

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**GABRIELA BATISTA MOREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO DA CARENAGEM FEITA DE RESINA EPÓXI COM  
FIBRA DE CARBONO DA EQUIPE ECOFET**

**BELO HORIZONTE  
2018**

GABRIELA BATISTA MOREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DA CARENAGEM FEITA DE RESINA EPÓXI COM  
FIBRA DE CARBONO DA EQUIPE ECOFET**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Roberta Viana

BELO HORIZONTE  
2018

GABRIELA BATISTA MOREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DA CARENAGEM FEITA DE RESINA EPÓXI COM  
FIBRA DE CARBONO DA EQUIPE ECOFET**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no  
Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas  
Gerais como requisito parcial para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dra. Roberta Viana-Orientador

---

Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos

---

Prof. Dra. Aline Bruna Silva

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Alencar e Vádna, que sempre estiveram do meu lado, me dando todo apoio, suporte e incentivo de que eu precisava. Obrigada por acreditarem em mim.

À minha irmã Thayse, que sempre foi minha inspiração acadêmica e pessoal, sempre me ajudou em todas as etapas e estava presente para dar os melhores conselhos.

À minha orientadora Roberta, por aceitar o desafio de me orientar e por estar preparada e disponível para me acalmar nos momentos de desespero.

Aos meus amigos do CEFET, Jéssica, Matheus e ao Quarto A, por estarem ao meu lado nas celebrações e nas dificuldades, nas conquistas e nas derrotas, sempre torcendo pelo meu sucesso.

As minhas amigas Dhayannie, Lorryne e Thais, agradeço pelas orações, por me apoiarem e sempre se orgulharem de mim.

Ao professor Wellington, que mesmo não tendo participação em minha banca ou orientação estava sempre disposto em ajudar.

À equipe ECOFET por serem tão simpáticos, disponíveis e solícitos, principalmente o capitão e a Mariana. Sem a ajuda de vocês não seria possível.

*“Ó, vida futura! Nós te criaremos.”*

(Carlos Drummond de Andrade)

## RESUMO

O presente projeto consistiu da caracterização do compósito de matriz epóxi com fibras de carbono utilizado na carenagem do carro de corrida da equipe ECOFET. A resina epóxi que é utilizada como matriz desse compósito é pertencente ao grupo de resinas termorrígidas de alto desempenho e possui uma série de aplicações. As fibras de carbono são utilizadas para obter as propriedades de resistência mecânica necessárias à aplicação do material. O compósito de matriz epóxi com fibras de carbono é utilizado como carenagem do carro da equipe ECOFET, sendo a carenagem a parte de um veículo responsável por reduzir o atrito e a resistência do ar, contribuindo com o aspecto aerodinâmico do carro. A equipe ECOFET foi fundada em 2007 e desenvolve protótipos a fim de obter uma maior eficiência das partes móveis. Apesar de utilizar o compósito na carenagem a equipe ainda não realizou uma caracterização físico-química e mecânica desse material. Com a análise realizada constatou-se que a carenagem apresenta alto volume de vazios e baixa interface matriz/reforço devido ao processo de fabricação de moldagem manual, o que ocasionou propriedades mecânicas inferiores ao esperado.

Palavras-chave: Resina epóxi, Fibra de carbono, Carenagem, ECOFET, caracterização de compósitos.

## **ABSTRACT**

The present project proposes the characterization of the composite of epoxy matrix with carbon fibers used in the fairing of the racing car of the ECOFET team. The epoxy resin that is used as the matrix of this composite belongs to the group of thermosetting resins of high performance and has a series of applications. Carbon fibers are used to obtain the mechanical strength properties required for the application of the material. The composite epoxy matrix with carbon fibers is used as the fairing of the ECOFET team car, the fairing being the part of a vehicle responsible for reducing the friction and resistance of the air, contributing to the aerodynamic aspect of the car. The ECOFET team was founded in 2007 and develops prototypes in order to achieve greater efficiency of the moving parts. Despite using the composite in the fairing, the team has not yet performed a physical-chemical and mechanical characterization of this material. The characterization will include traction, flexural, infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric (TG) analysis, scanning electron microscopy (SEM), determination of density and content of constituents. Keywords: Epoxy resin, Carbon fiber, Fairing, ECOFET, characterization of composites.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	15
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
<b>3.1 Materiais Compósitos</b> .....	16
3.1.1. <i>Matriz</i> .....	19
3.1.2. <i>Reforço</i> .....	20
3.1.3. <i>Interface e adesão</i> .....	21
3.1.4. <i>Processamento</i> .....	22
<b>3.2. Compósito de resina epóxi e fibra de carbono</b> .....	25
3.2.1. <i>Resina Epóxi</i> .....	25
3.2.2. <i>Fibra de Carbono</i> .....	26
3.2.3. <i>Compósito de fibra de carbono e resina epóxi</i> .....	28
<b>3.3. Carenagem ECOFET</b> .....	28
3.3.1. <i>Carenagem</i> .....	28
3.3.2. <i>ECOFET</i> .....	29
3.3.3. <i>Carenagem ECOFET</i> .....	39
<b>3.4. Técnicas de caracterização</b> .....	29
3.4.1. <i>Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)</i> .....	30
3.4.2. <i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</i> .....	31
3.4.3. <i>Análise Termogravimétrica (TG)</i> .....	31
3.4.4. <i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	32
3.4.5. <i>Determinação do Conteúdo dos Constituintes através da Digestão ácida da Matriz</i> .....	32
3.4.6. <i>Determinação da Densidade pelo método de deslocamento de líquido</i> .....	34
3.4.7. <i>Ensaio de Tração</i> .....	35
3.4.8. <i>Ensaio de Flexão</i> .....	37
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	38
<b>4.1. Materiais</b> .....	38
<b>4.2. Métodos</b> .....	40
<b>5. CARACTERIZAÇÃO</b> .....	43
<b>5.1. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)</b> .....	43

5.2.	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	43
5.3.	Análise Termogravimétrica (TG).....	43
5.4.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	43
5.5.	Determinação do Conteúdo dos Constituintes através da Digestão ácida da Matriz.....	44
5.6.	Determinação da Densidade pelo método de deslocamento de líquido.....	45
5.7.	Ensaio de Tração.....	46
5.8.	Ensaio de Flexão.....	48
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
6.1.	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	50
6.2.	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	52
6.3.	Análise Termogravimétrica (TG).....	53
6.4.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	55
6.5.	Determinação do Conteúdo dos Constituintes através da Digestão ácida da Matriz e Densidade do Compósito.....	57
6.5.1	- Obtenção das frações mássicas.....	57
6.5.2.	Determinação da Densidade e Fração Volumétrica.....	58
6.6.	Ensaio de Tração.....	61
6.7.	Ensaio de Flexão.....	64
7.	CONCLUSÃO.....	66
8.	REFERÊNCIAS.....	67
	ANEXO 1.....	69
	ANEXO 2.....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de classificação dos compósitos segundo o agente reforçante .....	17
Figura 2 - Prótese esportiva em fibra de carbono .....	18
Figura 3 - Porcentagem global dos materiais utilizados na fabricação da aeronave .....	18
Figura 4 - Termoplásticos e termorrígidos .....	20
Figura 5 - Fibra de carbono e matriz polimérica .....	21
Figura 6 - Esquema de moldagem manual (hand lay-up).....	23
Figura 7 - Esquema de moldagem por aspersão (spray-up) .....	23
Figura 8 - Moldagem a vácuo.....	24
Figura 9 - Processo de Pultrusão .....	25
Figura 10 - Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A (DGEBA)...	26
Figura 11 - Anel epóxi (grupo epoxídico).....	26
Figura 12 - Ilustração de fibras de carbono .....	27
Figura 13 - Exemplo de peça feita com fibra de carbono e resina epóxi .....	28
Figura 14 - Carro ECOFET .....	29
Figura 15 - Resina e endurecedor utilizados para fabricação da carenagem....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 16 - Fibra de carbono utilizada para fabricação da carenagem .....	39
Figura 17 - Diagrama de funcionamento de MEV .....	32
Figura 18 - Exemplo de curva tensão-deformação .....	37
Figura 19 - Diagrama ensaio de flexão de 3 pontos .....	37
Figura 20 - Fluxograma dos ensaios realizados na amostra de carenagem e fibra de carbono.	38
Figura 21 - Molde para fabricação da carenagem .....	41
Figura 22 - Processamento por moldagem manual da carenagem .....	42
Figura 23 - Microscópio eletrônico de varredura .....	44
Figura 24 - Corpos de prova analisados no ensaio de digestão ácida.....	44
Figura 25 - Corpos de prova analisados no ensaio de densidade .....	45
Figura 26 - Corpos de prova ensaio de tração .....	46
Figura 27 - Máquina universal Shimadzu .....	47
Figura 28 - Corpo de prova no ensaio de flexão.....	49
Figura 29 - FTIR carenagem .....	50
Figura 30 - Curva de DSC obtida para o compósito de fibra de carbono/epóxi.....	52

Figura 31 - Curva TG da amostra de carenagem.....	53
Figura 32 - Curva TG da amostra de fibra de carbono.....	54
Figura 33 - Imagens do MEV mostrando a superfície da carenagem .....	55
Figura 34 - Imagens do MEV mostrando as fibras de carbono.....	56
Figura 35 - Fibra de carbono após a digestão ácida .....	57
Figura 36 - Ensaio de Tração das 5 amostras de carenagem.....	61
Figura 37 - Amostras antes e depois do ensaio de tração.....	64
Figura 38 - Ensaio de Flexão das 5 amostras de carenagem .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Fibra de Carbono .....	40
Tabela 2 - Densidades da água conforme temperatura.....	46
Tabela 3 - Massa de compósito, massa de fibras obtidas após a digestão da matriz e massa de matriz.....	57
Tabela 4 - Fração mássica .....	58
Tabela 5 - Massa das amostras secas .....	58
Tabela 6 - Massa das amostras imersas na água.....	59
Tabela 7 - Resultados de frações volumétricas por digestão ácida e medida de densidade pelo método de deslocamento de líquido .....	59
Tabela 8 - Resultados ensaio de tração.....	61
Tabela 9 – Módulo de elasticidade e Resistencia a tração teóricos.....	63
Tabela 10 – Resultados Ensaio de Flexão na carenagem .....	65

## 1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos se relacionam diretamente com a evolução e avanço da tecnologia, pois trazem como proposta a união de dois materiais que sozinhos possuem características e propriedades distintas e que ao se juntarem produzem um material com propriedades ainda diferentes e que na maioria dos casos une as qualidades dos materiais quando separados.

O compósito de resina epóxi com fibras de carbono é muito utilizado em aplicações que requerem um alto desempenho mecânico como na produção de peças automotivas e aeronaves. Sua produção é feita geralmente a partir de um processo de laminação simples.

A resina epóxi que é utilizada como matriz desse compósito é pertencente ao grupo de resinas termorrígidas de alto desempenho e possui uma série de aplicações. Geralmente tem como base o diglicidil éter do bisfenol A e por meio de uma reação com a epicloidrina é sintetizada. As fibras carbono são utilizadas pois apresentam uma boa resistência mecânica e um alto módulo de elasticidade associada a baixa densidade.

As fibras exercem o papel de reforço do compósito, suportando o esforço mecânico que o material sofre. O compósito de matriz epóxi com fibras de carbono é utilizado como carenagem do carro da equipe ECOFET que é a parte de um veículo responsável por reduzir o atrito e a resistência do ar, contribuindo com o aspecto aerodinâmico do veículo, além disso, é utilizado pela equipe como carcaça do carro de corrida.

A equipe ECOFET foi fundada em 2007 e desenvolve protótipos a fim de obter uma maior eficiência das partes móveis, melhor rendimento do motor e maior redução de peso, item importantíssimo no que se diz respeito à eficiência energética de carros. Os protótipos são projetados, construídos e testados pelos próprios alunos. Apesar de utilizar o compósito na carenagem a equipe ainda não realizou uma caracterização físico-química e mecânica desse material.

O presente projeto propõe a caracterização do compósito de matriz epóxi com fibras de carbono utilizado na carenagem do carro de corrida da equipe ECOFET. Essa caracterização incluirá ensaios de tração, flexão, espectroscopia na região do infravermelho (FTIR),

calorimetria exploratória diferencial (DSC), análise termogravimétrica (TG), microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaios de digestão e densidade, além de caracterizar também a fibra de carbono utilizada com os ensaios de análise termogravimétrica (TG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

- Caracterizar o compósito de matriz epóxi reforçada com fibra de carbono utilizada pela equipe ECOFET para a produção da carenagem do carro de competição;

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar as propriedades físico-químicas e térmicas do compósito epóxi/fibra de carbono buscando avaliar o grau de cura da resina através das técnicas de TG, DSC e FTIR;
- Avaliar a morfologia do compósito e da fibra através de microscopia eletrônica de varredura;
- Avaliar o conteúdo dos constituintes, frações de vazio e densidade do compósito;
- Avaliar as propriedades mecânicas do compósito fibra de carbono e resina epóxi por meio dos ensaios de tração e flexão;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Materiais Compósitos

A classe dos materiais compósitos engloba diversos tipos de materiais, como poliméricos, metálicos e cerâmicos, sendo dessa forma muito extensa e rica. Por meio da combinação de duas ou mais fases diferentes, denominadas matriz e reforço, os compósitos conseguem unir propriedades diferentes e que dificilmente se encontrariam em apenas um material, conseguindo uma performance mecânica e de propriedades superiores aos materiais quando isolados (ALTIN KARATAŞ; GÖKKAYA, 2018).

A palavra “compósito” tem sua origem na língua inglesa, sendo o termo *composite* definido, em português, pela Prof. Eloísa Mano (MANO, 1991 apud FÉLIX, 2002) como:

Compósito é uma classe de materiais heterogêneos, tanto em escala macroscópica quanto microscópica; multifásicos, resultantes de uma combinação racional, em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço (componente estrutural ou reforço) e o outro, contínuo, o meio de transferência deste esforço (componente matricial ou matriz).

Assim, o material compósito tem a capacidade de unir a propriedade da matriz de absorver impactos, estabilizar e aglutinar, além de dar a forma geométrica desejada. E o reforço colabora com a resistência mecânica, rigidez e dando propriedades de leveza. Muitos compósitos conseguem suportar grandes esforços combinados de tração, flexão e torção, além de processos corrosivos em ambientes agressivos (NETO; PARDINI, 2006).

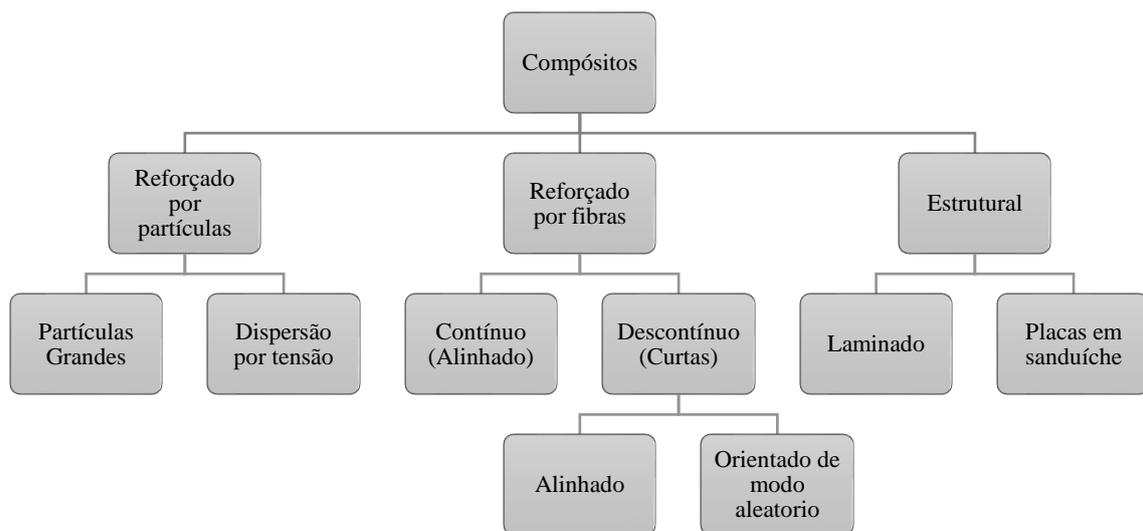
As propriedades desses tipos de materiais são, portanto, influenciadas por um alto número de fatores e variáveis, o que torna mais complexo entender o comportamento mecânico dos mesmos, mas que permite mais possibilidades de ajustar as propriedades para se adequarem as desejadas.

Apesar de parecer uma tecnologia extremamente nova, os compósitos já aparecem na sociedade há muitos anos nos objetos mais simples, já que a madeira, os ossos e os tecidos são exemplos clássicos de compósitos naturais.

Desde a pré-história tem-se relatos da utilização de materiais compósitos naturais durante as atividades daquela época. Alguns relatos bíblicos contêm informações de fibras sendo usadas como reforço para construção de tijolos de argila no antigo Egito.

Os compósitos podem ser divididos levando em conta vários fatores, o primeiro deles o tipo de agente reforçante, mostrado na figura abaixo:

**Figura 1 - Fluxograma de classificação dos compósitos segundo o agente reforçante**



Fonte: NETO e PARDINI, 2006

Outra classificação também muito usada é a divisão entre naturais e sintéticos, sendo os naturais mais comuns, os sintéticos, como o estudado nesse trabalho, podem ser divididos de acordo com o tipo de matriz, reforço, orientação do reforço, dentre outros, tendo cada um uma eficiência e comportamento diferentes (NETO; PARDINI, 2006)

Atualmente, os compósitos sintéticos veem apresentando um desempenho estrutural melhor do que os naturais, no entanto, com o aumento da consciência ambiental e o incentivo ao uso de materiais de fácil degradação e renováveis, tem se utilizado muito as fibras naturais e de origem vegetal, apoiando o desenvolvimento sustentável e minimizando a dependência de recursos não-renováveis.

A partir da década de 60, os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos de maneira definitiva na indústria aeroespacial, isso deve-se, principalmente, ao constante desafio que esta indústria possui na obtenção de componentes que exibam os maiores valores de resistência mecânica e de rigidez específicas entre os materiais disponíveis. A substituição do alumínio por compósitos poliméricos estruturais, por exemplo, permite uma alta

redução de peso além de redução do custo final de obtenção das peças (REZENDE e BOTELHO, 2000).

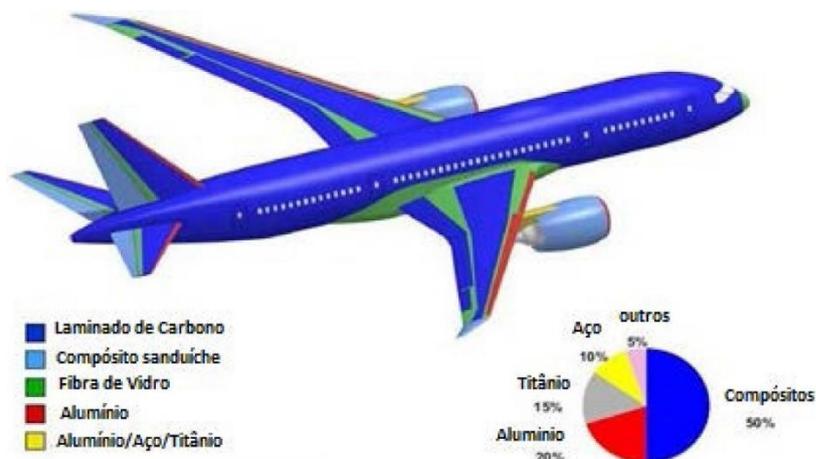
Com o aumento das pesquisas relacionadas a classe de materiais compósitos nos últimos anos, foi possível viabilizar uma série de conquistas em setores como aeronáutica, automobilístico, construção civil, biomateriais, como em próteses e em equipamentos esportivos, como raquetes de tênis, esquis e bicicletas. Peças e equipamentos que foram criadas e aprimoradas com os recursos e vantagens dos materiais compósitos desenvolveram esses setores e a sociedade como um todo.

**Figura 2 - Prótese esportiva em fibra de carbono**



Fonte: <https://www.protesesnews.com>

**Figura 3 - Porcentagem global dos materiais utilizados na fabricação da aeronave**



Fonte: <http://www.scielo.br>

Podemos dizer que apesar das diferenças de cada compósito existem algumas características comuns a maioria desses materiais, mas a maior parte das propriedades depende dos constituintes, suas geometrias e a distribuição das fases que determina a uniformidade e heterogeneidade do sistema.

Compósitos de matriz polimérica como o estudado neste trabalho, estão sendo aplicados em diversas áreas industriais, principalmente por possuírem propriedades mais favoráveis, como maior resistência, melhor desempenho de fadiga, resistência a corrosão, baixo consumo de energia durante a fabricação e alta rigidez (DANIEL; ISHAI, 2006).

Apesar das inúmeras vantagens de se utilizar materiais compósitos, eles também possuem algumas limitações quando comparados com materiais monolíticos convencionais. Sendo a principal delas a região de interface entre matriz e reforço que pode se tornar um ponto de fragilidade devido à dificuldade de dissipação de energia, além disso, como o número de opções de combinações é muito grande, o design, otimização do processo de fabricação e análises de caracterização podem ser mais complexos.

### 3.1.1. *Matriz*

A matriz de um compósito consiste na parte contínua do material que tem como função transferir os esforços e impactos sofridos para o reforço além de protegê-lo, contra danos por abrasão e condições ambientais. Ela é responsável também por dar forma e geometria ao material e é nela que o reforço é disperso.

A matriz deve possuir uma forte adesão com a superfície do reforço, para que seja possível que ela deforme e transfira a carga entre as fibras. Algumas características finais do compósito são predominantemente da matriz, como resistência a compressão, resistência ao cisalhamento e temperatura (REZENDE e BOTELHO, 2000).

A maioria das matrizes utilizadas em compósitos é feita de polímeros termorrígidos, as outras matrizes de cerâmicos e metais são utilizadas em casos de aplicações em altas temperaturas.

As resinas termorrígidas sofrem polimerização e formação de ligações cruzadas, fazendo com que o material se torne infusível, não reprocessável e na maioria dos casos insolúvel, além de manter sua rigidez em temperaturas altas. O aquecimento delas causa mudanças químicas e estruturais, que resultam na reticulação do polímero. Devido a essas

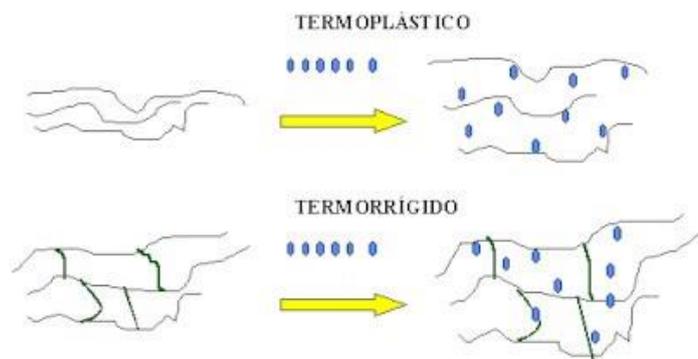
características elas podem apresentar problemas de tensão, natureza quebradiça e falta de resistência à erosão.

São exemplos de resinas termorrígidas utilizadas em materiais compósitos as resinas epóxis, que apresentam melhor desempenho estrutural, as poliéster usadas em aplicações industriais e de transporte em geral, pois possuem baixo custo e baixa temperatura de cura, as fenólicas, poliimidas resistentes à temperatura e as bismaleimidas.

Embora, como tenhamos comentado que a utilização das resinas termorrígidas é maior demandada, as resinas termoplásticas continua sendo uma ótima alternativa de matriz polimérica para aplicações também estruturais, já que possui uma boa tenacidade à fratura, boa resistência a danos e ao impacto quando comparada aos termorrígidos.

Os termoplásticos podem ser reprocessados, pois tornam-se líquidos quando expostos a temperaturas de fusão. Em geral, eles apresentam cadeias longas lineares ou ramificadas, não possuem ligações cruzadas como os termorrígidos, e podem ser reciclados (NETO; PARDINI, 2006)

**Figura 4 - Termoplásticos e termorrígidos**



Fonte: Mundo Educação

### 3.1.2. Reforço

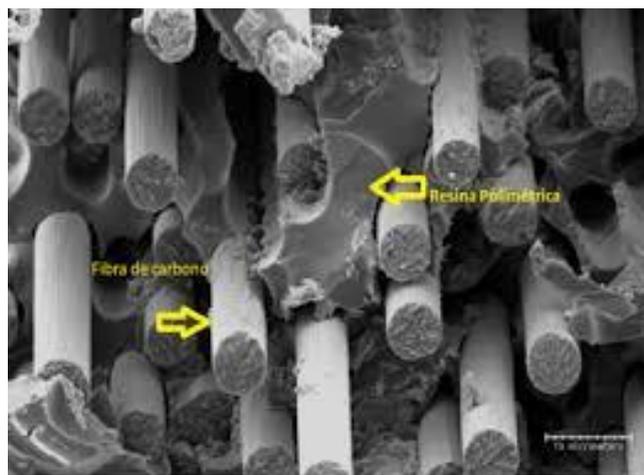
O reforço de um compósito tem a função estrutural do material e é responsável pelas características principais de resistência mecânica. Os reforços podem estar como fibras contínuas, partículas ou fibras cortadas, como mostrado na classificação na Figura 1. Para que os reforços consigam ter utilidade é necessário que estejam bem aglutinados na matriz gerando assim uma boa interface.

As fibras funcionam como bons reforços pois a medida que se tornam mais finos o número de defeitos cai, diminuindo as possibilidades de falhas, tendo uma boa aproximação de resistência do que se é esperado na teoria. As principais fibras que são usadas industrialmente e são produzidas por fiação ou fusão.

A geometria das fibras favorece com que os esforços sofridos na matriz sejam repassados homogeneamente para cada fibra, pois possuem uma alta relação área superficial/volume, já que exibe um pequeno diâmetro e grande comprimento.

Para que ocorra uma melhor transferência de carga mecânica entre matriz e reforço é importante que as fibras apresentem um comprimento igual à maior dimensão da amostra. Por isso, geralmente, as fibras contínuas são as mais utilizadas. As fibras de vidro, aramida e carbono são os principais reforços (NOGUEIRA, 2004; BRITO JUNIOR, 2007).

**Figura 5 - Fibra de carbono e matriz polimérica**



Fonte: Scielo

### 3.1.3 Interface e adesão

A interface entre matriz e compósito é parte importante do compósito e é sempre muito estudada entre as pesquisas. A adesão desses dois elementos pode se dar por encaixe mecânico das cadeias da matriz com as rugosidades da fibra, por atração eletrostática, formação de ligações químicas, forças de Van der Waals.

Quando se tem uma boa adesão entre matriz e fibra, tem-se uma boa interface o que ocasiona em boa transferência de carga sofrida na matriz para o reforço, aumentando a resistência do compósito. (CALLISTER e RETHWISCH, 2012).

Segundo Neto e Pardini (2006), a natureza da adesão dos materiais compósitos podem depender de alguns fatores, sendo eles: conformação molecular e constituição química da matriz, arranjo geométrico das fibras, difusividade dos elementos de cada constituinte, orientação, arranjo atômico, cristalinidade e propriedades químicas do reforço e presença de grupos funcionais superficiais da fibra.

Como principais influencias nas propriedades mecânicas dos compósitos, Neto e Pardini citam:

- Propriedades da interface reforço/matriz;
- Propriedades do reforço e da matriz;
- Fração volumétrica do reforço;
- Orientação do reforço (fibras).

E como principais influencias nas propriedades da interface, eles citam:

- Resistencia ao cisalhamento interfacial;
- Tenacidade a fratura interfacial;
- Encolhimento da matriz;
- Coeficiente interfacial de fricção.

#### *3.1.4. Processamento de Termofixos*

Em relação ao processamento, tem-se como base dos materiais compósitos a impregnação de reforço em uma matriz. Podemos dividir o processamento em dois: pela matriz utilizada, polimérica, cerâmica ou metálica e pelo tipo de processamento, como via líquida, gasosa ou partícula sólida (NETO; PARDINI, 2006).

Neste trabalho será dado um foco especial aos processamentos realizados em matrizes poliméricas. As cinco técnicas de impregnação mais importantes, de acordo com Neto e Pardini são descritas abaixo.

- Moldagem manual (*handy lay-up*): para a realização desta técnica é necessário a utilização de um molde, onde a fibra de reforço será colocada manualmente e a resina é forçada pelas mantas da fibra utilizando algum utensílio, como rolos, pinceis ou a própria mão do operador. Esse é um dos métodos mais utilizados e comuns para processamento de compósitos. Como sua principal vantagem tem-se o baixo custo de fabricação, devido a simplicidade das ferramentas, construção de peças muito grandes e complexas, como desvantagem é possível citar que é um processo que dispende tempo e pode ser considerado trabalhoso, com baixo volume de saída e com peças irregulares e de espessura variável (SEVKAT; BRAHIMI; BERRI, 2012).

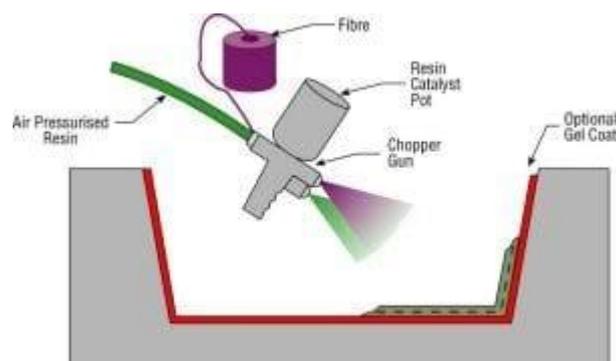
**Figura 6 - Esquema de moldagem manual (*hand lay-up*)**



Fonte:compositoskevlar.blogspot.com

- Moldagem por aspersão (*spray-up*): nesta técnica a resina é pulverizada por ar comprimido através de uma pistola em cima da fibra colocada anteriormente em um molde. Para conseguir uma peça com maior espessura é possível repetir o processo. As principais vantagens são a facilidade de mudança de design, melhor controle das camadas, no entanto, para isso é necessário habilidade do operador (KIKUCHI et al., 2014).

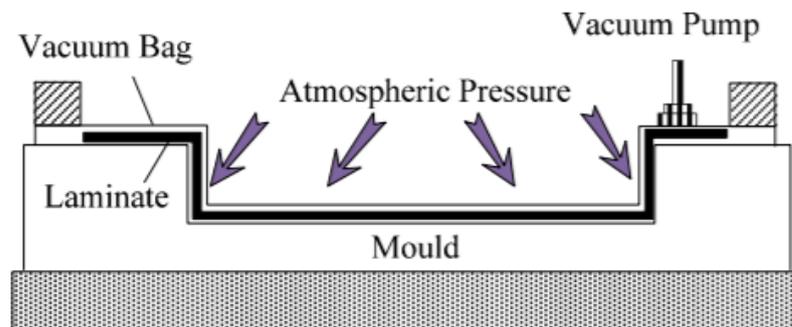
**Figura 7 - Esquema de moldagem por aspersão (*spray-up*)**



Fonte: netcomposites.com

- Moldagem a vácuo (*vacuum bag*): está técnica pode ser considerada como um aperfeiçoamento das técnicas de moldagem manual e por aspersão. Devido a utilização do vácuo no processo, tem-se uma peça com melhor qualidade, já que é possível retirar o excesso de resina que por ventura foi adicionado, além de retirar também, voláteis e bolhas de ar geradas que possam interferir nas propriedades mecânicas finais, diminuindo assim a porosidade. A cura ocorre em vácuo e tem-se uma boa rentabilidade, pode –se contar com o uso de temperatura (HADIGHEH; KASHI, 2018; NETO; PARDINI, 2006).

**Figura 8 - Moldagem a vácuo**

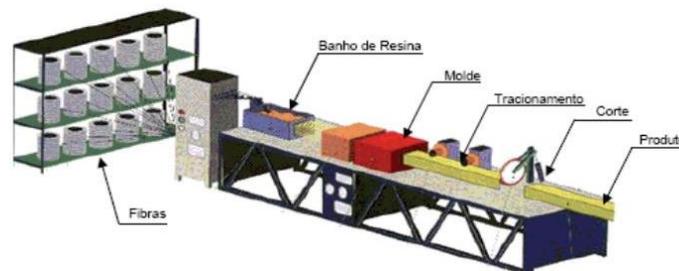


Fonte: (HADIGHEH; KASHI, 2018)

- Tecnologia de pré-impregnados: quando se deseja um nível alto de requisitos de resistência mecânica, geralmente, não é adequado a utilização das técnicas de moldagem manual. Foi então necessário o desenvolvimento de técnicas mais controladas e que houvesse uma maior relação de fração volumétrica para que a transferência de carga mecânica sofrida pela matriz fosse melhor transmitida ao compósito. Os pré-impregnados possuem uma melhor dispersão do reforço e de forma mais homogênea, pois são fabricados com uma etapa previa a moldagem, que é a impregnação, formando um produto intermediário, sendo uma mistura do reforço impregnado com um polímero (NETO; PARDINI, 2006).
- Pultrusão (*pultrusion*): está técnica é considerada o processo mais antigo de fabricação de perfis com fibras. É um processo automatizado e com um alto nível de saída de peças,

por ser um processo contínuo. Resumidamente o processo ocorre nas seguintes etapas: impregnação do reforço em uma cuba com a resina em uma viscosidade adequada e controlada, depois disso o conjunto formado pela fibra e matriz entram no molde que dará a forma desejada, em sequência o molde é aquecido por uma fonte externa (NETO; PARDINI, 2006; SCHÄFER; GRIES, 2016).

**Figura 9 - Processo de Pultrusão**  
**Processo de Pultrusão**



Fonte: netcomposites.com

## 3.2. Compósito de resina epóxi e fibra de carbono

### 3.2.1. Resina Epóxi

As resinas epóxis são muito estudadas e aplicadas em trabalhos científicos, pois exibem um equilíbrio de propriedades e diversas aplicações. Elas conseguem combinar boas propriedades mecânicas, resistência química, baixa absorção de umidade e fácil processamento, além de serem extremamente versáteis (REZENDE e BOTELHO, 2000).

Este tipo de resina, é um polímero termorrígido que apresenta alto desempenho e possui dois grupos epóxis terminais. Suas aplicações são em função das características e estão na construção civil, transportes, embalagens e eletroeletrônica.

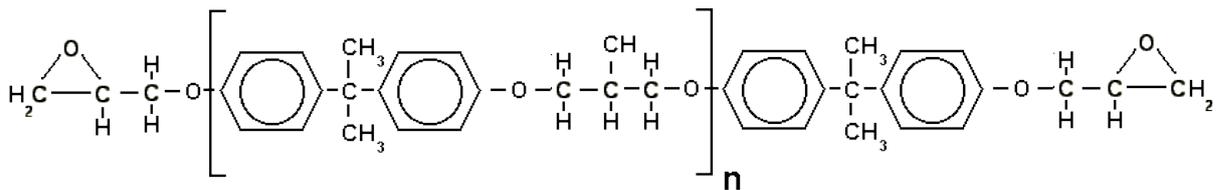
Segundo Riegel e colaboradores (1999), as resinas epóxi sofrem uma transformação dos regentes epoxídicos de baixa massa molar para um material extremamente reticulado, isso ocorre durante o processo de cura.

Por essa razão é que dizemos que as resinas não podem ser reproprocessadas nem fundidas. (FERRARI, DUTRA, AZEVEDO & DAVID) (2012).

Como maiores fabricantes dessa resina temos a Shell, a Dow Química e a Huntsman, respondendo por cerca de 70% da produção mundial. A principal base da resina epóxi é o

diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA), mostrada na Figura 6, ela é sintetizada pela reação entre bisfenol A e a epícloidrina. A proporção dos elementos utilizados pode impactar no estado da resina produzida, podendo ter resinas líquidas a sólidas na forma de oligômeros ou pré-polímeros (NETO; PARDINI, 2006).

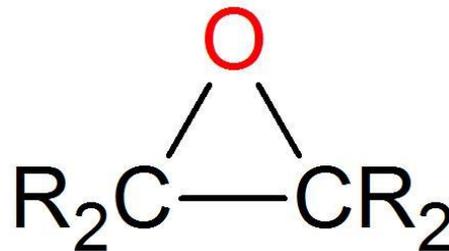
**Figura 10 - Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A (DGEBA)**



Fonte: silaex.com.br

A estrutura do polímero consiste em grupos epóxis terminais e uma unidade de repetição no meio. As repetições podem variar e influenciar nas propriedades finais da resina.

**Figura 11 - Anel epóxi (grupo epoxídico)**



Fonte: Ensinando e Aprendendo

Devido a suas características e propriedades de resistência a erosão, estabilidade química e resistência mecânica, a resina epóxi vem sendo muito empregada em materiais de revestimento em ambientes que tenham contato com a água, por exemplo. Apesar disso, alguns estudos têm mostrado que a resina epóxi pode se tornar quebradiça e com pouca resistência a impacto e fadiga depois de sofrer o processo de cura. Por isso entende-se como tão importante a adição de um reforço na resina (CHEN et al., 2018).

### 3.2.2. Fibra de Carbono

A utilização da fibra de carbono com um reforço em materiais compósitos vem crescendo devido a descoberta e maiores estudos sobre suas propriedades. Dentre as principais características que tornam a fibra uma ótima alternativa de utilização, podemos citar a alta resistência a tração específica, alto módulo de elasticidade e boa resistência ao desgaste (YAO et al., 2018).

A fibras podem ser classificadas em contínuas, longas ou curtas, levando em conta o comprimento da fibra. Materiais reforçados com essas fibras apresentam elevada resistência mecânica combinada a baixa densidade (YAO et al., 2018).

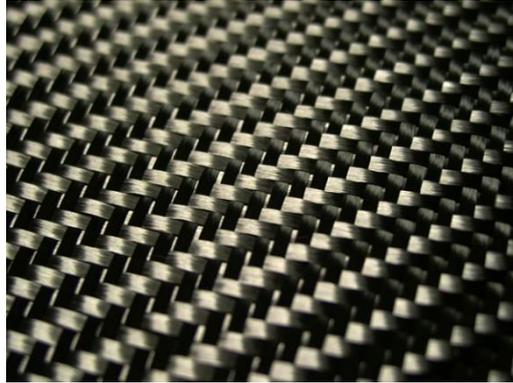
Segundo Neto e Pardini (2006), a manufatura das fibras de carbono é realizada pela pirólise de precursores orgânicos. O primeiro registro de utilização de fibra surgiu nos relatos de Thomas Edison, durante a construção de filamentos de carbono para a criação das lâmpadas elétricas em 1880. Apesar disso, somente na década de 60 deu-se início a produção industrial de fibras de carbono para aplicação aeroespacial.

Como principais precursores das fibras de carbono podemos citar a poliácridonitrila (PAN), piches de petróleo e alcatrão de hulha e fibras de celulose, como o algodão.

Existem uma série de classificações das fibras levando diferentes conceitos, como o módulo de elasticidade, resistência a tração, temperatura de tratamento térmico dentre outros.

Como falado anteriormente o processo de pirólise é o responsável pela criação da fibra, e ele consiste em remoção do oxigênio, nitrogênio e hidrogênio por meio de tratamento térmico das materiais primas. Estudos comprovam que o aumento da cristalinidade e orientação das fibras e redução de defeitos, gera uma fibra com melhores propriedades (NETO; PARDINI, 2006).

### **Figura 12 - Ilustração de fibras de carbono**



Fonte: Barracuda Composites

### 3.2.3. *Compósito de fibra de carbono e resina epóxi*

A combinação da resina epóxi com a fibra de carbono formando um material compósito, vem sendo estudada ao longo dos anos devido a suas características de formar um material com bom desempenho mecânico e econômico. Apesar disso, caso a peça formada precise suportar grandes esforços de alta carga e impacto a peça pode apresentar algumas desvantagens, como baixa tenacidade e alta sensibilidade ao ambiente externo (XIAO et al., 2018).

Como sabe-se a interface de um compósito é decisivo na característica final do compósito, por isso em alguns casos o material formado por epóxi e carbono é o elemento chave para o seu desempenho. Segundo Xiao e colaboradores (2018), para otimizar a interface do material é interessante adicionar além das fibras de carbono, nanotubos de carbono.

**Figura 13 - Exemplo de peça feita com fibra de carbono e resina epóxi**



Fonte: aeroexpo.online

### 3.3. Carenagem ECOFET

#### 3.3.1. Carenagem

A carenagem é considerada a parte de um carro cuja função é estrutural ou como um componente aerodinâmico externo. A palavra vem do latim *carina*, que significa o formato do peito de pássaros de embarcações.

Sua principal função é diminuir o atrito do carro com o ar, ou de embarcações com a água, dando mais proteção para o veículo.

#### 3.3.2. ECOFET

A equipe ECOFET foi fundada em 2007 e faz parte do NEAC (Núcleo de Engenharia Aplicada a Competições) do CEFET-MG. É composta por discentes de diferentes cursos de graduação do CEFET-MG, contando ainda com a orientação e auxílio de professores da instituição e de empresas patrocinadoras. A equipe está sob a orientação do professor Rubens Marcos dos Santos Filho e, atualmente, é composta por alunos dos cursos de Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia Ambiental e Sanitária e Engenharia de Materiais. A equipe desenvolve protótipos a fim de obter uma maior eficiência das partes móveis, melhor rendimento do motor e maior redução de peso, item importantíssimo no que se diz respeito à eficiência energética. Os protótipos são projetados, construídos e testados pelos próprios alunos.

A equipe ECOFET atualmente participa da Shell Eco-Marathon Brasil. O principal objetivo da competição é desafiar estudantes a projetar e construir protótipos que percorram a maior distância com a menor quantidade de energia. Já esteve presente na competição mundial nas edições 2013, ano em que alcançou o 4º lugar e conquistou a marca de 158,7 km/l na categoria etanol, e 2014, que ocorreram em Houston, nos EUA.

#### **Figura 14 - Carro ECOFET**



Fonte: ecofet.com

### 3.4. Técnicas de caracterização

A caracterização de materiais pode ser feita em diferentes escalas, sendo elas: micromecânicas, macromecânicas ou estruturais. Em geral as análises de materiais compósitos visam entender três principais objetivos, que são a determinação de propriedades básicas direcionais da peça, verificação analítica do comportamento mecânico e estudos mais específicos de simulação de ambiente e outras condições (DANIEL; ISHAI, 2006).

Segundo Daniel e Ishai (2006), os experimentos realizados em materiais compósitos apresentam maior complexidade do que para materiais isotrópicos, além disso, necessita que sejam sempre feitas algumas adaptações. Por isso, a literatura apresenta tantos tipos e formatos de testes para este tipo de material.

#### 3.4.1. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Esta técnica de caracterização é uma das mais utilizadas para análise de materiais poliméricos, pois pode fornecer três importantes características do material, sendo elas, estrutura configuracional e conformacional e a composição química.

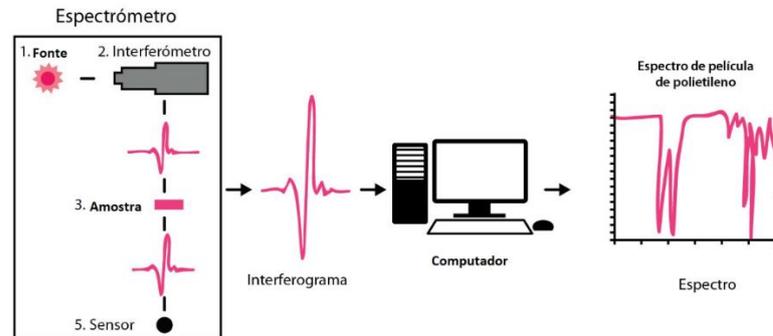
O FTIR tem como base captar a intensidade e frequência da radiação infravermelha absorvida quando um feixe dessa radiação atravessa uma amostra. Quando uma molécula sofre alteração no seu momento dipolar, decorrente dos movimentos de deformação axial e angular, é possível que a radiação do infravermelho seja absorvida (CANEVAROLO, 2010).

Segundo o Prof. Canevarolo (2010), a absorção da radiação acontecido pelo seguinte fato:

A incidência de radiação infravermelha na molécula na mesma frequência de vibração de uma de suas ligações aumentara a amplitude desta vibração, absorvendo parte da energia incidente, reduzindo a

intensidade da radiação transmitida, gerando um espectro de infravermelho característico do material em análise.

**Figura 15 - Esquema de funcionamento da técnica de FTIR**



Fonte: noria.mx

### 3.4.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC) realizado utilizou a técnica de DSC de compensação de potência, que é aquele em que um calorímetro mede a energia envolvida nos eventos térmicos.

O teste funciona com o aquecimento da amostra e da referência em fornos separadas, com a condição de que elas sejam mantidas em condições isotérmicas. Portanto, se a amostra sofre alteração de temperatura por ocorrência endotérmica ou exotérmica, o termopar indica a diferença de temperatura entre ela e a referência, e o equipamento, modifica a potência de entrada de um dos fornos, da amostra ou referência, igualando as temperaturas. A diferença entre o calor da amostra e referência é registrada em função da temperatura ou do tempo (CANEVAROLO, 2010).

### 3.4.3. Análise Termogravimétrica (TG)

A termogravimetria, TG é uma análise térmica em que verifica a perda de massa de uma amostra em função da variação da temperatura ou tempo em uma programação controlada de temperatura.

Com essa técnica é possível verificar a influência da temperatura na amostra, quando ocorre e em que faixa de temperatura ocorre decomposição, degradação, reações de

desidratação, oxidação, combustão ou quando a amostra fica com composição química fixa, definida e constante (CANEVAROLO, 2010).

Com o auxílio de uma termobalança faz-se as medições durante o ensaio da variação da massa, essa balança deve suportar as mais diferentes condições experimentais. As curvas fornecidas pelo experimento possibilitam análise da estabilidade térmica da amostra e composição.

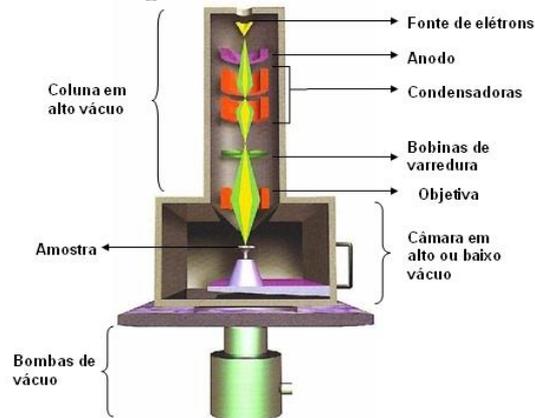
Algumas informações podem ser quantificadas, como variação da massa, mas em alguns casos tem-se resultados empíricos, já que as temperaturas são dependentes de parâmetros relacionados as características da amostra ou fatores instrumentais (CANEVAROLO, 2010).

#### *3.4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura*

O microscópio eletrônico de varredura permite visualização de detalhes menores que 1 nanômetro, quando utilizam feixes produzidos por emissão de campo (FESEM). Ele é adequado para os casos de imagens de estruturas superficiais ou subsuperficiais com dimensões grandes. Proporciona diferentes relevos de alta profundidade e com foco. Por serem imagens tridimensionais facilitam o entendimento e explicação (CANEVAROLO, 2010).

O equipamento de MEV possui uma coluna com fonte de elétrons, lentes eletromagnéticas e bobinas de varredura, sob vácuo. A fonte de elétrons produz os elétrons que são acelerados. As lentes e os diafragmas reduzem o diâmetro do feixe e focaliza-o na superfície do corpo de prova. As bobinas de varredura defletem o feixe e controlam a varredura da superfície (CANEVAROLO, 2010).

A imagem é formada coletando um sinal em função da posição do feixe na amostra.

**Figura 16 - Diagrama de funcionamento de MEV**

Fonte: hudsonzanin

### 3.4.5. *Determinação do Conteúdo dos Constituintes através da Digestão ácida da Matriz.*

Segundo a norma utilizada para realizar a análise de digestão ácida, ASTM D3171, este método determina o conteúdo constituinte de materiais compósitos removendo fisicamente a matriz, por meio de digestão, conseguindo assim separar o reforço sem que ele seja afetado. Com este teste é possível encontrar em peso ou volume a quantidade de reforço e matriz que o material compósito possui.

É importante conhecer o constituinte de um material compósito pois por meio dele é possível modelar as propriedades do material que são afetadas ou pela matriz ou pelo reforço. Além disso, com essa informação pode-se conhecer a qualidade do material fabricado e os processos de fabricação.

Segundo a norma o ensaio pode ser realizado nos tipos de materiais compósitos listados abaixo:

- Matrizes com resina epóxi, aço, cobre ou outras digeríveis por ácido nítrico concentrado.
- Matrizes como epóxi, fenol, poliamida ou resina termoplástica ou outras digeríveis por uma mistura aquosa de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio
- Matrizes como alumínio, latão ou outras digeríveis por solução de hidróxido de sódio.
- Matrizes como aço, titânio, cobre, alumínio ou outras digeríveis por ácido clorídrico.

- Reforços como vidro ou cerâmica que não são afetados por ambientes de alta temperatura ou reforços como o carbono onde a temperatura é adequadamente controlada para que o reforço não seja característico.
- Todos os reforços, particularmente o carbono, que não são afetados a altas temperaturas em atmosfera de nitrogênio e quaisquer sistemas de matriz de resina.

O volume vazio de um material compósito tem grande influência nas propriedades finais do material. Um maior volume de vazio representa geralmente menor resistência a fadiga, facilidade de penetração de umidade e intemperismo, indicando assim, a qualidade da peça.

A ASTM D3171 apresenta vários métodos para encontrar o valor do reforço, no entanto, neste trabalho iremos focar no método que foi utilizado para realização da caracterização do material de resina epóxi com fibra de carbono.

Para tratar os dados obtidos no experimento é necessário realizar os cálculos com base nas equações abaixo.

$$m_{\text{compósito}} = m_{\text{matriz}} + m_{\text{fibra}} \quad (1)$$

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} \quad (2)$$

$$M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (3)$$

Sendo  $M_f$  a fração mássica da fibra e  $M_m$  a fração mássica da matriz,  $m_f$  a massa da fibra,  $m_m$  a massa da matriz e  $m_c$  a massa do compósito.

A fração volumétrica de fibras e da matriz é calculada segundo as equações abaixo:

$$V_f = \frac{M_f \times \rho_f}{\rho_c} \quad (4)$$

$$V_m = \frac{M_m \times \rho_m}{\rho_c} \quad (5)$$

A fração volumétrica de vazios é calculada por  $V_v$ , como mostrado abaixo:

$$Vv = 100 - (Vf + Vm) \quad (6)$$

Sendo  $M_f$  e  $M_c$  as frações mássicas de fibra e matriz, respectivamente,  $r_f$  e  $r_m$  as densidades de fibra e matriz e  $r_c$  a densidade do compósito que pode ser obtida pela técnica de Determinação da Densidade pelo método de deslocamento de líquido.

#### 3.4.6. Determinação da Densidade pelo método de deslocamento de líquido

As normas ASTM D 2734 - 09 e ASTM D 792 - 08 são as utilizadas para obter a densidade de materiais compósitos. O ensaio consiste de uma análise física do material que tem grande importância em uma caracterização pois é empregada para identificar o material, indicar grau de uniformidade entre as amostras usadas e para identificar mudanças físicas.

Essas mudanças físicas podem ocorrer principalmente na matriz polimérica, devido a estrutura, mudança de fase, processamento, degradação e etc. A densidade é importante também como um parâmetro no cálculo da razão resistência por peso e no custo por peso.

A norma utilizada se aplica para compósitos nos quais os efeitos de ignição são conhecidos, sendo eles geralmente, polímeros e reforços em sua maioria. Não se aplica em resinas que não queimam completamente, como silicone, reforços metálicos, dentre outros que possam sofrer variação de peso com temperatura.

As equações utilizadas para determinar a densidade estão descritas abaixo e foram retiradas da norma ASTM D 792 – 08 e D2734 – 09.

Para o cálculo da massa específica do compósito utiliza-se a seguinte equação:

$$Massa\ específica = \frac{a}{a - b} \quad (7)$$

Sendo,  $a$  a massa aparente da amostra no ar e  $b$  a massa aparente da amostra úmida. Para encontrar o valor da densidade experimental, utiliza-se a equação:

$$Densidade\ Experimental = Massa\ específica \times Densidade\ da\ água \quad (8)$$

Para determinação da fração volumétrica de vazios por meio do ensaio de densidade, deve-se primeiramente realizar o cálculo de densidade teórica conforme equação 9 mostrada abaixo e posteriormente utilizar a equação 10 para encontrar o volume de vazios.

$$T = \frac{100}{\left(\frac{R}{D} + \frac{r}{d}\right)} \quad (9)$$

Em que T é a densidade teórica, R é a fração da resina no Compósito (% massa), D a densidade da Resina, r a fração do reforço no Compósito (% massa) e d a densidade do reforço.

$$V = 100 \times \left(\frac{\rho c - T}{T}\right) \quad (10)$$

Sendo, V o conteúdo de vazios, T é a densidade teórica,  $\rho c$  a densidade do compósito.

#### 3.4.7. Ensaio de Tração

O ensaio de tração é o mais popular dos ensaios que tem como objetivo solicitar um polímero de forma estática. Como parâmetros desse ensaio que irão quantificar a resistência mecânica temos o módulo de Young ou de elasticidade, tensão máxima, tensão e deformação no escoamento, tensão e deformação na ruptura, e tenacidade.

Calculando-se a razão entre a força e a área da seção transversal da amostra, encontra-se a tensão. Pode-se utilizar nesse caso a tensão nominal que é calculada com a área da seção inicial, ou seja, antes do ensaio, ou a tensão real, com a área obtida no instante da carga.

O módulo de Young é obtido pela inclinação da curva em valores de deformação de até 0,2%. Esse parâmetro está diretamente ligado a rigidez do material, ou seja, quanto maior o valor encontrado, maior será a rigidez da amostra analisada (CANEVAROLO, 2010).

Os valores de resistência a tração e módulo de elasticidade são os principais resultados que a técnica de tração fornece do material. Utilizando a regra das fases é possível obter um cálculo teórico para os dois parâmetros. Para o módulo de elasticidade teórico máximo e mínimo, utiliza-se as equações 11 e 12. Sendo,  $E_m$  o módulo de elasticidade da matriz de resina epóxi,  $V_m$  a fração volumétrica de matriz,  $E_f$  o módulo de elasticidade da fibra de carbono e  $V_f$  a fração volumétrica de fibras.

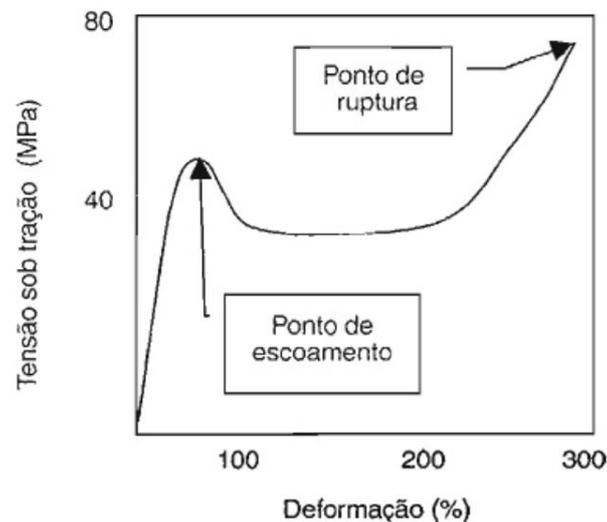
$$E_{max} = E_m.V_m + E_f.V_f \quad (11)$$

$$E_{min} = \frac{E_m \times E_f}{(V_m \times E_f) + (V_f \times E_m)} \quad (12)$$

Para cálculo da resistência a tração teórica, utiliza-se o mesmo formato das equações 13 e 14. Sendo,  $\sigma_m$  resistência à tração da matriz,  $V_m$  a fração volumétrica de matriz,  $\sigma_f$  resistência à tração da fibra e  $V_f$  a fração volumétrica de fibras.

$$\sigma_{max} = \sigma_m \cdot V_m + \sigma_f \cdot V_f \quad (13)$$

**Figura 17 - Exemplo de curva tensão-deformação**



Fonte: (CANEVAROLO, 2010)

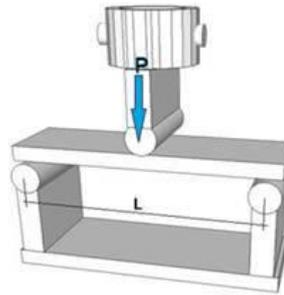
#### 3.4.8. Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão em materiais compósitos é geralmente feito seguindo a norma ASTM D790 e ISSO 178. O método mais comum deste ensaio é o sistema de três pontos, conforme foi utilizado neste ensaio.

Neste sistema de ensaio, a amostra é uma barra retangular que é colocada em dois apoios fixadas em um suporte, e o carregamento feito em um terceiro apoio, no centro dos dois apoios anteriores. As superfícies dos apoios devem ser cilíndricas de forma que evite endentações na peça ou alguma falha de concentração de tensões (CANEVAROLO, 2010).

O ensaio de flexão de três pontos é aplicado em polímeros rígidos e semirrígidos

**Figura 18 - Diagrama ensaio de flexão de 3 pontos**

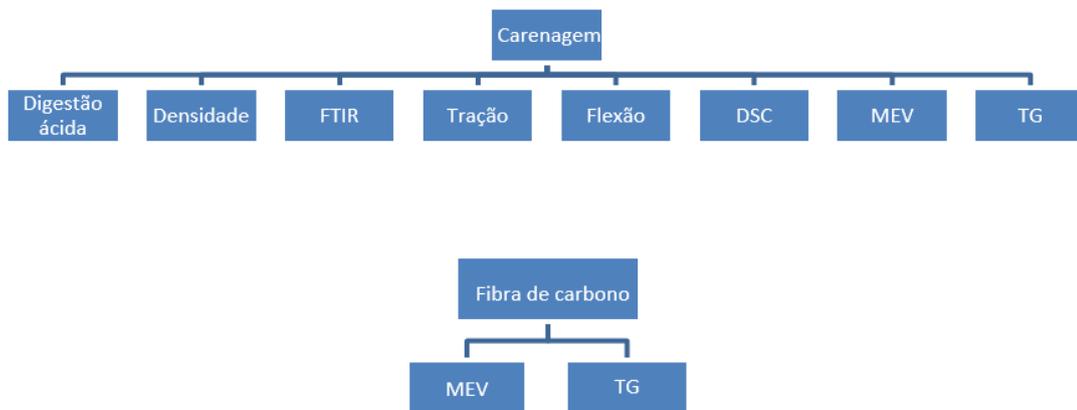


Fonte: scielo

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma abaixo exhibe os experimentos realizados no presente trabalho.

**Figura 19 - Fluxograma dos ensaios realizados na amostra de carenagem e fibra de carbono.**



Fonte: Próprio autor.

##### 4.1. Materiais

Amostras da Carenagem do ECOFET constituída de compósito de Fibra de Carbono/Epóxi. Sendo a resina epóxi utilizada a RESINA EPOXY AR260 com densidade de  $1,15 \text{ g/cm}^3$  e o endurecedor ENDURECEDOR AH260 a fibra de carbono utilizada foi a tecido de fibra de carbono RC200T com densidade característica de fibras de carbono de alto modulo de  $1,78 \text{ g/cm}^3$ .

- Ácido sulfúrico Anidrol concentrado PA 95-98%, Peso molecular 98,08;

- Peróxido de Hidrogênio 50%;
- Acetona;
- Água destilada.

#### 4.2.1. Carenagem ECOFET

A carenagem utilizada pela equipe do ECOFET é produzida de uma matriz de resina epóxi com fibras de carbono, através de um processo de moldagem manual. O projeto não prevê nenhuma análise previa, nem posterior a fabricação, o que influencia significativamente no resultado obtido no desempenho do material.

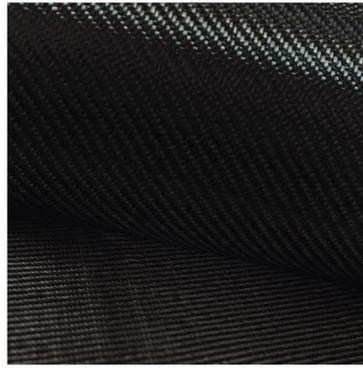
A resina utilizada para a produção do compósito é a RESINA EPOXY AR260 e o endurecedor ENDURECEDOR AH260 do fabricante E-Composites. A resina epóxi é de alta performance, tem baixa viscosidade e ideal para moldagem a vácuo, diferente do que foi realizado.

A proporção da mistura de resina e endurecedor é de 100:26, ela apresenta boas propriedades mecânicas quando curadas à temperatura ambiente e segundo o site do E – Composites, se o sistema for pós curado durante 6 horas a 80 °C ele pode proporcionar uma extrema resistência mecânica e modulo de elasticidade bem maior.

As informações detalhadas dos produtos estão no Anexo 1 e 2 deste trabalho.

A fibra utilizada na fabricação da carenagem é um tecido de fibra de carbono bidirecional, possui trama *Twill* e tem nome comercial TECIDO DE FIBRA DE CARBONO RC200T.

#### **Figura 20 - Fibra de carbono utilizada para fabricação da carenagem**



Fonte: e-composites.com.br

O tecido é bidirecional (0/90) de fibra de carbono com filamentos de alta resistência (240GPa) com 3000 filamentos (3k) e trama do tipo Twill 2x2. É um tecido ideal para laminados de alta performance com alta qualidade de acabamento superficial e proporciona baixa porosidade e impregnação homogênea aumentando o teor de fibras no laminado.

As especificações do tecido estão apresentadas na Tabela 1 abaixo:

**Tabela 1 – Propriedades Fibra de Carbono**

Propriedade	Unidade	Valor
Tipo de fio	-	Carbono 3K, 33MSI
Tipo de trama	-	2/2 Twill
Peso	g/m <sup>2</sup>	197
Espessura	Mm	0,22
Contagem de fios	-	12,5 fios / 25mm

Fonte: E-Composites

As fibras de carbono com essas características são muito utilizadas para aplicações em compósitos de poliméricos avançados. Este tipo de reforço traz ao material propriedades como, elevado módulo de tração, resistência térmicas, entre outros.

Algumas outras aplicações importantes para o tecido de fibra de carbono são os sensores de temperatura e umidade, produtos capazes de coletar dados, como em monitoramento de saúde. São itens que estão crescendo em aplicações e que vem cumprindo com a necessidade da Indústria 4.0 (FORINTOS; CZIGÁNY, 2018).

Segundo o presidente da Associação Brasileira de Carbono, nos últimos anos a demanda por fibras de carbono estava um pouco acima da oferta do mercado, o que acarretou na subida

dos preços deste material. A demanda de fibra de carbono cobre três principais setores, sendo eles o aeronáutico, esportivo e outras indústrias .

As informações detalhadas da fibra comprada estão no Anexo 2 deste trabalho.

#### 4.2.Métodos

As amostras utilizadas nos ensaios foram doadas pela equipe ECOFET do CEFET-MG e foram produzidas por meio do processo de Moldagem Manual. O procedimento experimental adotado consistiu de 3 etapas principais: i) produção do molde; ii) moldagem manual e iii) desmoldagem.

A produção da carenagem pela equipe ECOFET seguiu o seguinte procedimento:

- 1) Produção do molde com projeção em *Solidworks*, determinando tamanho e formato da peça que foi produzida;
- 2) Impressão em molde de madeira e corte com serra;
- 3) Montagem dos moldes de madeira e posterior cobertura com gesso para dar a forma final do molde;

**Figura 21 -Molde para fabricação da carenagem**



Fonte: Próprio autor

- 4) Após o molde pronto foi possível iniciar o processo de Moldagem Manual do compósito.

- 5) Cobriu-se o molde com o tecido de fibra de carbono trançado RC200T da E-Composites de modo que todas a superfície fosse atingida;
- 6) Espalhou-se manualmente a mistura de resina epóxi AR260 e endurecedor AH260 do fabricante E-Composites de acordo com as proporções indicadas pelo fabricante;
- 7) A equipe aguardou um dia para que a cura da resina fosse concluída e fosse possível realizar a desmoldagem.

**Figura 22 - Processamento por moldagem manual da carenagem**



Fonte: Próprio autor

Após receber uma parte da carenagem fabricada, realizou-se o corte da peça nos tamanhos necessários para a aplicação em cada ensaio.

Para realização do corte utilizou-se uma serra eletrônica caseira e seguiu-se a medição dos tamanhos indicados pelas normas para fabricação dos corpos de prova.

## **5. CARACTERIZAÇÃO**

### **5.1. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)**

A amostra de material compósito de carenagem com cerca de 10mg foi analisada em equipamento de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier pela analista responsável do laboratório do Departamento de Química do CEFET-MG.

Os espectros foram obtidos pela técnica de refletância total atenuada (ATR) utilizando o equipamento Shimadzu, modelo IRPrestige-21. As amostras foram analisadas na região do infravermelho entre 4.000 e 400  $\text{cm}^{-1}$ .

### **5.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

A amostra do compósito foi submetida a análise de Calorimetria exploratória diferencial (DSC) para verificação do comportamento térmico do material em analisador Shimadzu DSC-60. A amostra foi cortada em tamanho que coubesse no cadinho de metal do equipamento e media cerca de 10 mg. O procedimento foi feito em aquecimento com temperatura inicial ambiente até 350°C e taxa de aquecimento de 10°C/min. Atmosfera usada foi de nitrogênio de 50mL/min e após atingir a temperatura determinada resfriou-se lentamente.

### **5.3. Análise Termogravimétrica (TG)**

A amostra de material compósito foi analisada em equipamento de DTG-60H pela analista responsável do laboratório do Departamento de Química do CEFET-MG. O ensaio foi

realizado em um cadinho de platina, com uma massa de cerca de 9,939 mg. As condições de ensaio foram: atmosfera de ar (50 mL/min), aquecimento de 30 °C até 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

#### 5.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Realizou-se análise em microscopia eletrônica de varredura para verificação da morfologia da carenagem e da fibra de carbono utilizada como reforço. O procedimento foi realizado em Microscópio Eletrônico de Varredura SUPERSCAN da marca Shimadzu SSX-550 e anteriormente a análise das amostras houve recobrimento metálico com ouro para otimização na captura das imagens. As imagens foram feitas com ampliações diferentes.

**Figura 23 - Microscópio eletrônico de varredura**

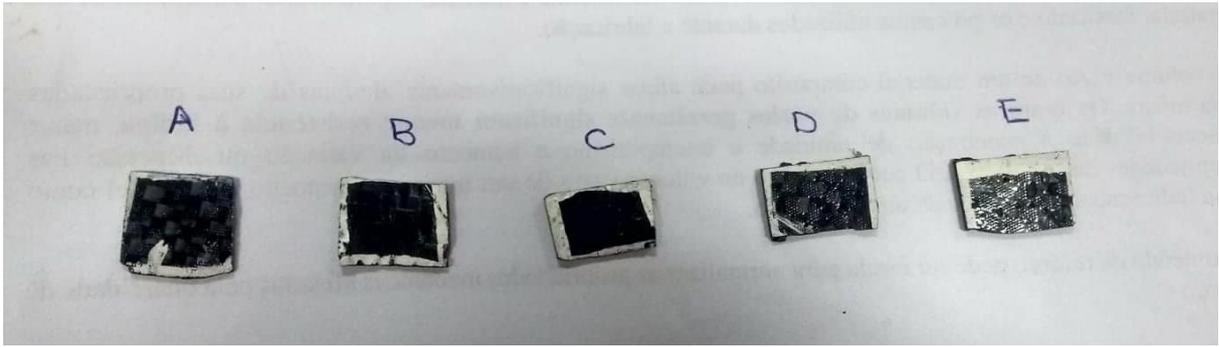


Fonte: Próprio autor

#### 5.5. Determinação do Conteúdo dos Constituintes através da Digestão ácida da Matriz

O ensaio foi realizado seguindo-se o Procedimento B da Norma ASTM D3171-15 e o procedimento experimental consistiu de realizar a digestão ácida da matriz com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio de 5 corpos de prova com dimensões 10mm x 10mm. Os corpos de prova cortados com serra automática encontram-se representados na imagem da Figura 25.

**Figura 24 - Corpos de prova analisados no ensaio de digestão ácida**



Fonte: Próprio autor

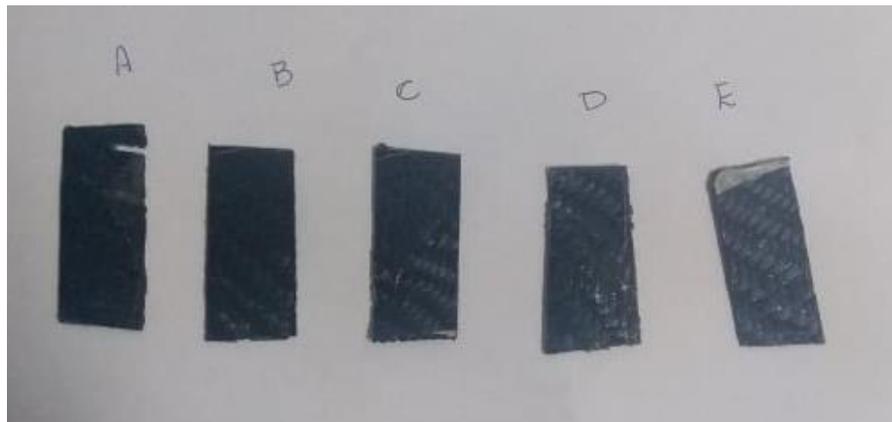
O procedimento adotado consistiu das seguintes etapas descritas abaixo.

1. Pesou-se cada corpo de prova em balança analítica em triplicata (precisão 0,0001 g). – massa do compósito ( $m_{\text{compósito}}$ ).
2. Transferiu-se cada corpo de prova para um erlenmeyer de 250 mL.
3. Adicionou-se 25 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado utilizando uma proveta de 50 mL ;
4. Levou-se o erlenmeyer à chapa quente até que o ácido fumegasse;
5. Quando a solução se tornou escura, por volta de 25 minutos, adicionou a 6 mL da solução de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , cuidadosamente, deixando escorrer devagar pelas bordas do Erlenmeyer; pela parede do erlenmeyer;
6. Aqueceu-se por mais 5 minutos em agitador magnético;
7. Removeu-se o erlenmeyer da chapa e deixou esfriar;
8. Filtrou-se a solução formada em funil de vidro com auxílio de duas folhas de filtro de papel previamente preparado;
9. Lavou-se três vezes com  $\text{H}_2\text{O}$  destilada e uma vez com acetona;
10. Levou-se o material à estufa a  $100^\circ\text{C}$  por uma hora – utilizar uma placa de petri;
11. Pesou-se em triplicata – massa de fibra ( $m_{\text{fibra}}$ ).

### **5.6. Determinação da Densidade pelo método de deslocamento de líquido**

A análise foi realizada em 5 corpos de prova da carenagem seguindo a norma ASTM D 2734 – 09 e ASTM D 792 – 08. Os corpos de prova estão representados na imagem abaixo.

**Figura 25 - Corpos de prova analisados no ensaio de densidade**



Fonte: Próprio autor

O procedimento foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

1. Mediu-se e registrou a temperatura da água colocada no béquer. T: 25,1°C;
2. Pesou-se a amostra seca anotando todas as casas decimais;
3. Montou-se o porta amostra no suporte, e pendurou-se a amostra com o auxílio da gominha e de um clip;
4. Pesou-se o suporte, a porta amostra com clips, gominha e o recipiente;
5. Mergulhou-se a amostra completamente na água do béquer e registrou-se a massa da amostra suspensa;
6. Todas as massas foram medidas em triplicatas.

A temperatura da água foi medida e obteve-se um valor igual 25,1 °C. Utilizando a Tabela 2 abaixo foi determinada a densidade da água igual: 0,9970223g/cm<sup>3</sup>.

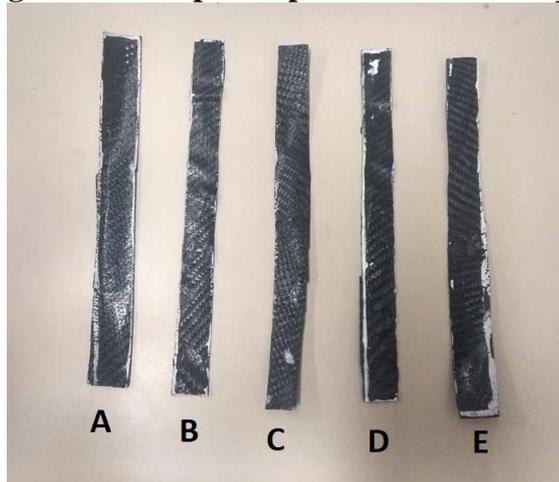
**Tabela 2 - Densidades da água conforme temperatura**

°C	$\rho = \text{kg m}^{-3}$									
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
21	997.9948	9731	9513	9294	9073	8852	8630	8406	8182	7957
22	997.7730	7503	7275	7045	6815	6584	6351	6118	5883	5648
23	997.5412	5174	4936	4697	4456	4215	3973	3730	3485	3240
24	997.2994	2747	2499	2250	2000	1749	1497	1244	0990	0735
25	997.0480	0223	9965 <sup>B</sup>	9707 <sup>B</sup>	9447 <sup>B</sup>	9186 <sup>B</sup>	8925 <sup>B</sup>	8663 <sup>B</sup>	8399 <sup>B</sup>	8135 <sup>B</sup>

## 5.7. Ensaio de Tração

As amostras de carenagem foram submetidas ao ensaio de tração segundo a norma ADTM D3039/D 3039MM, com tamanho de corpos de prova de 250x25mm. O procedimento constituiu em análise de 5 amostras conforme Figura 27 colocadas na Máquina universal Shimadzu AG – X -10 KN.

**Figura 26 - Corpos de prova ensaio de tração**



Fonte: Próprio autor

**Figura 27 - Máquina universal Shimadzu**



Fonte: Próprio autor

O procedimento foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

1. Utilizando-se o paquímetro digital e uma régua, mediu-se todas as dimensões das amostras e determinou-se o comprimento útil como sendo o total menos 10 mm de cada extremidade da amostra;
2. As amostras foram submetidas ao ensaio de tração com a velocidade de 1,3 mm/min;
3. Calculou-se após o ensaio os valores de tensão e deformação convencional através dos dados de força e deslocamento obtido pela máquina para cada amostra durante o procedimento. As equações utilizadas para realização dos cálculos foram:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (14)$$

Onde “F” é a força fornecida pelo ensaio; “A” é a área da seção transversal do corpo de prova; e “ $\tau$ ” é a tensão.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l} \quad (15)$$

Onde “ $\Delta L$ ” é o deslocamento fornecido pelo ensaio; “ $l$ ” é o comprimento útil; e “ $\varepsilon$ ” é a deformação convencional.

$$E = \frac{\tau}{\varepsilon} \quad (16)$$

Onde “E” é o módulo de elasticidade.

4. Após os cálculos, construiu-se as curvas Tensão por Deformação Convencional para cada amostra e identificou-se nelas o limite de escoamento, traçando uma reta paralela ao seu regime plástico e que cruza o eixo x no ponto equivalente a deformação convencional de 0.002.
5. Nos dados coletados identificamos também o maior valor de tensão, que é referente ao Limite de Resistência à Tração (LRT). Para encontrar o módulo de elasticidade do material, traçamos uma reta na região referente ao regime elástico e obtivemos a inclinação da mesma.

## 5.8. Ensaio de Flexão

Cinco amostras do compósito com tamanho de 80 por 10 mm foram submetidas ao ensaio de flexão segundo a norma ASTM D790 (80x10mm). O procedimento utilizou a Máquina universal Shimadzu AG – X e método dos três apoios.

O procedimento foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

1. Assim como no ensaio de tração, o ensaio de flexão foi realizado em 5 amostras da carenagem cortadas segundo a norma D790-03 no tamanho de 80x10mm.
2. Utilizando-se o paquímetro digital e uma régua, mediu-se todas as dimensões das amostras;
3. Utilizou-se o método dos 3 pontos, colocando-se a carga da máquina no centro do corpo de prova e os outros dois pontos 25mm do centro, conforme mostra a Figura X.
4. Além dessas medidas, foi determinada a distância entre os apoios da máquina (L), como sendo 50mm. É recomendável que esse valor seja 6 a 15 vezes maior que o valor da espessura do corpo de prova.
5. A equação usada para calcular a tensão de flexão usada na elaboração dos gráficos foi:

$$\tau = \frac{M_{fletor} * C}{I_{cg}} \quad (17)$$

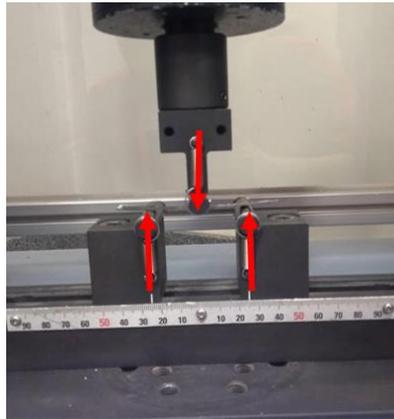
Em que  $M_{fletor}$  representa o momento fletor,  $C$  representa metade da espessura e  $I_{cg}$  o centro de inércia do corpo de prova, que para corpos retangulares tem valor de  $\frac{bh^3}{12}$ .

A deformação é calculada como:

$$Deformação_{flexão} = \frac{6tY}{L^2} \quad (18)$$

Sendo  $Y$  = flecha (mm) ou deslocamento (mm);  $t$  = espessura (mm) e  $L$  = distância entre apoios (mm).

### Figura 28 - Corpo de prova no ensaio de flexão



Fonte: Próprio autor

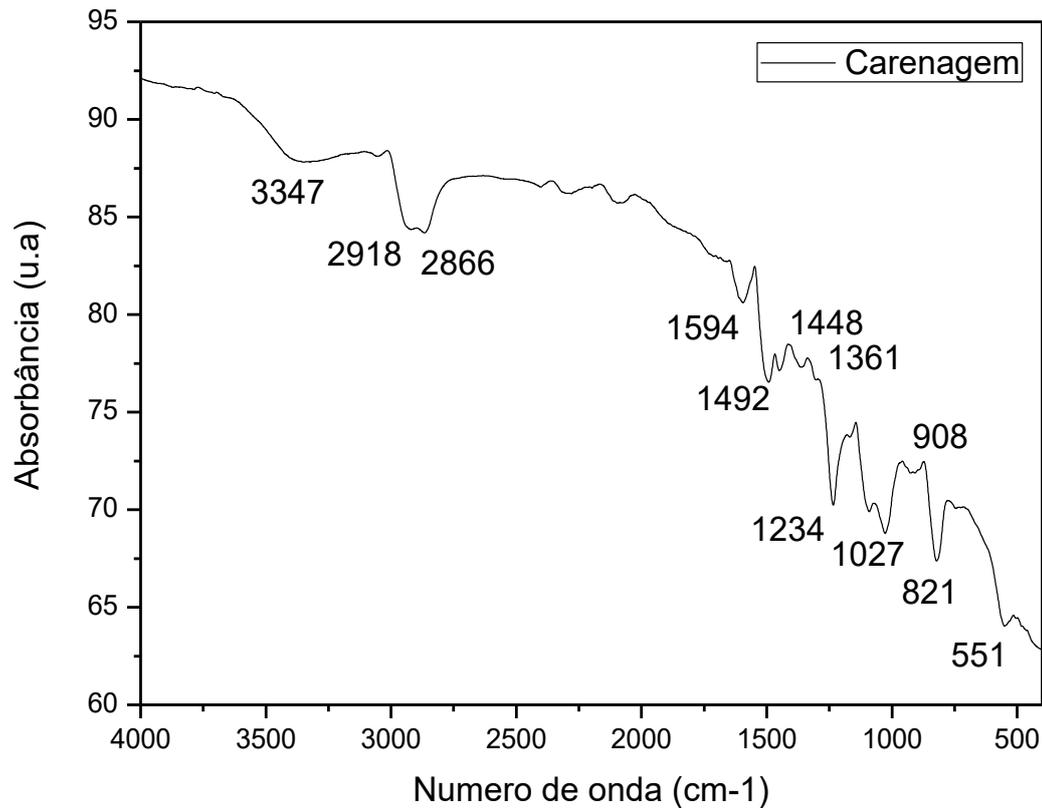
6. As amostras foram submetidas ao ensaio de flexão na máquina universal com a velocidade de 1,7 mm/min;
7. Após o ensaio a máquina universal forneceu os resultados que foram tratados e serão apresentados no 5.5.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 30 exibe o espectro na região do infravermelho para o compósito de fibra de carbono/epóxi.

**Figura 29 - FTIR carenagem**



Fonte: Próprio autor

Os principais picos identificados são exibidos na Tabela 3:

**Tabela 3 - Bandas na região do infravermelho do compósito de fibra de carbono/epóxi**

Bandas (cm <sup>-1</sup> )	Deformações e vibrações
2918, 2866	Deformações axiais assimétricas e axiais simétricas, respectivamente para grupos metila e metileno
1594	Deformações axiais das ligações carbono-carbono do compósito aromático
1492	Deformação axial das ligações C=C do anel
1237	Deformação angular assimétrica de CH <sub>2</sub> de éteres aromáticos Aril-O-CH <sub>2</sub> .

1361	Deformação angular do grupo CH <sub>3</sub>
1234	Deformação axial C-O-C
1027	Deformação angular no plano C-H.
821	Vibração de deformação angular fora do plano das ligações C-H de carbono aromático.

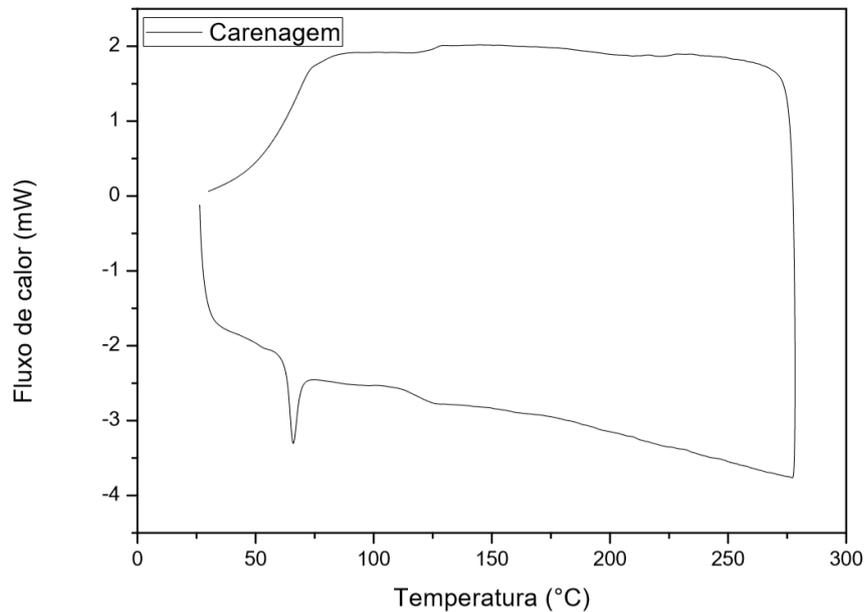
---

A banda 3347 cm<sup>-1</sup> pode ser atribuída ao estiramento simétrico da ligação OH. As bandas de 2918 e 2866 cm<sup>-1</sup> são características da metila, de deformações axiais assimétricas e simétricas do grupo C-H. Em 1594 cm<sup>-1</sup> a banda é referente as deformações axiais das ligações carbono-carbono do composto aromático e 1492 cm<sup>-1</sup> tem-se a banda de absorção que representa a deformação axial das ligações C=C do anel, cobertas pela deformação angular simétrica no plano de CH<sub>2</sub> em 1448 cm<sup>-1</sup>. Em 1027 cm<sup>-1</sup> tem-se a deformação angular no plano C-H. Em 826 cm<sup>-1</sup> banda devido aos carbonos aromáticos que possuem a vibração de deformação angular fora do plano das ligações C-H. (Silverstein, 2000) (Meure, 2010). Não foram identificadas banda referentes à fibra de carbono na região do infravermelho analisada.

Foi possível identificar uma pequena banda centralizada no comprimento de onda igual a 908 cm<sup>-1</sup> que ser atribuída a grupos epoxídicos indicando que a cura da resina não foi completa (Silverstein 2000).

## 6.2. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O resultado da análise de calorimetria exploratória diferencial é exibido no gráfico da Figura 31.

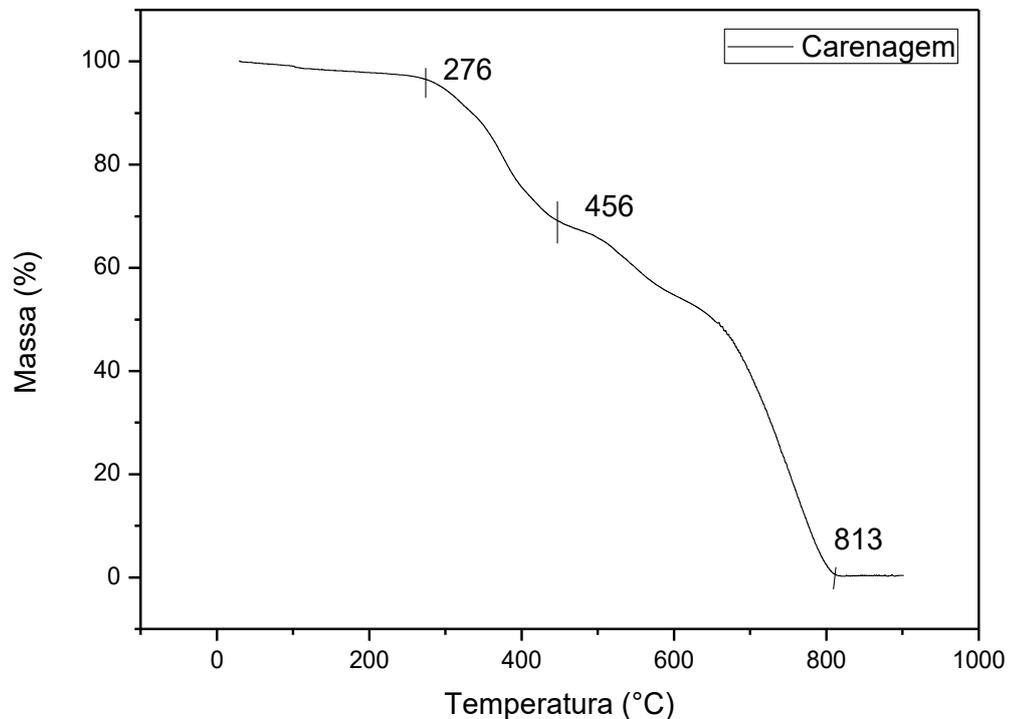
**Figura 30 - Curva de DSC obtida para o compósito de fibra de carbono/epóxi**

No Gráfico acima é possível identificar apenas um pico que pode ser atribuído a  $T_g$  da resina epóxi em  $65,2^\circ\text{C}$ . De acordo com dados da literatura, valores de  $T_g$  para resina epóxi encontram-se entorno  $73^\circ\text{C}$  quando as amostras foram submetidas a tratamento térmicos e agentes de cura. As amostras analisadas neste trabalho não receberam tratamento térmico, mas foram utilizados na preparação um agente de cura, endurecedor. Essa é a possível causa de o valor encontrado de  $65,2^\circ\text{C}$  estar um pouco abaixo (SILVEIRA, 2009).

Não foi observado um pico endotérmico na região de  $100 - 300^\circ\text{C}$  que é esperado quando a matriz exibe um grau cura parcial. De acordo com o FTIR era esperado o compósito exibiu um grau de cura elevado, porém não foi completo. O comportamento exibido pela análise de DSC pode estar relacionado com uma baixa sensibilidade do equipamento ou ainda com a heterogeneidade da cura da matriz ao longo da peça.

### 6.3. Análise Termogravimétrica (TG)

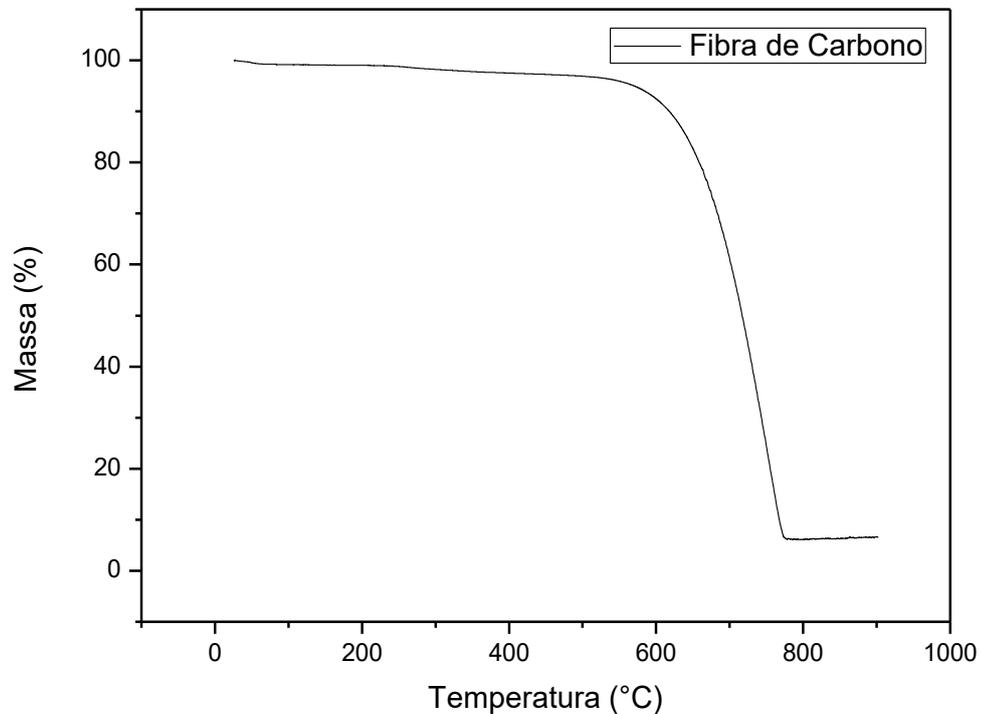
Os gráficos de Análise Termogravimétrica obtidos para o compósito e a fibra são exibidos nas Figuras 32 e 33.

**Figura 31 - Curva TG da amostra de carenagem**

Podemos observar pelo gráfico que até a temperatura de 276°C a amostra é termicamente estável, já que não houve grande variação de massa nesse intervalo. Essa temperatura pode ser chamada  $T_i$ , em que as variações acumuladas de massa totalizam o valor que a balança é capaz de detectar e inicia-se o processo de decomposição térmica.

Em 813°C tem-se a temperatura  $T_f$ , sendo a temperatura em que as variações acumuladas de massa atingem o valor máximo, tendo o término da decomposição térmica e novamente uma substância com estabilidade térmica e não variação da massa (CANEVAROLO, 2003).

Segundo (KUMAR et al., 2017) podemos identificar duas etapas de processos pela TG da resina epóxi, a primeira é a degradação e depois a cisão da cadeia. O primeiro estágio que ocorre a 276°C pode ser atribuído a quebra da resina epóxi não reagida ou outros traços de impureza. Acima de 456°C ocorre a maior perda de massa devido a degradação térmica das ligações cruzadas da resina epóxi curada.(BELLENGER et al., 1984) (Park, 2004).

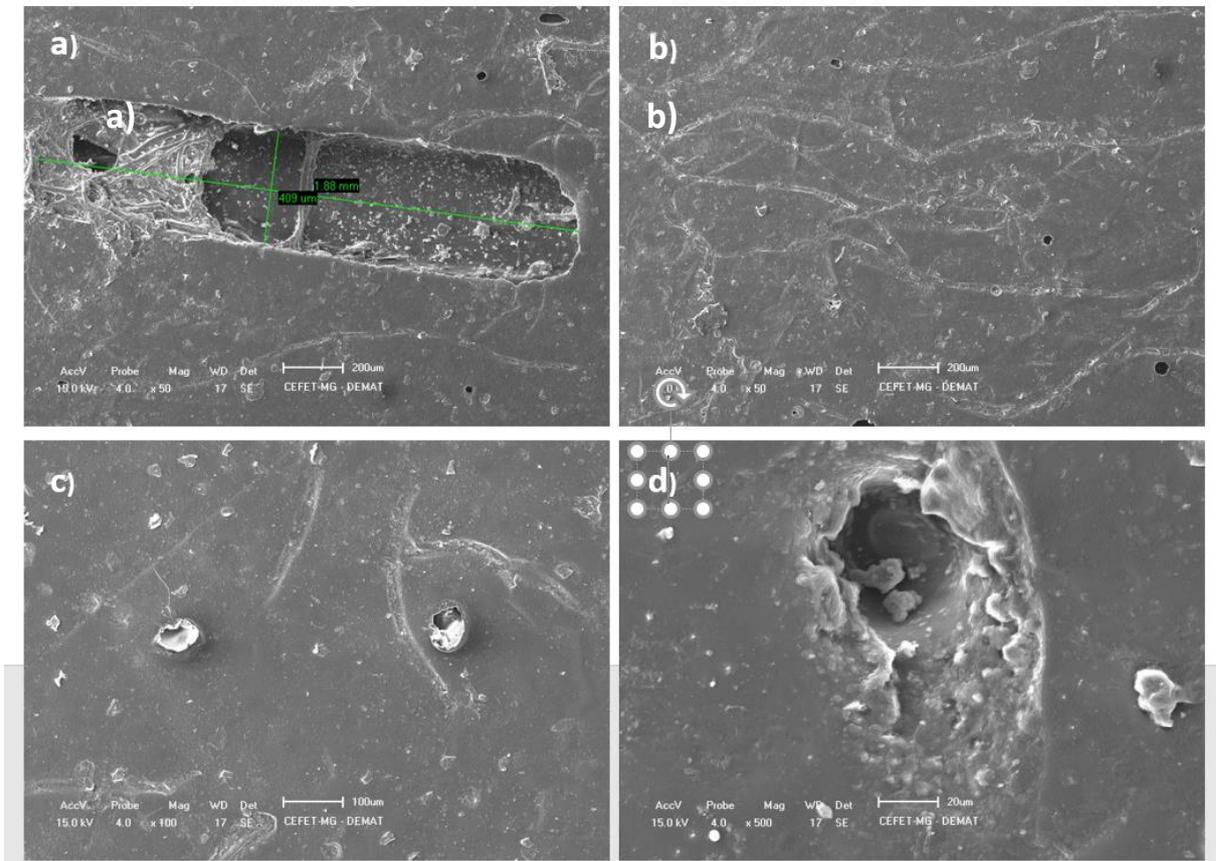
**Figura 32 - Curva TG da amostra de fibra de carbono**

Observa-se no Gráfico 6 de TG da fibra de carbono que houve quase total decomposição do material. A fibra se mantém estável até a temperatura de 600°C, o que é esperado e após essa temperatura tem um grande consumo de massa. Esse fenômeno é explicado devido ao ensaio ter sido realizado em atmosfera oxidante que causou a degradação do carbono.

#### 6.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens de MEV são exibidas nas Figuras 34 e 35.

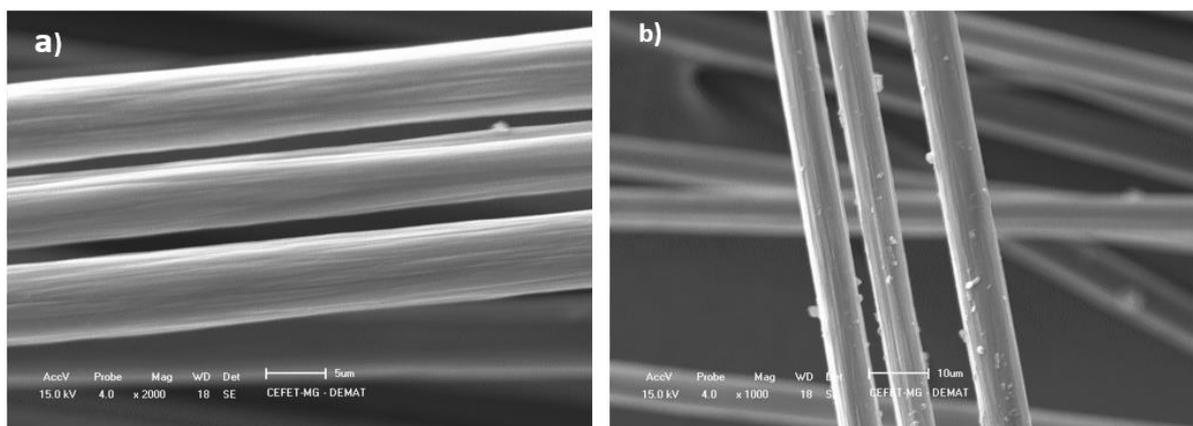
**Figura 33 - Imagens do MEV mostrando a superfície da carenagem**



Fonte: Próprio autor.

- a) Ampliação de 50x, mostrando poro alongado. b) Ampliação de 50x, matriz e reforço. c) 100x matriz e reforço. d) 500x poro circular

**Figura 34 - Imagens do MEV mostrando as fibras de carbono**



Fonte: Próprio autor.

- a) 2000x Fibra de carbono. b) 1000x fibra de carbono.

Na imagem a) da Figura 34 podemos visualizar um grande poro alongado com dimensão de 1,8mm por 409um. Os vazios encontrados em formato alongado, são geralmente, encontrados na interface das camadas de matriz e fibra, causando defeitos interlamelares, já os defeitos arredondados como mostrado na Figura 34c são normalmente característicos de interior das camadas. Quando o defeito ocorre no interior entende-se como principal motivo a impregnação incompleta da fibra na matriz, podendo ocorrer retenção de ar e liberação de algum volátil (Marinucci & Andrade, 2003).

Em b) é mostrado a matriz com suas fibras de carbono demonstrando uma superfície homogênea, o que traz boas características para o compósito, em c) podemos observar pequenos poros e em d) um grande poro circular, que aparenta ter sido causado por um arranchamento da fibra de carbono, indicando uma possível fraca adesão entre matriz e reforço que pode ser o responsável pelas propriedades mecânicas piores que o esperado.

Na Figura 35 a) e b) temos imagens das fibras de carbono com algumas incrustações provavelmente provenientes do processo de moldagem manual, como impurezas, mas apresentam uniformidade, cilíndricas e com diâmetro regular.

## **6.5.Determinação do Conteúdo dos Constituintes através da Digestão ácida da Matriz e Densidade do Compósito**

### *6.5.1 - Obtenção das frações mássicas*

O ensaio de digestão ácida foi realizado com o objetivo de determinar a fração volumétrica das fibras, matriz e vazios no compósito de fibras de carbono/epóxi. O aspecto da fibra após o procedimento pode ser observado na Figura 36.

### **Figura 35 - Fibra de carbono após a digestão ácida**



Fonte: Próprio autor

Os valores médios das massas de compósito, massas de fibra foram anotados após a digestão e a massa de matriz obtida como a diferença entre massa de compósito e massa de fibra.

**Tabela 3 - Massa de compósito, massa de fibras obtidas após a digestão da matriz e massa de matriz.**

<b>Amostras</b>	<b><math>m_{\text{compósito}}</math></b>	<b><math>m_{\text{fibra}}</math></b>	<b><math>m_{\text{matriz}}</math></b>
<b>A</b>	0,1338	0,0522	0,0816
<b>B</b>	0,1229	0,0514	0,0715
<b>C</b>	0,1306	0,0881	0,0425
<b>D</b>	0,1458	0,0547	0,0911
<b>E</b>	0,1579	0,203	-0,0451

A partir dos dados e das equações 1, 2 e 3, calculou-se a fração mássica de cada componente do compósito. Os valores encontram-se representados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Fração mássica**

<b>Amostras</b>	<b><math>M_f</math></b>	<b><math>M_m</math></b>
<b>A</b>	0,3901	0,6099
<b>B</b>	0,4182	0,5818
<b>C</b>	0,6746	0,3254
<b>D</b>	0,3752	0,6248
<b>E</b>	1,2856	-0,2856

Para os cálculos da média das frações mássicas os valores de amostra C e E que se mostraram muito distantes dos restantes foram desprezados. As frações mássicas médias obtidas foram iguais a  $M_f = 0,3947$  e  $M_m = 0,6055$ .

### 6.5.2. Determinação da Densidade e Fração Volumétrica

Os resultados obtidos para o ensaio do método de obtenção da densidade pelo método de deslocamento do líquido são apresentados na Tabela 5 e 6.

**Tabela 5 - Massa das amostras secas**

Amostras	Massa 1 (g)	Massa 2 (g)	Massa 3 (g)	Massa Média (g)
A	0,5403	0,5399	0,5398	0,5400
B	0,5677	0,5675	0,5650	0,5667
C	0,5905	0,5902	0,5899	0,5902
D	0,5323	0,5322	0,532	0,5322
E	0,5022	0,5021	0,5020	0,5021
<b>Média Total: 0,5462</b>				

**Tabela 6 - Massa das amostras imersas na água**

Amostras	Massa 1 (g)	Massa 2 (g)	Massa 3 (g)	Massa Média (g)
A	0,2170	0,2005	0,2207	0,2127
B	0,2416	0,2442	0,2580	0,2479
C	0,2208	0,2199	0,2205	0,2204
D	0,1968	0,2145	0,1946	0,2020
E	0,1958	0,1963	0,1970	0,1964
<b>Média Total: 0,2159</b>				

A densidade foi calculada de acordo com as equações 7 e 8, os valores de massa das amostras secas e úmidas das tabelas 5 e 6 e a densidade da água, obtendo-se uma densidade para o compósito igual a  $1,6485 \text{ g/cm}^3$ .

A partir das equações de 4 a 8 e o valor de densidade de compósito obtida acima, foi calculada a fração volumétrica de fibra, matriz e vazios. Os dados são apresentados na tabela 7.

**Tabela 7 - Resultados de frações volumétricas por digestão ácida e medida de densidade pelo método de deslocamento de líquido**

Constituintes	Fração volumétrica (%)
Fibra	42,56
Matriz	42,24
Vazios	15,20

Calculou-se também a fração volumétrica de vazios através das equações 9 e 10, que utiliza os dados teóricos da produção do compósito, levando em consideração a fração mássica utilizada para a produção do compósito,  $M_f = 0,5$  e  $M_m = 0,5$ . Com esses dados obteve-se a densidade teórica igual a  $1,3973 \text{ g/cm}^3$ .

Aplicando o valor da densidade teórica na equação 10, foi encontrada a fração volumétrica de vazios igual a 17,98%, que é um valor compatível com aquele obtido pela técnica de digestão ácida.

Analisando os dados encontrados pela digestão ácida e densidade, podemos assumir que a moldagem manual realizada pela equipe ECOFET apresentou valores esperados de frações volumétricas para este tipo de técnica. Segundo Neto e Pardini (2006) tratando-se de moldagem manual, o esperado é a fabricação de compósitos que apresentam uma fração volumétrica de reforço menor que 40%, o que fica bem próximo do encontrado, de 42,56%, e é comum encontrar frações volumétricas de vazios de até 15%.

Conforme descrito no item 3.3.3 Carenagem ECOFET, o planejado pela equipe e a proporção indicada de mistura do fabricante é de 1:1 de resina e fibra em massa e como é possível verificar nos valores de fração mássica de matriz e fibra da Tabela 2. Os valores de

fração mássica obtidos para o compósito foram iguais a 61% de matriz e 39% de fibra. Essa diferença pode estar relacionada com perdas de fibras durante a manipulação do material ou ainda uma baixa precisão dos equipamentos utilizados para a pesagem dos materiais. Em relação a fração volumétrica de fibras (42%) o valor obtido é maior que o esperado para a técnica de processamento adotada, entretanto a fração volumétrica de vazios (15%) está de acordo com os valores esperados.

Os materiais compósitos utilizados em componentes estruturais, como é o caso, devem possuir controles rigorosos das frações volumétricas dos constituintes, pois eles influenciam diretamente na resistência mecânica e módulo de elasticidade. Os vazios quando em grandes proporções podem ser causadores de propagação de trinca e geração de falhas do material, o formato deles também tem grande importância (Marinucci & Andrade, 2003).

Já as densidades para o compósito de epóxi/carbono encontrados na literatura, segundo o site (TEXIGLASS, 2018) é igual  $1,50 \text{ g/cm}^3$  o que se aproxima da densidade encontrada pelo método de deslocamento de líquido, que foi de  $1,65 \text{ g/cm}^3$ .

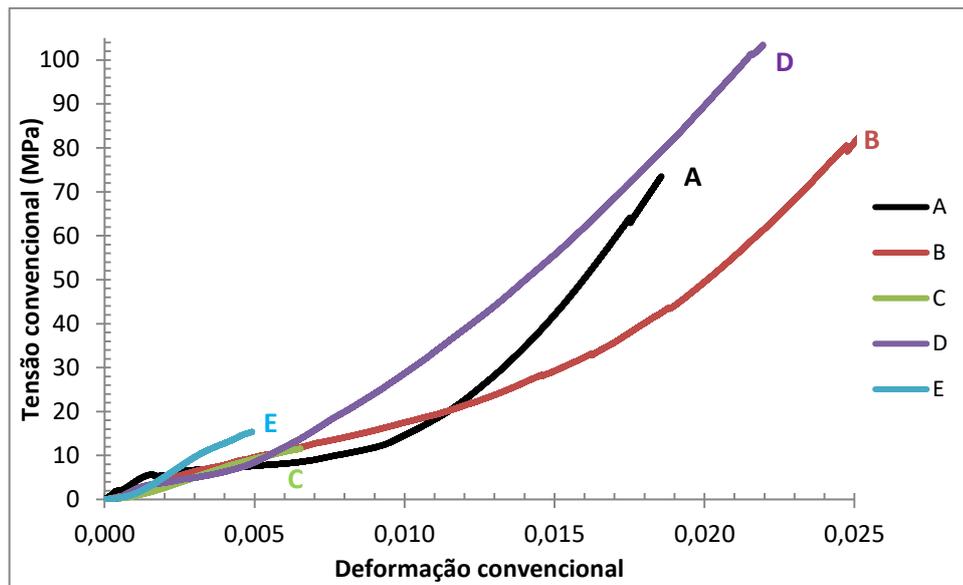
Observou-se durante as medidas na balança analítica que a amostra E apresentou alguma interferência de medição, provavelmente causada por contaminação do filtro de papel utilizado e que acarretou em uma amostra após a digestão maior do que a amostra anterior. Dessa forma, os valores da amostra E foram desconsiderados nos cálculos.

Durante a realização do ensaio encontrou-se dificuldade para transferência do líquido com a digestão para o filtro de papel que era utilizado. Como a mistura da digestão era extremamente ácida, por mais que se esperasse um longo tempo até que a mistura esfriasse, durante a filtração, o filtro de papel era corroído pelo ácido sulfúrico e gerava impurezas no filtrado que seria posteriormente pesado.

## **6.6. Ensaio de Tração**

Os ensaios de tração realizados nas 5 amostras de compósito apresentaram os resultados abaixo de curva tensão deformação convencional.

### **Figura 36 - Ensaio de Tração das 5 amostras de carenagem**



**Tabela 8 - Resultados ensaio de tração**

	A	B	C	D	E
<b>LRT* (MPa)</b>	73,54	84,03	11,52	103,47	15,38
<b>Deformação na ruptura (%)</b>	1,86	2,54	0,65	2,20	0,49
<b>Modulo de Elasticidade (GPa)</b>	3,37	2,98	1,99	4,83	3,59

As curvas das amostras demonstram que como já esperado o compósito por ser produzido a partir de uma matriz polimérica termorrígida apresenta apenas a deformação elástica e se rompe ao atingir seu limite de deformação, nessa região a deformação é diretamente proporcional a carga. O material apresentou, portanto, comportamento frágil, pois seu módulo de elasticidade é baixo e não apresenta ponto de escoamento (CANEVAROLO, 2003). Esse comportamento não é muito indicado para a função da carenagem que é estrutural, apesar de cumprir bem o papel de ter baixo peso, aumentando a eficiência energética do carro.

As curvas das amostras C e E apresentaram comportamento totalmente discrepantes das outras amostras. Provavelmente decorrente das dimensões do corpo de prova, o corpo de prova C, principalmente, possuía um afinamento na base, como é mostrado na Figura 31.

Conforme apresentado na Tabela 8 e já mencionado acima, os valores encontrados para as amostras A, B e D se mostraram mais similares enquanto os das amostras C e E estão

discrepantes. O limite de resistência a tração esperado segundo Rezende et al. (2011) seria de 900MPa para um material compósito de fibra de carbono/epóxi, no entanto, utilizando um pré-impregnado, o que se diferencia bastante da produção por fibra seca em Moldagem Manual. Segundo experimentos de Gastelum et al. (2018) também em compósito de fibra de carbono seca (0/45), com resina epóxi, por meio da Moldagem a Vácuo, o encontrado de resistência a tração foi de 230MPa e deformação de 3,5%.

O módulo de elasticidade foi calculado pela inclinação das curvas, pegando se dois pontos conhecidos de tensão e deformação para encontrar a inclinação. Os valores encontrados de cerca de 3 e 4 GPa, corroborando com alguns resultados da literatura quando se trata de fibras transversais, como no site ATCP Engenharia Física que informa que compósitos com fibras transversais apresenta módulo de elasticidade de 6GPa.

No entanto, segundo os testes realizados por Rezende et al. (2011) os módulos de elasticidade deste tipo de compósito deveriam apresentar valores entre 50 e 70 GPa.

Segundo Morell et al.(2010) o módulo de elasticidade ou módulo de Young da resina epóxi sem reforço pode chegar a 3,8GPa, sendo esse o valor próximo do que encontramos no ensaio de tração para o nosso compósito já reforçado com as fibras de carbono. Os valores de modulo de elasticidade e resistência a tração do compósito seriam bem maiores caso as fibras fossem unidirecionais e no sentido da força aplicada pelo ensaio.

Os valores baixos de resistência do material compósito encontrados, são provavelmente explicados pela técnica de moldagem manual que acarreta em baixa aderência entre matriz e reforço, como pode ser comprovada também nas imagens no MEV.

Para maiores comparações, realizou-se também os cálculos de módulo de elasticidade e resistência a tração teóricos mínimos e máximos. Estes cálculos foram realizados utilizando os valores de resistência e módulo informados nas fichas técnicas do fabricante, conforme Anexo 1 e 2 e as frações volumétricas do ensaio de digestão ácida.

Os resultados estão apresentados na Tabela 9 e confirmam que o compósito possui resistência mecânica muito abaixo do esperado. Os valores de módulo e de resistência a tração ficaram menores até mesmo do que os mínimos teóricos.

**Tabela 9 – Módulo de elasticidade e Resistencia a tração teóricos**

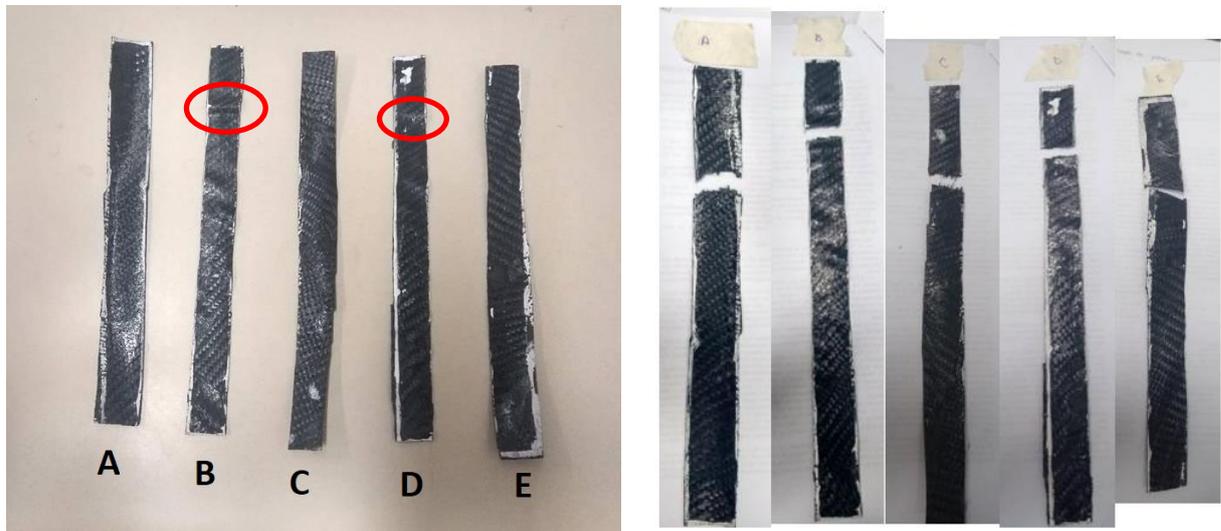
$E_{\max}$ (GPa)	$E_{\min}$ (GPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
103,47	7,38	1222,84

O ensaio de tração realizado conforme norma D 3039/D 3039M não utilizou o modelo de corpo de prova com o formato de empescoamento, isso pode ser feito por se tratar de material compósito, tornando assim o comprimento total da peça o comprimento útil usado para os cálculos.

Os corpos utilizados para o ensaio foram cortados com serra manual e por isso não apresentaram exatamente as mesmas dimensões, além disso, o material cedido pela equipe ECOFET já estava moldado no formato que seria utilizado no carro de corrida, dessa forma foi difícil encontrar regiões totalmente planas da peça que pudessem gerar corpos de provas sem ondulações ou imperfeições.

Como pode ser observado na Figura 38, os cinco corpos de prova romperam praticamente na mesma altura, na parte em que a garra superior estava mais próxima. É perceptível também ao comparar as amostras após ensaio com as amostras antes que a B e D romperam exatamente no ponto que existia uma grande ondulação e provavelmente um ponto de baixa quantidade de resina curada.

**Figura 37 - Amostras antes e depois do ensaio de tração**



Fonte: Próprio autor

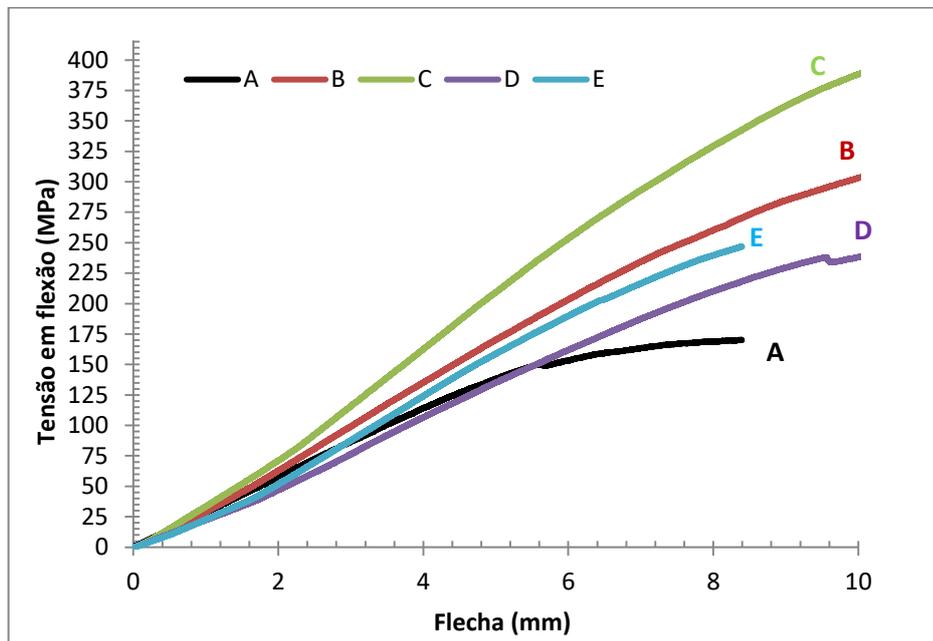
Com os resultados entende-se que o ideal teria sido realizar o ensaio com o auxílio de lixas nas pontas das amostras em contato com a garra, essa modificação poderia trazer resultados mais satisfatórios e com rupturas ao longo do corpo, já que durante o ensaio, observou-se que a amostra C se soltou da garra e foi necessário colocá-la novamente.

### **6.7. Ensaio de Flexão**

O ensaio de flexão foi realizado segundo norma ASTM D790 e utilizou o método de três pontos.

Os corpos de prova foram cortados utilizando serra manual, o que acarretou em dimensões irregulares e não perfeitas. Além disso, a parte da carenagem cedida pelo ECOFET já estava moldada para uso o que impactou em conseguir superfícies planas para confecção das amostras.

**Figura 38 - Ensaio de Flexão das 5 amostras de carenagem**



**Tabela 10 – Resultados Ensaio de Flexão na carenagem**

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Resistência à Flexão (MPa)</b>	170,19	326,49	415,62	266,83	246,81
<b>Flecha na tensão máxima (mm)</b>	8,39	11,94	13,66	13,93	8,40

Segundo experimentos realizados por Rezende et al. (2011) em compósitos de resina epóxi e fibra de carbono de diferentes tipos, mas todos pré-impregnados, os valores de resistência a flexão encontram-se entre 800 e 1100Mpa, variando com a direção da fibra e tipo de resina. Os valores encontrados pelo método de moldagem manual se mostraram bem menores justamente devido a técnica de produção.

## 7. CONCLUSÃO

Foi possível realizar a caracterização do compósito carenagem de resina epóxi reforçado com fibra de carbono da equipe ECOFET.

A análise de FTIR do compósito comprovou os picos características da resina epóxi e apresentou um pico que pode ser atribuído a um pequeno grau de resina não curada ou a um ruído da curva. Por meio do DSC pode ser comprovado que caso o pico simbolize não cura, a quantidade era tão pequena que não foi identificado pico exotérmico característico de não cura de resina na calorimetria exploratória diferencial. Portanto, é possível considerar que houve uma boa cura da resina.

Com a técnica de análise termogravimétrica foi possível comprovar a estabilidade térmica do material até 276°C, que foi ditada pela matriz epoxídica, indicando que o compósito pode ser submetido à altas temperaturas caso seja necessário. Para maior entendimento de outras características térmicas do material seriam necessárias outras técnicas.

Em relação a morfologia do compósito pode se perceber que existe homogeneidade e em algumas regiões foram encontrados poros, provavelmente causados pelos voláteis do processo de cura ou pelo processo de laminação manual. Além disso, houveram regiões de arrancamento de fibra, que podem indicar uma baixa adesão entre fibra e matriz e serem responsáveis pelos baixos valores de propriedades mecânicas encontradas.

As análises físicas de ensaio de tração e flexão revelaram que o material possuía uma grande fragilidade e baixa resistência mecânica a esses esforços quando comparado a outros compósitos de mesma composição na literatura e quando comparado aos valores de módulo de elasticidade e resistência a tração teóricos. Atribuiu-se essas características ao processo de moldagem manual realizado, que traz um alto número de frações volumétricas de vazios, irregularidades na superfície e a possível baixa adesão entre fibra e matriz.

Com os resultados obtidos foi possível direcionar a equipe em quais são as melhores alternativas para otimizar a produção da carenagem e como melhor utilizar as matérias-primas que eles possuem que são de alta qualidade e alto custo.

## 8. REFERÊNCIAS

Almeida, S. F. M.; Nogueira Neto, Z. S. **Effect of void content on the strength of composite laminates**. *Composite Structure*, v. 28, p. 139-48, 1994.

ALTIN KARATAŞ, M.; GÖKKAYA, H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. **Defence Technology**, v. 14, n. 4, p. 318–326, 2018.

BELLENGER, V. et al. Thermogravimetric study of amine cross-linked epoxies. **Polymer Degradation and Stability**, v. 9, n. 4, p. 195–208, 1984.

CANEVAROLO, S. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. 1. ed. [s.l: s.n.].

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros**. 3. ed. São Paulo: [s.n.].

CHEN, P. et al. Adhesion and erosion properties of epoxy resin composite coatings reinforced with fly ash cenospheres and short glass fibers. **Progress in Organic Coatings**, v. 125, n. September, p. 489–499, 2018.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. New York: [s.n.].

FORINTOS, N.; CZIGÁNY, T. Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers – A short review. **Composites Part B: Engineering**, 2018.

GASTELUM, A. N. et al. Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 2, 2018.

GODARA, A. et al. Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/epoxy composites. **Carbon**, v. 47, n. 12, p. 2914–2923, 2009.

HADIGHEH, S. A.; KASHI, S. Effectiveness of vacuum consolidation in bonding fibre reinforced polymer (FRP) composites onto concrete surfaces. **Construction and Building**

**Materials**, v. 187, p. 854–864, 2018.

KIKUCHI, T. et al. Mechanical properties of jute composite by spray up fabrication method. **Energy Procedia**, v. 56, n. C, p. 289–297, 2014.

KUMAR, A. et al. Influence of liquefied wood polyol on the physical-mechanical and thermal properties of epoxy based polymer. **Polymer Testing**, v. 64, n. August, p. 207–216, 2017.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais**. 1. ed. São Paulo: [s.n.].

REZENDE, MIRABEL CERQUEIRA. COSTA, MICHELLE LEALI. BOTELHO, E. C. **Compósitos Estruturais**. São Paulo: [s.n.].

SCHÄFER, J.; GRIES, T. 17 – Braiding pultrusion of thermoplastic composites. **Advances in Braiding Technology**, p. 405–428, 2016.

SEVKAT, E.; BRAHIMI, M.; BERRI, S. The bearing strength of pin loaded woven composites manufactured by vacuum assisted resin transfer moulding and hand lay-up techniques. **Polymers and Polymer Composites**, v. 20, n. 3, p. 321–332, 2012.

TEXIGLASS. **Feiplar Composites**. Disponível em:

<<http://www.feiplar.com.br/coberturas/2014/materiais/palestras/aeroespacial/TEXIGLASS.pdf>>.

XIAO, C. et al. Study on interfacial and mechanical improvement of carbon fiber/epoxy composites by depositing multi-walled carbon nanotubes on fibers. **Chemical Physics Letters**, v. 703, p. 8–16, 2018.

YAO, S. S. et al. Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 142, p. 241–250, 2018.

ZOU, T.; SHI, C.; ZHAO, N. Microwave absorbing properties of activated carbon-fiber felt dipole array/epoxy resin composites. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 13, p. 4870–4876, 2007.

## ANEXO 1

### Ficha Técnica da Fibra de Carbono RC200T da E-Composites:



**RC200T**  
 Datasheet

Descrição

Tecido bidirecional (0/90) de fibra de carbono fabricado na Inglaterra com exclusividade para a Barracuda Advanced Composites, com filamentos de alta resistência (240GPa) com 3000 filamentos (3k) e trama do tipo Twill 2x2. Com uma construção perfeitamente alinhada nas direções principais (0/90 graus) ela proporciona baixa porosidade e impregnação homogênea aumentando o teor de fibras no laminado. O tecido RC200T possui um peso de 200 g/m ideal para laminados de alta performance com alta qualidade de acabamento superficial. O tecido RC200T é embalado em um tubo de 60mm.

Informações Técnicas

Propriedade	Unidade	Valor
Tipo de fio	-	Carbono 3K, 33 MSI
Tipo de trama	-	2/2 Twill
Peso	g/m <sup>2</sup>	197
Espessura	mm	0,22
Contagem de fios	-	12,5 fios / 25mm

Mercados

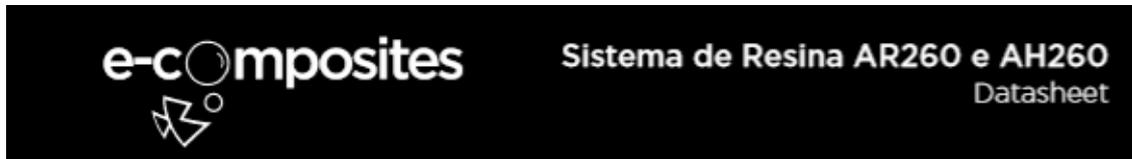
Aeronáutica, Aeroespacial, Recreacional.

Aplicações

Compósitos de baixa pressão, compósitos avançados para aviação.

## ANEXO 2

## Ficha Técnica Resina Epoxi AR260



## Descrição

O sistema de resina epoxy AR260 com endurecedor epoxy AH260 é um sistema de cura rápida, de baixa viscosidade, para uso em laminação manual, laminação a vácuo e infusão.

## Propriedades Mecânicas

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Cor	Visual	-	Âmbar claro
Dureza Shore D	ASTM D-2240	-	87
Resistência à tração	ASTM D-638	MPa	73,77
Módulo de tração	ASTM D-638	MPa	3157,80
Resistência ao alongamento	ASTM D-638	%	8,8
Resistência à compressão	ASTM D-695	MPa	88,94
Resistência à flexão	ASTM D-790	MPa	199,28
Módulo de flexão	ASTM D-790	MPa	2737,22
HDT - Cura a temperatura ambiente	ASTM D-648	°C	58
HDT - Temperatura de pós-cura	ASTM D-648	°C	98
Impacto Izod, com entalhe	ASTM D-256	kJ/m <sup>2</sup>	2,67
Contração	ASTM D-2566	mm/mm	<0,002

## Propriedades de Manuseio

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Densidade da Resina	ASTM E-201	Kg/m <sup>3</sup>	1150,33
Densidade do endurecedor	ASTM E-201	Kg/m <sup>3</sup>	946,63
Viscosidade da Resina a 25°C	ASTM D-2393	cps	1200
Viscosidade do Endurecedor a 25°C	ASTM D-2393	cps	30
Viscosidade Mista a 25°C	ASTM D-2393	cps	300
Viscosidade Mista a 49°C	ASTM D-2393	cps	140
Taxa de mistura por peso (100 A)	Calculado	-	100A : 26B
Gel time a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	290
Pot life a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	120

## Armazenagem e Manuseio

O sistema de resina deve ser armazenado em local seco, entre 15,5 e 37,7°C, e deve sempre ser tampado após o uso. Em caso de cristalização do produto, aquecer à temperatura de 40°C até os cristais se dissolverem e mexer bem depois que o produto estiver liquefeito. Sempre utilize ferramentas limpas e secas para misturar e aplicar os produtos. A mistura deve ser feita cuidadosamente e imediatamente antes do uso, seguindo a taxa de mistura descrita neste datasheet. A temperatura do ambiente não deve ser menor que 16°C durante a mistura.