e contrações térmicas do processo de cura da resina. Porém o empenamento não ocorreu.

3.3.3 Manufatura da carenagem

Para montagem do sistema de infusão da peça final, seguiu-se exatamente os mesmos passos dos testes sobre a chapa de vidro descrito no item 3.3.1, porém dessa vez dentro do molde da carenagem. Limpou-se a superfície interior, selou-se e aplicou-se as cinco camadas de desmoldante. Para assentamento dos tecidos de fibra de carbono, *peelply* e *media flow* necessitou-se da ajuda do adesivo de contato aerossol para moldar as lâminas sobre as regiões de perfil curvo e onde a gravidade atuava empurrando os tecidos em direção ao fundo do molde.

Levaram-se em conta três parâmetros para definir o plano de laminação: rigidez dos CPs, tempo de permeação e tempo de trabalho da resina a 25°C (por 20 minutos).

Camatta (2017) sugere que com finalidade de reduzir ao máximo o peso da carenagem sem afetar sua rigidez pode-se laminar em toda sua extensão duas camadas de tecido de fibra de carbono, posicionadas em 90°/45°, com faixas de uma camada de reforços ao longo de seu corpo formando um tipo de

esqueleto, para melhorar a estrutura e evitar empenamentos causados pela ausência de simetria do posicionamento dos tecidos. Essas estruturas são utilizadas de costume em projetos de cascos navais (informação verbal)*, como representado na Figura 15:



Figura 15: Esqueleto da carenagem (Fonte: Autor, 2017)

Para definição do posicionamento dos espirodutos, entrada de resina e saída de vácuo observou-se que a temperatura dentro da oficina estava em 28°C, o que pode influenciar no tempo de trabalho da resina. Ainda sob orientação de Camatta (2017), com base nos resultados de tempo de permeação da resina, onde a permeabilidade começa a ser lenta após os primeiros 200mm de tecido contados a partir do espiroduto, concluiu-se que esta seria a distância ideal para a resina percorrer até preencher todo o molde. Assim posicionou-se os espirodutos com uma coluna central e quatro ramificações a 450mm de distância uma da outra e 150mm de distância da borda do molde, que foi protegida com o feltro de poliéster para atuar como escape de ar em caso de vazamento no *tacky tape* de vedação, representados na Figura 16 e Figura 17.

* Informação fornecida por Paulo Camatta em São Carlos, em 2017.



Figura 16: Disposição dos espirodutos
(Fonte: Autor, 2017)

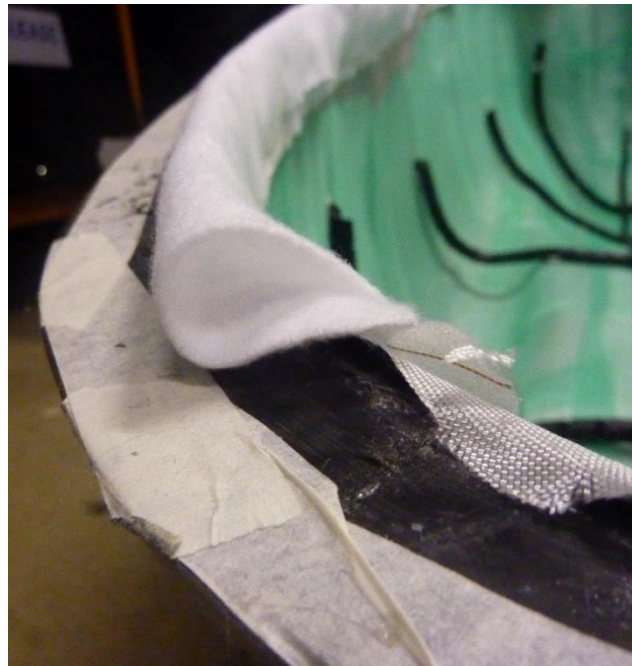


Figura 17: Posicionamento do feltro de poliéster
(Fonte: Autor, 2017)

Fechou-se o sistema com a bolsa de vácuo e *tacky tape* (atentando-se para a presença das “orelhas”). Posicionou-se a entrada de resina no bico frontal do molde com a mangueira transparente reforçada conectada à coluna central do espiroduto. Colocou-se a saída de vácuo no bico traseiro, sendo uma mangueira reforçada com sua ponta envolvida com o feltro de poliéster e sem conexão com o espiroduto (assim, o vácuo não succionará a resina diretamente para o *resin trap*). Conectou-se o *resin trap*, vacuômetro e bomba de vácuo.

Fechou-se a entrada de resina com o estrangulador e ligou-se a bomba para que a bolsa de vácuo se assentasse sobre os tecidos.

Utilizando-se o detector de vazamentos ao longo de toda interface unida com o *tacky tape* constatou-se que o sistema estava perfeitamente vedado. Assim preparou-se cinco litros de resina epóxi em um balde na mangueira de entrada e iniciou-se a infusão, que se completou em 2 minutos e 18 segundos.

Desligou-se a bomba de vácuo após 40 minutos do fechamento da entrada de resina e fez-se a desmoldagem após 18 horas de cura a temperatura ambiente.



Figura 18: Peça final após desmoldagem (Fonte: CRC Composites/Newsletter)

4. Resultados

A peça desmoldada apresentou massa de 3,1kg, que foi reduzida para 2,8kg após remoção de rebarbas e regiões de janela para visualização do piloto. Essa massa pode ser estimada previamente aplicando-se um cálculo simples que combina a densidade da resina, dos reforços, seus teores e a espessura dos corpos de prova, multiplicados pela área total da carenagem, obtiva através do software CAD utilizado inicialmente na modelagem do perfil. Os propósitos aerodinâmicos estudados previamente pelo time de Aerodinâmica foram atendidos.

Quanto a rigidez, a carenagem apresentou-se adequada ao procedimento de análise da Maratona Universitária de Eficiência Energética, suportando um corpo de massa 8kg em sua parte frontal plana, sem se deformar. Observou-se que as regiões de perfil curvo obtiveram maior rigidez, exercendo papel de vigas e colunas de sustentação, que não foram previstas no projeto. Houve êxito na colocação dos reforços em forma de “esqueleto”, prevenindo o empenamento da peça com sucesso.

Defeitos de laminação se fizeram presentes em forma de pequenas bolhas de ar na região de união dos tecidos de fibra de carbono, apresentadas na Figura 19 e Figura 20. Essas bolhas não influenciaram na funcionalidade da carenagem, afetando apenas sua questão estética.



Figura 19: Pequenas bolhas de ar
(Fonte: Autor, 2017)



Figura 20: Maior bolha na superfície externa
(Fonte: Autor, 2017)

O acabamento da peça seguiu a mesma qualidade do acabamento do molde, que por sua vez refletiu a superfície do PM. O brilho desejado não foi atingido. Para isso pode-se revestir o PM com outro material que proporcione melhor acabamento, em substituição da massa acrílica, ou utilizar uma lixa de granulometria mais fina, em substituição a lixa 200, para polir o revestimento.



Figura 21: Equipe EESCuderia Mileage com o protótipo Venturo na Shell Eco Marathon Brasil, no Rio de Janeiro em 2017. (Fonte: Site da Shell Eco Marathon, 2017)

5. Conclusão

O processo de infusão a vácuo permite obter elevadas proporções de reforços quando comparada a laminação manual. Isso é possível devido aos parâmetros controláveis como pressão de vácuo, viscosidade da resina e tempo de permeação.

Os testes de bancada são fundamentais para precisar o comportamento de todo o material que será utilizado no processo e entender como a resina permeará os tecidos, evitando-se erros e perdas.

O trabalho mostrou como o processo de infusão a vácuo é versátil. Se bem testado ele pode ser utilizado em projetos de pequeno porte, como pequenas hélices e peças automobilísticas, até projetos de grande porte, como embarcações e fuselagens de aviões. Porém é um processo que demanda alto investimento, boa equipe técnica e muito tempo de trabalho. Não deve ser utilizado para produção em larga escala mas sim em projetos específicos e que exija um alto nível de engenharia.

O molde é a base de todo o trabalho. Sem um molde adequado dificilmente obtém-se uma peça na qualidade desejada. Os materiais e equipamentos utilizados para produção do molde devem ser adequados a forma de manufatura e de boa precisão. Caso contrário, erros de dimensionamento, torção e acabamento não uniforme contribuem para aparição de defeitos como bolhas de ar que prejudicam a aparência do laminado e podem causar danos irreversíveis caso a peça sofra solicitação mecânica.

Ao final deste trabalho percebe-se que a metodologia utilizada para a fabricação da carenagem do protótipo Venturo é replicável para produção de peças de pequeno, médio e grande porte e geometrias adequadas ao processo de desmoldagem.

Na competição a carenagem cumpriu seu objetivo sendo aprovada nas inspeções técnicas de segurança e atraindo muita atenção devido ao seu *design* complexo e estética chamativa.

Projetar e simular em computador estruturas em material compósito é desafiador. Como sugestão para futuro trabalho pode-se desenvolver um projeto de um banco estrutural em polímero reforçado com fibras e estrutura sanduíche por meio do *software* Abaqus®. Este banco poderá substituir o chassis do

protótipo da EESCuderia Mileage e ser produzido por infusão a vácuo, seguindo-se os passos apresentados nesta monografia.

6. Referências

- ✓ CALLISTER JR, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução 5e**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- ✓ COOPMACO. **Laminação Manual (Hand Lay Up)**, 2014. Disponível em: <<http://coopmaco.com.br/wp-content/uploads/2014/02/Laminacao-manual-Hand-Lay-Up.pdf>>. Acesso em: Outubro de 2019.
- ✓ MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia**. São Paulo: Artliber, 2011.
- ✓ NASSEH, J. **Manual de Construção de Barcos: Método de Infusão**, 2014. Disponível em: <<http://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/Site/?p=994>>. Acesso em: Outubro de 2019.
- ✓ NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Blucher, 2006.
- ✓ RIBEIRO, M.L.; WOLF P. **Workshop de Fabricação de Estruturas em Materiais Compósitos**. 2016, São Carlos.
- ✓ TARPANI, J. R. **Disciplina SMM-0308: Materiais Compósitos**, primeiro semestre de 2015. Notas de Aula. Arquivo digital.
- ✓ TITA, V. **Projeto e Fabricação de Estruturas em Material Compósito Polimérico**. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística. São Carlos, 2011.