

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
COORDENADORIA ESPECIAL DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Yuri Hardt Spethamann

Viabilização da Produção de Compósitos Laminados para Utilização em Teares

Blumenau

2022

Yuri Hardt Spethmann

Título: Viabilização da Produção de Compósitos Laminados para Utilização em Teares.

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Dr. Claudio Michel Poffo

Blumenau

2022

Ficha de identificação da obra

Spethmann, Yuri Hardt Spethmann

Viabilização da Produção de Compósitos Laminados para Utilização em Teares. / Yuri Hardt Spethmann Spethmann ; orientador, Claudio Michel Poffo, 2022.

59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Laminação. 3. Fibra de Carbono. I. Poffo, Claudio Michel. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

Yuri Hardt Spethmann

Título: Viabilização da Produção de Compósitos Laminados para Utilização em Teares

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Materiais

Blumenau, 09 de fevereiro de 2022.

Yuri Hardt Spethmann
Estudante

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Claudio Michel Poffo
Data: 18/03/2022 09:53:51-0300
CPF: 052.534.609-00
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Claudio Michel Poffo
Orientador
Professor UFSC Campus Blumenau



Documento assinado digitalmente
Johnny de Nardi Martins
Data: 18/03/2022 09:53:43-0300
CPF: 003.147.250-83
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Jhonny de Nardi Martins
Avaliador
Professor UFSC Campus Blumenau



Documento assinado digitalmente
Leonardo Ulian Lopes
Data: 18/03/2022 10:03:40-0300
CPF: 318.535.948-81
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Leonardo Ulian Lopes
Avaliador
Professor UFSC Campus Blumenau

Este trabalho é dedicado aos meus amigos e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a minha família por todo o apoio durante esta graduação. Gostaria de agradecer também aos meus amigos por me manterem motivados nos períodos críticos e por fim, a empresa B&G Têxtil de Blumenau pela oportunidade de execução deste trabalho.

Viver é arriscar tudo.
(SANCHES, 2020)

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem o objetivo de apresentar um estudo comparativo envolvendo a produção um compósito laminado para utilização em peças de reposição na indústria têxtil. Este trabalho espera contribuir para a solução de um problema industrial recorrente neste ramo, uma vez que, estas peças de reposição não são mais fabricadas e comercializadas pelo fabricante original.

Foram confeccionadas amostras de um compósito de constituintes semelhantes ao da peça original da máquina, através de laminação manual para avaliar a possibilidade de levar este procedimento à escala industrial. Para avaliar a qualidade destas amostras foram realizados ensaios mecânicos de tração e flexão três pontos, possibilitando a caracterização das propriedades mecânicas mais importantes e simulando os esforços que este componente é submetido durante sua utilização nos teares.

Espera-se avaliar a viabilidade do processo de laminação manual para a produção deste componente e, também avaliar a influência nas propriedades mecânicas, utilizando duas gramaturas diferentes de fibra de carbono nas peças produzidas.

Palavras-chave: Compósitos. Fibra de carbono. Laminação.

ABSTRACT

This Course Conclusion Work aims to present a comparative study involving the production of spare parts in the textile industry, using different raw materials. This work hopes to contribute to the solution of a recurring industrial problem in this field, since these spare parts are no longer manufactured and marketed.

Samples of a composite of constituents similar to the original part of the machine were made, through manual lamination to evaluate the possibility of taking this procedure to an industrial scale. To evaluate the quality of these samples, three-point traction and bending mechanical tests were carried out, allowing the characterization of the most important mechanical properties and simulating the efforts that this component is submitted during its use in the looms.

It is expected to evaluate the feasibility of the manual lamination process for the production of this component and also to evaluate the influence on the mechanical properties, using two different weights of carbon fiber in the parts produced.

Keywords: Composites. Carbon fiber. Lamination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Amostra do componente a ser reproduzido.....	15
Figura 2 - Esquema representando um material compósito.	17
Figura 3- Fotomicrografias MEV de superfícies fraturadas de compostos de matriz de polipropileno com fibras de vidro.....	17
Figura 4 - Classificação dos materiais compósitos.....	18
Figura 5- Desenho esquemático de materiais compósitos de acordo com as classificações da disposição das cargas na matriz	18
Figura 6- Comparação da propagação de trinca em um material sem fibras e com fibras, respectivamente	19
Figura 7- Esquema da área de superfície equivalente de uma fibra e uma partícula esférica.....	20
Figura 8- Grupo epóxido	22
Figura 9- Epicloridrina e bisfenol A, respectivamente.....	22
Figura 10 - Processo de produção das fibras de vidro.....	24
Figura 11 – Tear G6200 da marca Sulzer.....	30
Figura 12 - Localização da fita de carbono dentro do Tear G6200 da marca Sulzer. Em vermelho o componente, em azul as roldanas que o tracionam e em amarelo a dimensão da área útil do tear.....	31
Figura 13- Modos típicos de falha durante ensaios de resistência a tração.....	33
Figura 14- Esquemático do ensaio de flexão de três pontos pela ASTM D20.10.	34
Figura 15- Curvas típicas de ensaio de flexão em três pontas em materiais compósitos. Adaptado de (ASTM D20.10).	35
Figura 16- Fibra de carbono unidirecional de alta gramatura, menor gramatura e de vidro respectivamente.....	38
Figura 17- Molde usado para a confecção dos corpos de prova.....	39
Figura 18- Corpos de prova, a direita alta gramatura ao centro de baixa gramatura e a esquerda a amostra original	41
Figura 19- Máquina de ensaios universais EMIC 23-100	42
Figura 20 – Corpos de prova: Alta gramatura, baixa gramatura e amostras base, respectivamente	42
Figura 21- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCAG 1, FCAG 2 e FCAG 3.....	43

Figura 22- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCBG 1, FCBG 2 e FCBG 3.....	44
Figura 23 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova BASE 1, BASE 2 E BASE 3.....	46
Figura 24 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova FCAG 4, FCAG 5 e FCAG 6.	47
Figura 25 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova FCBG 4, FCBG 5 e FCBG 6.....	48
Figura 26 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova BASE 4, BASE 5 e BASE 6.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedade das fibras de vidro A, C E e S.....	25
Tabela 2- Classificação dos diferentes tipos de fibra de carbono.....	25
Tabela 3- Comparação das propriedades mecânicas de compósitos de mesma matriz e	26
Tabela 4- Tabela contendo as especificações do tecido de fibra de carbono utilizado.	37
Tabela 5 - Tabela contendo as especificações do tecido de fibra de carbono utilizado.	37
Tabela 6 - Tabela contendo as especificações do tecido de fibra de vidro utilizado.	38
Tabela 7- Tabela ilustrativa demonstrando o plano de laminação dos corpos de prova.	40
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCAG 1, FCAG 2 e FCAG 3.....	41
Tabela 9- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCAG 1, FCAG 2 e FCAG 3.....	43
Tabela 10- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCAG 1, FCAG 2 e FCAG 3.....	44
Tabela 11- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCBG 1, FCBG 2 e FCBG 3.....	45
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova BASE 1, BASE 2 E BASE 3.....	46
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova FCAG 4, FCAG 5 e FCAG 6.....	48
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova FCBG 4, FCBG 5 e FCBG 6.....	48
Tabela 15- Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova BASE 4, BASE 5 e BASE 6.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C_p	Calor específico
CMC	Compósitos de Matriz Cerâmica
E_f	Módulo de elasticidade em flexão
MMC	Compósitos de Matriz Metálica
PMC	Compósitos de Matriz Polimérica
T_c	Temperatura de cristalização
T_g	Transição vítrea
T_m	Temperatura de fusão
Σf	Tensão de ruptura em flexão

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Comprimento
D	Diâmetro
°C	Graus Celsius
°F	Grau Fahrenheit
%	Porcentagem
W	Fluxo de calor
g/m ²	Gramas por metro quadrado
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
m/s	Metro por segundo
Km/h	Quilômetro por hora
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
kN	Kilo Newton

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	Revisão bibliográfica	16
2.1	Materiais Compósitos	16
2.1.1	Definição e classificação	17
2.1.2	Compósitos reforçados com partículas	19
2.1.3	Compósitos reforçados com fibras	19
2.1.4	Fibras contínuas.....	20
2.1.5	Fibras descontínuas	21
2.2	Compósitos de matriz polimérica	21
2.2.1	Resina epóxi.....	22
2.3	Cargas utilizadas	23
2.3.1	Fibra de vidro.....	23
2.3.2	Fibra de carbono.....	25
2.3.3	Tecido de fibra unidirecional.....	27
2.4	Processamento de materiais compósitos com matrizes termofixas	27
2.4.1	Processo de laminação manual.....	28
2.5	Aplicações.....	28
2.6	SETOR TÊXTIL – TEARES.....	29
2.7	Caracterização Mecânica	32
2.7.1	Ensaio de Tração.....	32
2.7.2	Ensaio de Flexão.	33

3	Metodologia de ensaios.....	35
3.1	Materiais utilizados para a confecção dos compósitos de comparação.	36
3.1.1	Cargas de reforço.....	37
3.1.2	Resina epóxi para laminação manual	38
3.2	Metodologia de confecção dos corpos de prova.....	39
3.2.1	Molde	39
3.2.2	Preparação do molde.....	39
3.2.3	Processo de laminação.....	40
3.3	Ensaio.....	40
3.3.1	Ensaio de tração.....	40
3.3.2	Ensaio de flexão 3 pontos	42
3.4	Resultados.....	43
3.4.1	Resultados do Ensaio de Tração para as amostras de alta gramatura.....	43
3.4.2	Resultados do Ensaio de Flexão 3 pontos para as amostras de alta gramatura.	47
4	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

O setor têxtil é parte fundamental da economia catarinense. Ele é destaque no mercado nacional, onde Santa Catarina assumiu o primeiro lugar no Brasil em produção de vestuário e acessórios, de acordo com um estudo da Confederação Nacional da Indústria (CNI). O Estado ultrapassou São Paulo em valor de transformação industrial no setor têxtil, ao alcançar a marca de R\$ 6,6 bilhões. Com isso, a indústria catarinense respondeu por 26,7% da produção nacional, com base nos dados de 2018 do IBGE.

Com a importância deste segmento, algumas das maiores empresas têxteis da região de Blumenau utilizam um componente de reposição de um modelo específico de tear, a pinça de inserção de trama para os teares da marca Sulzer. Está componente é uma fita de material compósito que necessita ser trocado com regularidade.

Figura 1 Amostra do componente a ser reproduzido.



Fonte: Autor

Tendo em vista este mercado, este trabalho tem o objetivo de avaliar a técnica de laminação manual como uma maneira para a reprodução deste componente em escala industrial. Para isso será além da avaliação do método de laminação manual serão comparadas diferentes gramaturas das possíveis matérias primas escolhidas para a produção da peça.

Portanto este trabalho irá verificar a viabilidade do processo de laminação manual a fim de reproduzir a peça atualmente utilizada, bem como, avaliar a utilização de duas gramaturas diferentes de fibra de carbono como reforço para a produção dos compósitos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a possibilidade de produção do componente analisado pelo processo de laminação manual, comparando os resultados de ensaios mecânicos dos corpos de prova obtidos com os da amostra original.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a eficiência o processo de laminação manual para confecção deste componente de reposição.
- Comparar as propriedades mecânicas de tração e flexão três pontos para diferentes gramaturas de fibra de carbono.
- Encontrar possíveis soluções para o desenvolvimento do componente.
- Avaliar o comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica de epóxi, fabricadas por laminação manual, utilizando duas cargas de diferentes gramaturas de fibra de carbono.

2 REVISAO BIBLIOGRÁFICA

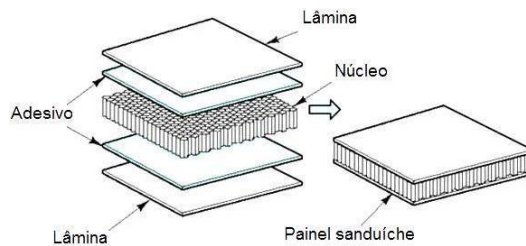
2.1MATERIAIS COMPÓSITOS.

2.1.1 Definição e classificação

De acordo com a ASTM D3878 um material compósito pode ser definido como uma mistura física de dois ou mais materiais, insolúveis um no outro, combinados para formar um novo material de engenharia com propriedades diferentes aos componentes puros. Contudo, esta definição é muito abrangente, podendo ser complementada como Compósito é um sistema constituído de dois ou mais materiais com distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface. (Adaptado de AGARWAL e BROUTMAN, 1990)

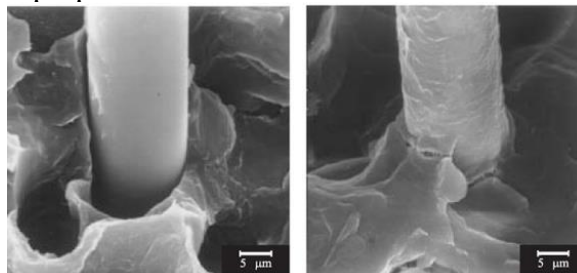
Nas figuras 2 e 3, estão apresentadas a estrutura de um material compósito, evidenciando as duas fases presentes, assim como a região de interface entre elas. Na figura 2 é mostrada de uma maneira ilustrativa, enquanto na figura 3 é apresentada uma imagem de microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura de um compósito com fibra de bananeira, mostrando a fibra, a matriz e em seu entorno, a interface de contato entre elas.

Figura 2 - Esquema representando um material compósito.



Fonte: (IMC – Caxias do Sul)

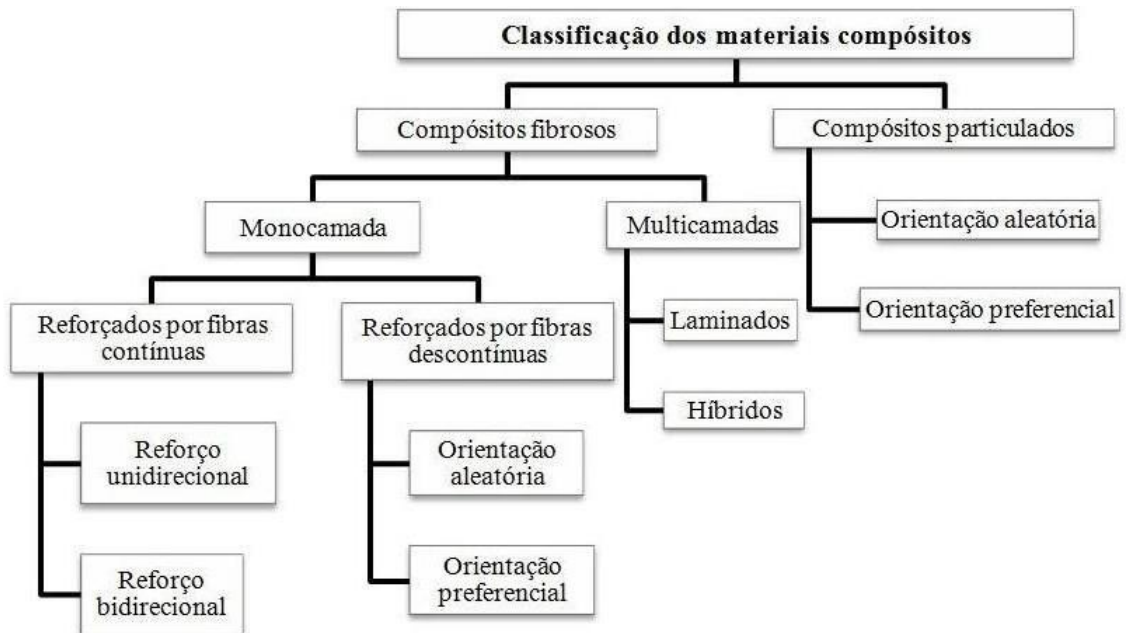
Figura 3- Fotomicrografias MEV de superfícies fraturadas de compostos de matriz de polipropileno com fibras de vidro.



Fonte: (LOPES, 1999)

A classificação dos materiais compósitos é mostrada pelo esquema ilustrativo da figura 4 abaixo onde ocorre a separação de suas classes baseado no formato das cargas e as respectivas subdivisões.

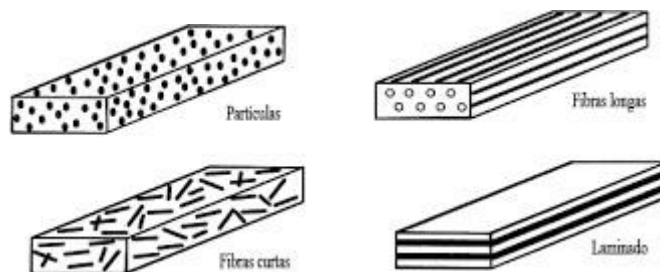
Figura 4 - Classificação dos materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de Ventura (2009)

Os materiais compósitos também podem ser separados de acordo com o tipo de material da matriz, sendo elas: Compósitos de Matriz Polimérica (PMC), Compósitos de Matriz Metálica (MMC) e Compósitos de Matriz Cerâmica (CMC). Como demonstrado na figura acima, as classificações destes compósitos são separadas de acordo com a forma de suas cargas. A figura abaixo ilustra o formato das cargas de reforço referentes a cada classificação.

Figura 5- Desenho esquemático de materiais compósitos de acordo com as classificações da disposição das cargas na matriz.



Fonte: GONTIJO 2017.

2.1.2 Compósitos reforçados com partículas.

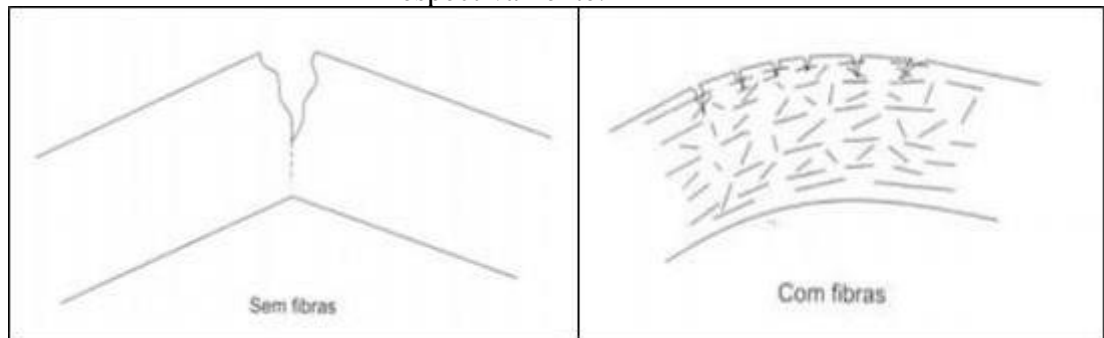
A utilização de partículas como cargas no lugar de fibras longas, ocasiona no compósito uma menor alteração nas propriedades mecânicas da Matriz devido a distribuição das tensões não ser tão eficiente. Porém ainda assim apresenta um aumento significativo no fornecimento de reforço.

Porém as possibilidades de alterações de outras propriedades como, por exemplo, o aumento de capacidade de condução elétrica, a estabilidade a altas temperaturas e a melhora da processabilidade ou apenas a facilitação do processamento torna a utilização destes reforços particulados ser muito empregada industrialmente.

2.1.3 Compósitos reforçados com fibras.

Os compósitos reforçados por fibras são os mais aplicados em componentes estruturais que exigem uma maior resistência mecânica. Isso porque as fibras, como dito anteriormente, são responsáveis por suportar a maior parte do carregamento mecânico, bem como, restringir a propagação de trincas. A figura 6, ilustra a restrição imposta pelas fibras à propagação de trincas em um compósito com fibras. (REZENDE, COSTA e BOTELHO, 2011)

Figura 6- Comparação da propagação de trinca em um material sem fibras e com fibras, respectivamente:

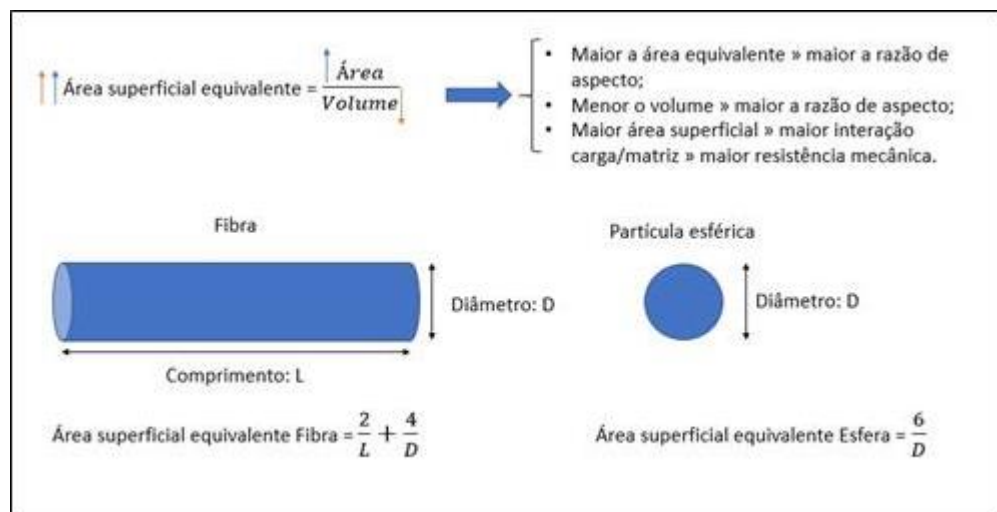


Fonte: REZENDE, COSTA e BOTELHO, 2011.

A resistência do compósito será maior quanto maior for a área de superfície especificada fibra desde que mantido o volume constante. Isso ocorre, pois, a maior área de superfície proporciona uma maior interface entre a carga com a matriz, ou seja, promovendo uma maior transferência das tensões mecânicas da matriz para a carga. Além disso, a maior área de superfície das fibras possibilita que a aderência com a matriz seja beneficiada.

A razão de aspecto é a proporção entre o comprimento (L do inglês *length*) e o diâmetro (D) de um material. As cargas particuladas apresentam a razão de aspecto idealmente igual a 1 (Razão de aspecto = 1). Já as fibras descontínuas apresentam uma razão maior do que 1 (Razão de aspecto > 1), enquanto as fibras longas possuem a razão de aspecto muito maior do que 1 (Razão de aspecto >>>1).

Figura 7- Esquema da área de superfície equivalente de uma fibra e uma partícula esférica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto maiores forem os comprimentos das fibras, maior será a razão de aspecto e maior será a área de superfície específica desde que o volume seja mantido constante, gerando conseqüentemente, uma maior interação entre a carga e a matriz, tornando a transferência de cargas mais efetiva (MARINUCCI, 2018).

2.1.4 Fibras contínuas.

Para os compósitos reforçados com fibras contínuas, as respostas mecânicas dependem do comportamento “Tensão *versus* Deformação” das fibras da matriz, das frações volumétricas, pois quanto maior o volume das fibras, maior será o incremento de resistência mecânica do compósito e principalmente da direção em que a tensão é aplicada, pois quando a força aplicada é na direção das fibras o aumento será potencializado, o que não ocorrerá com a força sendo aplicada no sentido oposto. Ou seja, as propriedades anisotrópicas dependem do alinhamento destas fibras contínuas.

2.1.5 Fibras descontinuas.

Além das fibras contínuas é possível utilizar o reforço a matriz com fibras curtas, que são obtidas através do arranjo aleatório de fibras cortadas de forma uniforme através de um ligante. Este tipo de reforço confere uma distribuição relativamente uniforme da resistência em qualquer direção, e apresenta uma fácil moldabilidade, especialmente em peças com contornos sinuosos. Permitindo um controle de homogeneidade de distribuição das cargas e um controle de espessura mais eficiente.

2.2 COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.

As resinas que podem ser utilizadas como matrizes, para os materiais compósitos reforçados com fibras, são classificadas em dois tipos: As termorrígidas e as termoplásticas, de acordo com a influência nas propriedades apresentadas após a cura. (Pilato e Michno, 1994).

Embora existam vários tipos de resinas usadas em compósitos, a mais utilizada para os componentes estruturais é a resina termofixa, pois suas propriedades mecânicas são geralmente superiores do que quando comparado com resinas termoplásticas, que necessitam de uma reação de cura. Dentre essas resinas a poliéster, vinil éster e epóxi são as mais utilizadas (Sobrinho, 2005).

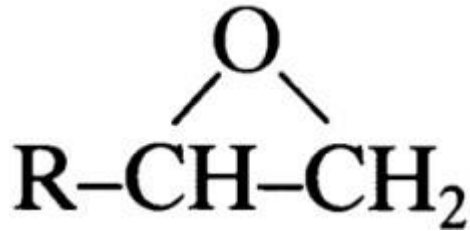
Os polímeros termorrígidos, macromoléculas de cadeia reticulada, são polimerizados durante o processamento, não podendo ser reciclados devido à impossibilidade de serem reprocessados, em função das ligações presentes entre as cadeias formadas durante o processo de cura. Esses polímeros são comercializados principalmente para fabricação de compósitos, além de uso como adesivo e revestimento. O processamento desses compósitos pode ser realizado em moldes de simples confecção e a disposição dos constituintes pode ser feita à mão ou automaticamente. A cura ou endurecimento da resina pode ocorrer com ou sem auxílio de pressão, temperatura ou vácuo. (Alexandre, 2006).

A resina epóxi é o principal polímero termorrígido para aplicações de engenharia para compósitos poliméricos devido à baixa retração durante a cura, excelente adesão a uma variedade de superfícies, boa estabilidade dimensional, baixa adsorção de umidade, boas propriedades térmicas e elétricas, excelente resistência química e a intempéries com alta relação resistência/peso (Kaw, 2006).

2.2.1 Resina epóxi.

O grupamento epóxi (Figura 8), também conhecido por grupo glicídico, e apresenta esse nome devido a sua característica estrutural, com um átomo de oxigênio fora da cadeia de carbonos. Epi significa “no lado de fora”, e a segunda parte vem da palavra oxigênio (AUGUSTSSON, 2004).

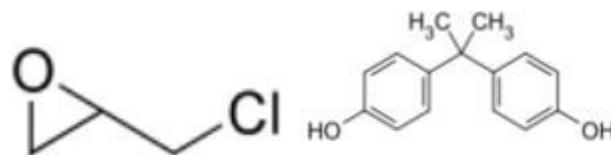
Figura 8- Grupo epóxi



Fonte: CALLISTER,2002.

A principal e mais usada reação que dá origem à sua formação, ilustrada na figura 9 ocorre entre epícloridrina (um epóxi líquido incolor, altamente reativo) e bisfenol A (sólido incolor solúvel em solventes orgânicos e pouco solúvel em água). Na figura 9, estão ilustradas a estrutura da epícloridrina, altamente reativa com grupos hidroxila e a estrutura do bisfenol A, que é originado a partir da acetona e fenol na presença de catalisador ácido.

Figura 9- Epícloridrina e bisfenol A, respectivamente.



Fonte: CALLISTER,2002.

As resinas epóxi apresentam uma grande variedade de aplicações, sendo em alguns casos de elevado nível técnico, ou seja: indústria aeronáutica e automotiva (fixação de estruturas e painéis), esportes (raquetes, quadros de bicicletas) e indústria eletrônica (capacitores, fabricação de circuitos internos).

Para o processo de formação da resina epóxi, o pré-polímero e o agente de cura são misturados, com o objetivo de criar uma mistura uniforme. A taxa de cura não é influenciada pela quantidade de agente de cura presente, pois apenas altera a temperatura de cura da resina, porém, possui efeito direto sobre as propriedades do polímero curado. Outros líquidos misturados com o líquido inicial são os diluentes, que visam reduzir a viscosidade, e

flexibilizadores, que visam melhorar a resistência ao impacto do epóxi curado (MALLICK, 2018).

Nota-se ainda, que a funcionalidade das resinas epóxi se dá pelo número de anéis epóxi em sua molécula. O agente de cura abre esses anéis e dá início ao processo de cura. Na maioria das resinas, um número crescente de moléculas epóxi são reticuladas, formando uma estrutura de rede e fazendo com que a resina se transforme de um líquido de baixa viscosidade a uma matriz de polímero sólida. Com esse processo, a viscosidade se torna tão alta que o material transformado se comporta como um sólido (MALLICK, 2018).

No começo do processo de cura, a resina no início do processo é definido como: resina no estágio A. Nesse estágio a reação de cura pode ser desacelerada por fatores externos (fazendo com que a temperatura fique abaixo da temperatura ambiente por exemplo), quando somente algumas estruturas de redes foram formadas. Deste modo a reação de cura vai cessar ou progredir a uma taxa mínima. Na próxima fase de cura, onde a viscosidade da resina é maior que a inicial e ela está com uma consistência gelatinosa, é chamada de estágio B. A forma do estágio B pode ser mantida por semanas ou meses, quando armazenado em temperaturas adequadas. A reação de cura pode ser concluída no chamado estágio C, aquecendo a resina em estágio B a uma temperatura ideal de cura (MALLICK, 2018).

2.3 CARGAS UTILIZADAS.

2.3.1 Fibra de vidro.

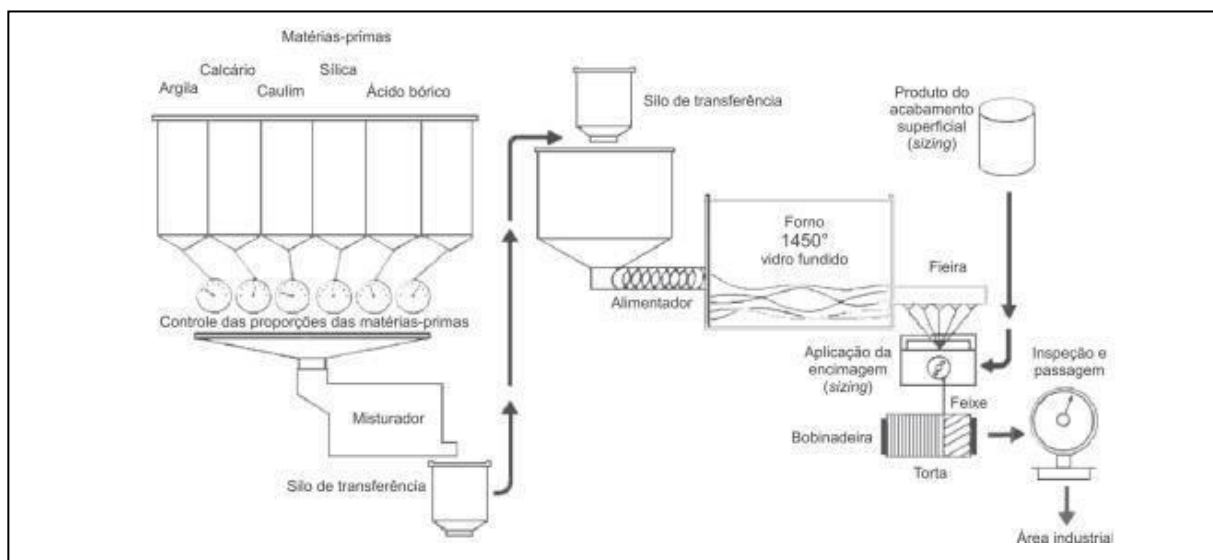
Atualmente a fibra de vidro é o reforço mais utilizado na fabricação de compósitos. Foi no decorrer da 2ª Guerra Mundial que a fibra de vidro começou a ser comercializada, fornecendo rigidez e leveza aos equipamentos militares (KEMERICH et al., 2013).

De acordo com Reis (2016), a fibra de vidro é extensivamente utilizada por diversas razões, pela facilidade de fabricação, alta resistência a partir do estado fundido. São relativamente resistentes e quando empregadas como cargas a uma matriz polimérica, produzem compósitos com elevada resistência à tração e por sua inércia química. Além de possuírem grande resistência a altas temperaturas (acima de 100°C), as fibras de vidro apresentam elevada resistência química e mecânica. Este material é muito aplicado em construções de tanques de armazenamento de produtos químicos, construção de embarcações e de estruturas, peças automotivas, construção civil, entre outras (FAZENDA, 1995).

O processo de produção dessas fibras de vidro se dá por fiação por fusão, como ilustrado na figura 10 abaixo. Através da passagem da massa de vidro fundida por uma peneira

com milhares de microfuros, os filamentos são solidificados por resfriamento e recebem a aplicação de um acabamento superficial denominado ensimagem, o qual é realizado por emulsão, sendo incorporadas diferentes substâncias como agentes de ligação, antiestáticos e lubrificantes. Esse processo de ensimagem tem como função principal conferir as fibras de vidro compatibilidade com a matriz polimérica e proteção superficial, sendo por esses motivos, uma etapa importantíssima do processo produtivo. Posteriormente, as fibras de vidro são preparadas para suas diversas aplicações no mercado, tendo seu formato alterado para atender as diversas finalidades, sendo elas: fibras contínuas, fibras picadas, mantas, fibras com e sem torção, entre outras. (MARINUCCI, 2018).

Figura 10 - Processo de produção das fibras de vidro.



Fonte: MARINUCCI, 2018.

Em geral, as fibras de vidro têm em sua nomenclatura uma propriedade especial da fibra, como por exemplo as designações abaixo:

- Designação A (*Alkali*) – Fibra de vidro que apresenta elevada resistência à álcalis.
- Designação C (*Chemical*) – Fibra de vidro que apresenta elevada resistência química (corrosão).
- Designação E (*Electrical*) – Fibra de vidro que apresenta baixa condutividade elétrica (isolante).
- Designação S (*Strength*) – Fibra de vidro que apresenta elevada resistência a tração.

Dentre as propriedades observadas das fibras de vidro, nota-se que possuem alta resistência a tração, ao calor e a umidade, possuem um baixo coeficiente de expansão térmico,

baixo custo, uma elevada resistência elétrica e, ainda, uma inércia química que permite sua utilização em ambientes corrosivos (MARINUCCI, 2018).

A tabela abaixo apresenta as propriedades mecânicas das fibras de vidro mencionadas acima.

Tabela 1- Propriedade das fibras de vidro A, C E e S.

Propriedades	A	C	E	S
Densidade (g/cm ³)	2,54	2,49	2,54	2,48
Resistência à Tração (MPa) 25°C	3033	3033	3448	4585
Resistência à Tração (MPa) 370°C	-	-	2620	3758
Módulo de elasticidade (GPa) 25°C	-	69	72,4	85,5
Alongamento (%) a 25°C	-	4,8	4,8	5,7

Fonte: MARINUCCI, 2019.

2.3.2 Fibra de carbono

A fibra de carbono é um material de alto desempenho, utilizado como reforço em compósitos avançados com matriz polimérica, sendo empregada especialmente na indústria aeronáutica e espacial. A obtenção deste tipo de fibra se dá por um processo denominado de pirólise controlada de precursores orgânicos. Ressalta-se que a matéria-prima que irá produzir este material deve já ter passado pelo processamento para se tornar uma fibra (MAZUR, 2010).

A capacidade deste tipo de material de apresentar elevadas propriedades mecânicas é um dos motivos que tornam a fibra de carbono extremamente utilizada em materiais compósitos avançados. Além disso, a fibra de carbono apresenta outras características, como preservar elevados módulos de tração mesmo sob altas temperaturas, ser pouco afetada pela umidade e outros tipos de solventes/ácidos/bases, e ainda ter uma boa relação de custo-benefício. A classificação que se dá as fibras de carbono está relacionada ao seu módulo de tração, como pode se observar na tabela 2 (MAZUR, 2010).

Tabela 2- Classificação dos diferentes tipos de fibra de carbono.

Tipos de Fibra	Módulo de tração
Ultra alto-módulo	500 GPa
Alto-módulo	300-500 GPa

Módulo intermediário	300 GPa
Baixo módulo	>100 GPa

Fonte: apud MAZUR, 2010.

A tabela 3 apresenta uma comparação das propriedades mecânicas da fibra de carbono com outros tipos de fibra. Percebe-se que ao se tratar de resistência mecânica, a fibra de carbono é a que possui o maior valor de resistência a tração e a de vidro possui a menor, isto também vale para o caso do módulo de elasticidade. Já para a densidade, a fibra de vidro é mais densa que as fibras de carbono. As propriedades das fibras de carbono e de vidro variam conforme os parâmetros de processamentos, por isso, a comparação depende das especificidades das fibras em análise. No caso das fibras de carbono, suas propriedades vão variar conforme a temperatura de fabricação e do precursor orgânico utilizado, já para as fibras de vidro, a variação ocorre principalmente dependendo do tipo de óxido que é utilizado.

Tabela 3- Comparação das propriedades mecânicas de compósitos de mesma matriz e diferentes cargas:

Fibras	Propriedades		
	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)
Fibra de vidro em tecido.	900	76	2,55
Poliaramida em tecido (kevlar)	1500	125	1,44
Fibra de Carbono Unidirecional	2200	160-300	1,75
Fibra de carbono em tecido	2400	165-300	1,9

Fonte: FIORELLI. 2002.

As fibras de carbono são amplamente aplicadas em produtos que necessitam de altas solicitações mecânicas, tal como em carros esportivos de alto desempenho, em que é necessário um monocoque leve e de elevada resistência mecânica e na indústria aeroespacial, em que a implementação deste tipo de fibras permite a fabricação de componentes de geometria complexa, e com propriedades mecânicas elevadas.

2.3.3 Tecido de fibra unidirecional

Segundo a ABNT/TB – 392 Tecido é uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de urdume e outro conjunto de fios de trama, formando ângulo de 90° (ou próximo). É tipo de organização que apresenta um maior custo de produção, porém também é o que confere as melhores propriedades mecânicas para as cargas de reforço. Porém para aplicações de fibra de carbono, visando abaixar o custo de produção está cada vez mais comum a utilização de tecidos de fibra de carbono unidirecionais. Onde apenas o urdume é constituído de fibra de carbono, e a trama é constituída de fibra de vidro. Para este tipo de tecido as propriedades mecânicas conferidas no sentido perpendicular a orientação das fibras é muito acrescida. (Adaptado de MARINUCCI, 2011)

2.4 PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS COM MATRIZES TERMOFIXAS

Uma das características do processamento dos materiais compósitos é que as peças são obtidas praticamente na geometria desejada e há, portanto, uma mínima necessidade de serem usinadas ou desbastadas. A redução da utilização de matéria-prima é um dos fatores a ser considerado quando da definição do processo de fabricação de uma determinada peça. Atualmente existe uma vasta gama de opções de matérias-primas e métodos para a fabricação de materiais compósitos estruturais. Os métodos de produção podem ser manuais e automatizados e a moldagem pode ser efetuada em molde aberto ou fechado. Os moldes abertos podem ser do tipo macho ou fêmea e os fechados incorporam simultaneamente as características dos moldes tipo macho e fêmea (CAMPBELL, 2006).

O processo de manufatura de materiais compósitos pode ser classificado em função do tipo de tecnologia da matéria-prima utilizada. Por exemplo, pode-se utilizar a tecnologia de pré-impregnados (fibras previamente impregnadas com sistemas de resina) para processo como laminação manual e laminação automática, ou processos em que as fibras são impregnadas durante o processo de obtenção da peça como os de enrolamento filamentar, pultrusão, etc. (PETERS, 1998; MAZUMDAR, 2002, VERREY2006).

Conhecer as características e propriedades de cada componente, a interação entre elas e as particularidades do processo são fundamentais para o sucesso de qualquer técnica de processamento. Para a matriz é importante ter o conhecimento de suas propriedades térmicas, físicas e mecânicas. O estudo desse conjunto de propriedades norteia a definição de parâmetros de processamento, (CANEVAROLO, 2004).

2.4.1 Processo de laminação manual.

O processo de laminação manual inicia com a deposição de um agente desmoldante sobre o molde. Além de facilitar a separação da peça na etapa de desmoldagem, este produto evita a aderência da peça no molde, contribuindo para um melhor acabamento da superfície do laminado. A preparação dos componentes se inicia com a pesagem das partes de resina e catalisador e do corte de tecido de fibras de reforço no tamanho otimizado a ser utilizado no processo.

Primeiramente é depositado no molde uma camada de resina e logo após uma camada do tecido da fibra de reforço de baixa densidade pois ela apresentará uma ótima molhabilidade e irá proporcionar ao compósito um melhor acabamento. Sempre que o uma camada de tecido é adicionada é realizada o espalhamento da resina com o auxílio de uma espátula, pincel ou rolo de espuma. Seguindo o procedimento, são colocadas camadas intercaladas de matriz polimérica e fibras de reforço até que o plano de laminação seja finalizado conforme proposto no projeto inicial do componente.

Após o término da aplicação das resinas e fibras de reforço o molde é fechado para que o componente adquira o formato desejado e é aplicado uma força nas superfícies externas do molde para que o excesso de resina seja retirado. A finalização do processo se dá com o aguardo do tempo total de cura da resina, passado isso o componente será desenformado e passará por acabamento para retirada de rebarbas e estará pronto.

Os pontos positivos da utilização deste processo é a facilidade de execução, sendo necessário menos componentes do que quando comparado com outros métodos, infusão por exemplo, isso faz com que o processo seja mais viável economicamente para produção seriada. Porém a laminação manual acaba por deixar um número maior de defeitos no componente como bolhas e uma possível não aderência completa entre a matriz e as cargas devidos a um preenchimento não tão efetivo da resina na fibra durante a laminação.

2.5 APLICAÇÕES

Os compósitos são muito utilizados na indústria aeroespacial, automobilística, naval, na construção civil, para finalidades militares, entre outros. De maneira geral, pode-se dizer que a aplicação desses materiais na indústria se dá em todos os setores que possuam a necessidade de materiais que disponham ao mesmo tempo de baixa densidade, e alta resistência mecânica e resistência a corrosão.

Silva (2019) demonstra em seu artigo “As vantagens da fibra de carbono em relação ao aço na indústria automobilística” que a utilização de fibra de carbono sendo utilizada para peças estruturais de um carro de alto desempenho trazem ótimos resultados, principalmente com a redução do peso do automóvel sem perder a resistência mecânica de seus componentes. Exemplificado por um teste de torção feito pela equipe de corrida Lotus da formula um, de um eixo “*cardam*” que é o componente que liga o motor as rodas, onde o torque necessário para romper o eixo foi 3 vezes maior para o eixo fabricado em fibra de carbono quando comparado com o mesmo eixo fabricado em aço.

Rezende (2011) em seu artigo mostra que no setor aeroespacial existe um crescimento da utilização destes materiais onde eles afirmam que com aplicando materiais compósitos na confecção da estrutura permite uma redução de 20 a 30% do peso final do avião e ainda possibilita uma redução de 25% no custo final de obtenção das peças. Exemplificado pelo lançamento do avião militar F-117 que sua carcaça é constituída de fibra de carbono com matrizes epóxis e bismaleimida. Que além de ter um peso reduzido de aviões do mesmo segmento feitos de aço ainda apresenta uma eficiente redução da sua detecção por radares. Rezende(2011) em sua monografia defende que a utilização de matérias compósitos em bicicletas de alto desempenho por mais que tenham um elevado custo demonstram ganhos de até 20% no resultado final no desempenho, devido à redução no peso do veículo.

2.6 SETOR TÊXTIL – TEARES

Santa Catarina conta com empresas de grande porte como, por exemplo, Cia. Hering, Dohler, Karsten e Teka. Dentre as empresas têxtil existem diferenças de ramo de atuação, como por exemplo, as empresas que contam com uma tecelagem em seu processo fabril. Dentre elas uma das maneiras de se classificar estas tecelagens é pelo maquinário utilizado para a confecção do tecido. A utilização de teares é o principal equipamento para estas empresas, e estes são divididos em duas categorias: O tear circular e o tear plano.

O tear circular normalmente é utilizado para tecer fios, transformando-os em malhas que terão a sua utilização em pedaços fracionados. A malha produzida por eles geralmente passará por processos de beneficiamento e utilizada para a produção de peças de roupas comuns como por exemplo camisas, camisetas e moletons.

Já o tear plano é o responsável por tecer tecidos que serão utilizados em serie, geralmente aplicações mais planas, atendendo principalmente o mercado de cama, mesa e banho. Onde o material tecido pode apresentar características diferentes em sua trama. Este

trabalho irá apresentar um estudo para de desenvolvimento de uma peça que é utilizada no tear plano de modelo G6200 da marca Sulzer que é utilizada para tecer toalhas.

Figura 11 – Tear G6200 da marca Sulzer.



Fonte: <https://www.unica.be/en/machines/sulzer-rUeti/weaving/terry-loom/17F204>

O funcionamento de um tear plano parte do princípio de tecelagem onde da parte superior é colocados uma longa sequência de fios todos alinhados verticalmente (chamado de urdume) e, com isso um comando separa esta sequência de fios com a ordem de um fio para cima e outro para baixo ou conforme programação dependendo da especificação do tecido a ser fabricado(chamado de cala). Com estes fios no alimento correto a máquina atravessa um fio na horizontal (chamado de trama) e faz um movimento mecânico com um pente para empurrar este fio horizontal para assim pressionar a trama contra a cala fechada. Após isto a cala é aberta com a inversão da sequência dos urdumes e o processo se repete. Em resumo o ciclo de um tear é composto pelas seguintes etapas.

- 1- Abertura da cala.
- 2 – Passagem da trama.
- 3 – Fecha da cala.
- 4 – Batida do Pente.
- 1- Abertura da cala novamente.

Para os teares convencionais a velocidade de operação é de uma média de 600 ciclos por minuto. O fracionamento deste tempo para cada uma das etapas mencionadas varia de

acordo com a especificação do tecido a ser produzido. Mas de modo geral é possível assumir que todas as etapas tenham a mesma duração.

A principal diferença entre os modelos de teares planos é o método que a trama é atravessada pela cala, no caso do tear Sulzer G6200 a trama é levada por uma fita de material compósito de fibra de carbono e fibra de vidro até metade da área útil do tear e recebida por outra fita semelhante que levará a trama até a outra lateral do tear. Esta área útil varia conforme as especificações dos equipamentos, mas o mais comum para este modelo é de 3 metros. Este modelo de tear é amplamente utilizado no pátio fabril catarinense e brasileiro, tendo seu lançamento em 2002 está presente em grande parte das empresas que utilizam teares planos.

A peça que será abordada neste trabalho será esta fita que atravessa a trama por dentro da cala, sua localização dentro do tear está marcada em vermelho na imagem abaixo:

Figura 12 - Localização da fita de carbono dentro do Tear G6200 da marca Sulzer. Em vermelho o componente, em azul as roldanas que o tracionam e em amarelo a dimensão da área útil do tear.



Fonte: <https://www.unica.be/en/machines/sulzer-rUeti/weaving/terry-looms/17F204> adaptado pelo autor.

Esta fita é um material compósito de fibra de carbono, fibra de vidro em uma matriz de resina epóxi, ela tem a sua ponta presa em uma polia de 400 mm de diâmetro e tracionada por uma roldana posicionada (em azul na imagem).

Os principais esforços sofridos por esta peça são de caráter flexivo e trativo. Os esforços de flexão são aplicados quando sua extensão está enrolada na polia. Já os esforços

trativos são aplicados conforme a fita é levada para frente pela roldana ou puxada pela polia. Uma informação muito importante sobre este componente é a velocidade que ele adquire durante o ciclo do tear, pois supondo um tear com 3 metros de área útil e operando a uma velocidade de 600 ciclos por minutos a velocidade com que está fita é direcionada para frente ou para trás é de 103 m/s, ou seja, 270 Km/h.

Portanto, se trata de um componente com elevadas solicitações mecânicas em sua aplicação. Porém a sua troca geralmente não se dá pelo desgaste ou por falhas por fadiga, mas sim devido a desvios que ocorrem na polia e devido a velocidade acaba gerando choques na carcaça do tear que fraturam o componente.

É uma peça que tem um valor de mercado elevado devido a sua complexidade e por ser indispensável para que o tear trabalhe. Com a falência da empresa Sulzer, estas peças tiveram seu preço encarecido devido à escassez de produção. Hoje estas peças têm versões similares em produção por indústrias chinesas, porém com qualidade e durabilidade inferiores as originais.

2.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.

A realização de ensaios mecânicos nos compósitos poliméricos estruturais permite conhecer as propriedades dos materiais produzidos por determinado processo de fabricação utilizado. Segundo Costa (2001), as imperfeições (vazios, trincas, descontinuidades, delaminações, dentre outras) geradas no processo de fabricação dos compósitos estruturais podem influenciar drasticamente as propriedades causando perda da resistência, rigidez e redução da vida dos compósitos, muitas vezes podendo resultar em falhas catastróficas.

2.7.1 Ensaio de Tração.

O ensaio de resistência tração é um dos ensaios mecânicos mais utilizados para a caracterização de materiais, pois embora o material seja testado em condições em algumas vezes diferentes das quais será submetido, a relação entre os resultados obtidos e os custos versus a complexidade do ensaio é muito boa (TEWFIC; SARHADI,2000).

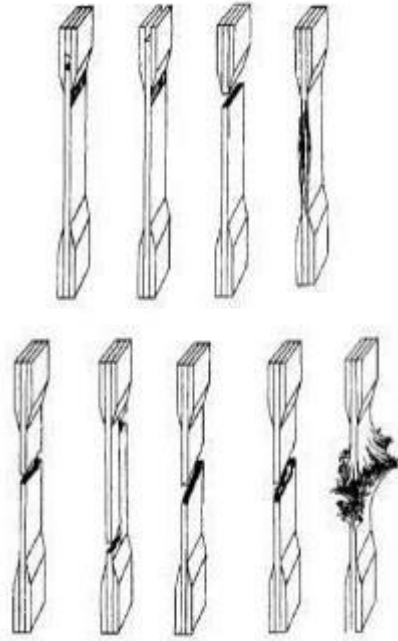
O ensaio mecânico de tração tem como objetivo determinar o limite de escoamento, o limite de resistência a tração, limite de ruptura, alongamento percentual e coeficiente de estricção. Essas duas informações são muito utilizadas no projeto de componentes visando a prevenção de falhas catastróficas. Quando conduzido sob condições controladas, o teste pode

fornecer informações sobre o comportamento do material sob tensão, como delaminação e Ruptura, bem como a maneira que as falhas se iniciam (HODGKINSON,2000).

Os ensaios de tração são normalmente baseados na norma ASTM D3039, que é especialmente designada para a avaliação das propriedades de compósitos de matrizes poliméricas, reforçados com fibras de elevada resistência. Tal norma padroniza desde as dimensões dos corpos de prova a serem testados até a avaliação dos resultados obtidos. Nos ensaios de resistência à tração, as propriedades a serem caracterizadas são predominantemente propriedades dos reforços.

Alguns fatores têm influência direta sobre os resultados obtidos em um ensaio de tração, dentre eles pode-se citar a preparação, as condições e dimensões dos corpos de prova, a velocidade do teste, o alinhamento do sistema e a fixação dos corpos de prova na máquina (ASTM D3039). Os modos de falhas típicos obtidos nos ensaios de resistência à tração em compósitos, segundo a ASTM D3039 são apresentados na figura 13 abaixo:

Figura 13- Modos típicos de falha durante ensaios de resistência a tração.



Fonte: ASTM (D3039).

2.7.2 Ensaio de Flexão.

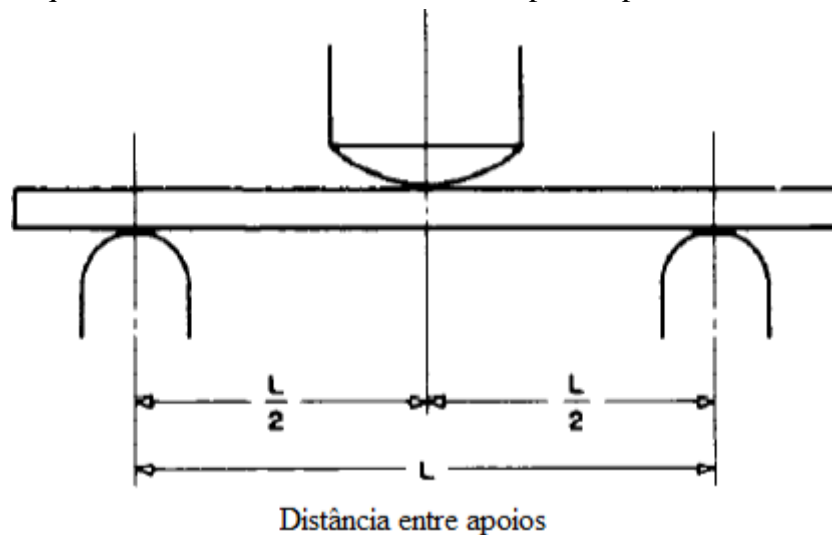
O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra de geometria padronizada, a qual pode estar na condição bi apoiada ou engastada em uma das extremidades. Mede-se o valor da carga *versus* a deformação máxima.

Em materiais dúcteis, quando sujeitos a esse tipo de carga, por serem capazes de absorver grandes deformações, não fornecem resultados quantitativos qualificados para o ensaio de flexão. Portanto, o ensaio deve ser aplicado para materiais de maior rigidez. As principais propriedades obtidas do ensaio de flexão são: tensão de ruptura em flexão (σ_f), módulo de elasticidade em flexão (E_f). Os resultados podem variar com a temperatura, velocidade de aplicação da carga, defeitos superficiais e geometria da seção.

Existem três tipos principais de ensaio de flexão: o ensaio de três pontos, em que a barra a ser testada é apoiada nas extremidades e a carga é aplicada no centro do comprimento do corpo de prova; o ensaio em quatro pontos, na qual a barra a ser testada é bi apoiada nas extremidades e a carga é aplicada em dois pontos na região central do comprimento, separadas por uma distância padronizada; e o método de engaste, que consiste em engastar uma das extremidades e aplicar a carga na ponta oposta do engaste (GARCIA 2000). O ensaio de flexão em três pontos será comentado a seguir por se tratar do tipo de ensaio utilizado neste trabalho para a obtenção das propriedades mecânicas de flexão dos compósitos.

A Figura 14 apresenta um esquemático do ensaio de flexão em três pontos. O ensaio consiste na aplicação de uma carga P no centro do corpo de prova, apoiado em dois pontos. A carga é aplicada a partir de um valor zero e aumentada lentamente até a ruptura do corpo de prova. O valor da carga versus o deslocamento do ponto central consiste na resposta do ensaio. Este tipo de ensaio é aplicado à materiais frágeis, ou de elevada dureza, como o caso de compósitos. Os principais parâmetros obtidos por este ensaio são: tensão de ruptura em flexão (σ_f), módulo de elasticidade em flexão (E_f) GARCIA, 2000.

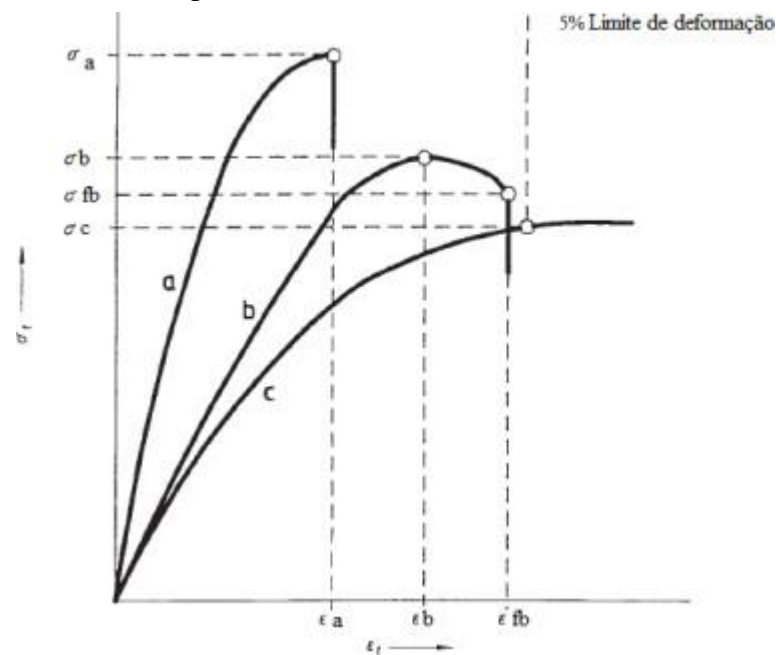
Figura 14- Esquemático do ensaio de flexão de três pontos pela ASTM D20.10.



Fonte: ASTM D20.10

A curva esperada para cada corpo de prova é apresentada na Figura 15. As curvas típicas do ensaio podem ser do tipo a, quando a ruptura ocorre antes da deformação das fibras; do tipo b, quando há deformação das fibras e a ruptura 5% de deformação após este ponto; e do tipo c, quando não há deformação das fibras e nem ruptura, neste caso o ensaio deve ser interrompido e o valor máximo registrado (ASTM D20.10).

Figura 15- Curvas típicas de ensaio de flexão em três pontas em materiais compósitos.
Adaptado de (ASTM D20.10).



Fonte: ASTM D20.10

3 METODOLOGIA DE ENSAIOS.

Partindo do desenvolvimento de um produto feito de material compósito de uma empresa têxtil da cidade de Blumenau, foram confeccionados corpos de prova de compósitos laminados de tecido de fibra de vidro, tecido de fibra de carbono unidirecional e resina epóxi, variando a gramatura para as fibras de carbono.

Com o objetivo de caracterizar as propriedades mecânicas de Tração e Flexão 3 pontos dos compósitos feitos com as diferentes gramaturas, para que seja possível fazer uma comparação com os resultados da amostra base.

Foi obtido uma amostra proveniente de uma fita original de um tear Sulzer G6200 para caracterizar e avaliar o comportamento mecânico e as gramaturas de suas fibras de carbono e de vidro e ainda descobrir o plano de laminação do componente.

Uma tira retirada da amostra foi enviada para a empresa TEXIGLASS em São Paulo/SP e foram caracterizadas com o auxílio do laboratório deles. Os resultados encontrados por eles estão descritos abaixo:

O plano de laminação da fita original é constituído de tecido de fibra de vidro e tecido de fibra de carbono, onde há dois tecidos de fibra de carbono, e cada um é envolvido por duas camadas de tecido de fibra de vidro, e no final um tecido de fibra de vidro envolve toda a fita. A gramatura encontrada do tecido de fibra de vidro é de 70g/m^2 e do tecido de fibra de Carbono é de 172g/m^2 .

Partindo deste plano de laminação foram escolhidas duas gramaturas de fibra de carbono comerciais que mais se aproximavam do valor encontrado pelo laboratório (172 g/m^2) para serem utilizados para a confecção dos corpos de prova e avaliar qual gramatura que, comparadas com as propriedades mecânicas da amostra original teria a maior semelhança para uma futura execução em escala industrial, as matérias primas escolhidas para os testes serão abordadas em mais detalhes abaixo.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS PARA A CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS DE COMPARAÇÃO.

Partindo do desenvolvimento de um produto feito de material compósito de uma empresa têxtil da cidade de Blumenau, foram confeccionados corpos de prova de compósitos laminados de tecido de fibra de vidro, tecido de fibra de carbono unidirecional e resina epóxi, variando a gramatura para as fibras de carbono.

Com o objetivo de caracterizar as propriedades mecânicas de Tração e Flexão 3 pontos dos compósitos feitos com as diferentes gramaturas, para que seja possível fazer uma comparação com os resultados da amostra base.

Foi obtido uma amostra proveniente de uma fita original de um tear Sulzer G6200 para caracterizar e avaliar o comportamento mecânico e as gramaturas de suas fibras de carbono e de vidro e ainda descobrir o plano de laminação do componente.

Uma tira retirada da amostra foi enviada para a empresa TEXIGLASS em São Paulo/SP e foram caracterizadas pelo laboratório próprio da empresa. Os resultados encontrados por eles estão descritos abaixo:

O plano de laminação da fita original é constituído de tecido de fibra de vidro e tecido de fibra de carbono, onde há dois tecidos de fibra de carbono, e cada um é envolvido por duas camadas de tecido de fibra de vidro, e no final um tecido de fibra de vidro envolve toda a fita. A gramatura encontrada do tecido de fibra de vidro é de 70g/m² e do tecido de fibra de Carbono é de 172g/m².

Partindo deste plano de laminação foram escolhidas duas gramaturas de fibra de carbono comerciais que mais se aproximavam do valor encontrado pelo laboratório (172 g/m²) para serem utilizados para a confecção dos corpos de prova e avaliar qual gramatura que, comparadas com as propriedades mecânicas da amostra original teria a maior semelhança para uma futura execução em escala industrial, as matérias primas escolhidas para os testes serão abordadas em mais detalhes abaixo.

3.1.1 Cargas de reforço.

Tecido de fibra de carbono unidirecional de menor gramatura cujas propriedades e variações aceitáveis estão explicitadas abaixo conforme laudo do fabricante.

Tabela 4- Tabela contendo as especificações do tecido de fibra de carbono utilizado.

Dimensão	Unidade	Mínimo	Nominal	Máximo	Encontrado
Gramatura	g/cm ²	130	144	158	153
Número de fios por urdume	Fios/cm	5,23	5,5	5,78	5,5
Número de fios por trama	Fios/cm	5,25	2,5	2,75	2,55
Largura	mm	28,5	30	31,5	30
Espessura	mm	0,17	0,2	0,23	0,2

Fonte: Certificado de qualidade do fornecedor.

Tecido de fibra de carbono unidirecional de maior gramatura cujas propriedades e variações aceitáveis estão explicitadas abaixo conforme laudo do fabricante.

Tabela 5 - Tabela contendo as especificações do tecido de fibra de carbono utilizado.

Dimensão	Unidade	Mínimo	Nominal	Máximo	Encontrado
Gramatura	g/cm ²	302	336	369	367
Número de fios por urdume	Fios/cm	3,8	4	4,2	4
Número de fios por trama	Fios/cm	2,07	2,3	2,53	2,3
Largura	mm	34	35	36	35
Espessura	mm	0,39	0,48	0,57	0,43

Fonte: certificado de qualidade do fornecedor.

Tecido de fibra de vidro, cujas propriedades e variações aceitáveis estão explicitadas abaixo conforme laudo do fabricante.

Tabela 6 - Tabela contendo as especificações do tecido de fibra de vidro utilizado.

Dimensão	Unidade	Mínimo	Nominal	Máximo
Gramatura	g/cm ²	85	94	103
Número de fios por urdume	Fios/cm	15	16	19
Número de fios por trama	Fios/cm	8	9	10
Largura	mm	36	38	40
Espessura	mm	0,07	0,08	0,15

Fonte: certificado de qualidade do fornecedor.

Figura 16- Fibra de carbono unidirecional de alta gramatura, menor gramatura e de vidro respectivamente.



Fonte: Autor

3.1.2 Resina epóxi para laminação manual.

Recebendo indicações do fornecedor das fibras, foi recomendada a utilização de resina epóxi para a produção do componente, devido as propriedades mecânicas, e por causa de ser a mais indicada para compósitos que utilizem fibra de carbono.

Para a confecção dos corpos de prova foram utilizados resina epóxi da marca Sino Polymer Co., Ltd com sede na China e seu referente catalisador com uso indicado para laminação manual e com tempo de trabalho de 15 minutos. Segundo a ficha técnica fornecida pelo fabricante as características físico-químicas da resina após a cura são:

- Densidade a 25°C: 1,1 a 1,2 g/cm³.
- Temperatura de degradação: 240°C.
- T_g= 80~90 °C.

3.2 METODOLOGIA DE CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.

3.2.1 Molde

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado um molde de duas cavidades, feito de aço, fresado e retificado na largura de 40 mm e com profundidade de 3 mm (conforme foto abaixo) com uma placa também retificada por cima pressionada por sargentos para que o excesso de resina fosse expulso e também para que a espessura fosse constante para todos os corpos de prova.

Figura 17- Molde usado para a confecção dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

3.2.2 Preparação do molde

Para facilitar a desmoldagem do componente, foi utilizada uma camada de cera automotiva aplicada sobre o molde conforme instruções do fabricante antes de cada preparação de corpos de prova.

3.2.3 Processo de laminação.

O processo de laminação foi realizado no galpão da empresa B&G Têxtil de Blumenau, seguindo o plano de laminação abaixo baseado no resultado encontrado pelo laboratório da empresa:

Tabela 7- Tabela ilustrativa demonstrando o plano de laminação dos corpos de prova.

Fibra de vidro
Resina epóxi
Fibra de vidro
Resina Epóxi
Fibra de carbono
Resina Epóxi
Fibra de vidro
Resina Epóxi
Fibra de vidro
Resina Epóxi
Fibra de carbono
Resina Epóxi
Fibra de vidro
Resina Epóxi
Fibra de vidro

Fonte: Autor

Primeiramente foi derramado uma quantidade de resina dentro do molde e espalhado com o auxílio de uma espátula, seguido da adição de uma camada de tecido conforme o plano de laminação e adicionado resina e espalhado novamente, este processo foi repetido até o final do plano de laminação. Após isto o molde era fechado e travado com sargentos.

O processo de desmoldagem ocorreu passadas 24 horas do processo de laminação, pois era o período de cura total informada pelo fabricante.

Tendo em vista detalhes a falta de equipamentos não foi possível a utilização de vácuo.

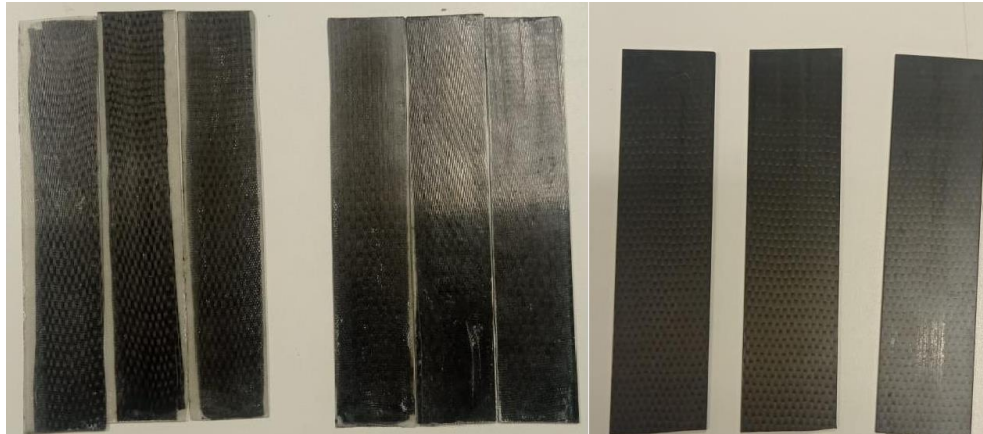
3.3 ENSAIOS

3.3.1 Ensaio de tração.

Foram confeccionados 10 unidades de cada amostra, porém devido a falhas de preenchimento de resina, para executar os ensaios foram utilizados apenas os que apresentaram

o melhor acabamento e molhamento. Foram realizados ensaio de tração em apenas três corpos de prova de cada uma das gramaturas e mais três retirados da amostra original a foto abaixo:

Figura 18- Corpos de prova, a direita alta gramatura ao centro de baixa gramatura e a esquerda a amostra original.



Fonte: Autor.

As amostras dos compósitos de fibra de carbono unidirecionais de alta gramatura foram nomeados como FCAG 1, FCAG 2 e FCAG 3, os de baixa gramatura como FCBG 1, FCBG2 e FCBG 3 e as amostras base como BASE 1, BASE 2 e BASE 3. Devido a falta de equipamentos não foi confeccionado os corpos de prova conforme a norma estabelecida para este, ensaio. Porém como os resultados são apenas para comparação entre as gramaturas, visto que todos os corpos de prova estavam com mesma geometria a comparação é válida.

Dimensionais dos corpos de prova de tração utilizados:

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCAG 1, FCAG 2 e FCAG 3.

Dimensão	Medida
Comprimento	100mm
Largura	30mm
Espessura	1,5mm

Fonte: Autor

Para o ensaio foi utilizado a máquina universal da marca Instron modelo EMIC 23-100 conforme foto abaixo:

Figura 19- Máquina de ensaios universais EMIC 23-100



Fonte: Autor

Foi utilizado uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min e uma célula de carga de 200 kN para realização dos ensaios.

3.3.2 Ensaio de flexão 3 pontos

Foram realizados ensaio de flexão 3 pontos em 3 corpos de prova de cada uma das gramaturas e da amostra base conforme a foto abaixo:

Figura 20 – Corpos de prova: Alta gramatura, baixa gramatura e amostras base, respectivamente.



Fonte: Autor

Resultados do Ensaio de Tração para as amostras de alta gramatura.

As amostras dos compósitos de fibra de carbono unidirecionais de alta gramatura foram nomeados como FCAG 4, FCAG 5 e FCAG 6, os de baixa gramatura como FCBG 4, FCBG 5 e FCBG 6 e as amostras base como BASE 4, BASE 5 E B.

Devido a falta de equipamentos não foi confeccionado os corpos de prova conforme a norma estabelecida para este, ensaio. Porém como os resultados são apenas para comparação entre as gramaturas, visto que todos os corpos de prova estavam com mesma geometria a comparação é válida.

Tabela 9- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCAG 1, FCAG 2 e FCAG 3.

Dimensão	Medida
Comprimento	60mm
Largura	15mm
Espessura	1,5mm

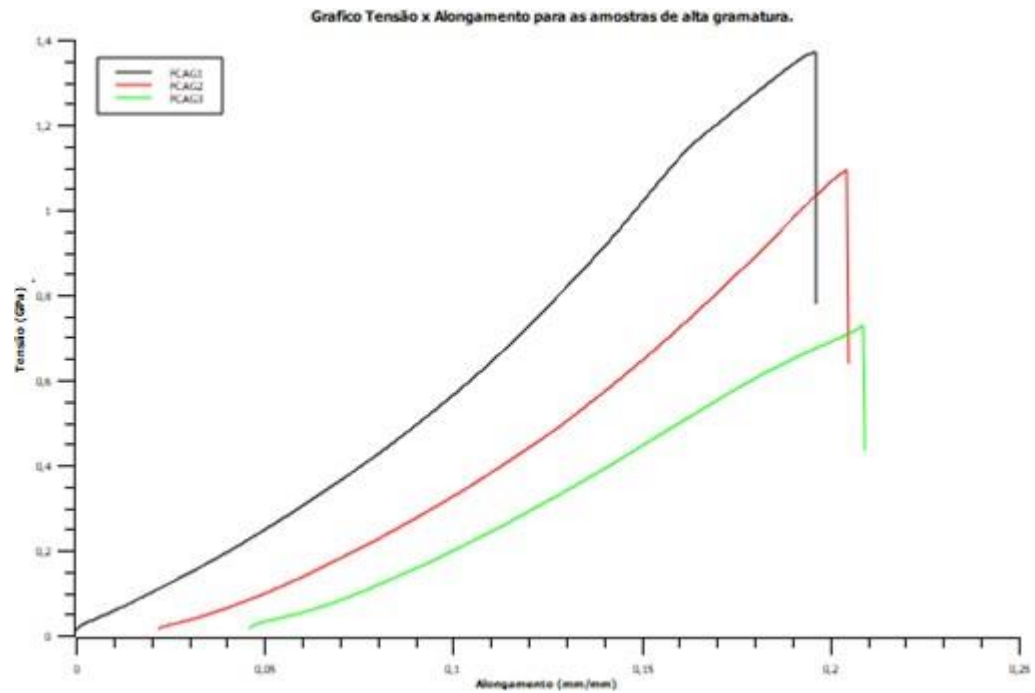
Fonte: Autor

Foi utilizado uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min, célula de carga de 200kN a distância entre os apoios de 40mm para realização dos ensaios de flexão 3 pontos.

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Resultados do Ensaio de Tração para as amostras de alta gramatura.

Figura 21- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCAG 1, FCAG 2 e FCAG 3.



Fonte: Autor

Tabela 10- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCAG 1, FCAG 2 e FCAG 3.

Amostra	Tensão Máxima (GPa)	Alongamento máximo (mm/mm)
FCAG 1	0,62	0,14
FCAG 2	0,48	0,09
FCAG 3	0,54	0,15
Média	0,54±0,07	0,13±0,03

Fonte: Autor

Figura 22- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCBG 1, FCBG 2 e FCBG 3.

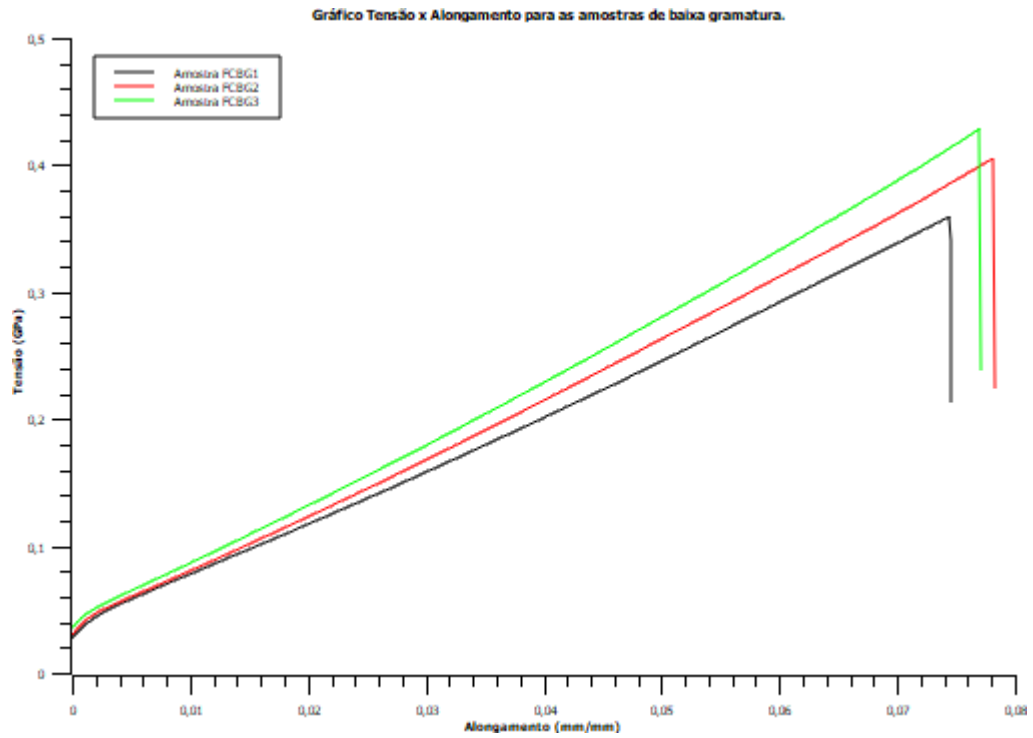


Tabela 11- Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova FCBG 1, FCBG 2 e FCBG 3.

Amostra	Tensão máxima (GPa)	Alongamento máximo (mm/mm)
FCBG 1	0,36	0,0744
FCBG 2	0,41	0,0782
FCBG 3	0,43	0,077
Média	0,39±0,04	0,0765±0,001

Fonte: Autor

Figura 23 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova BASE 1, BASE 2 E BASE 3.

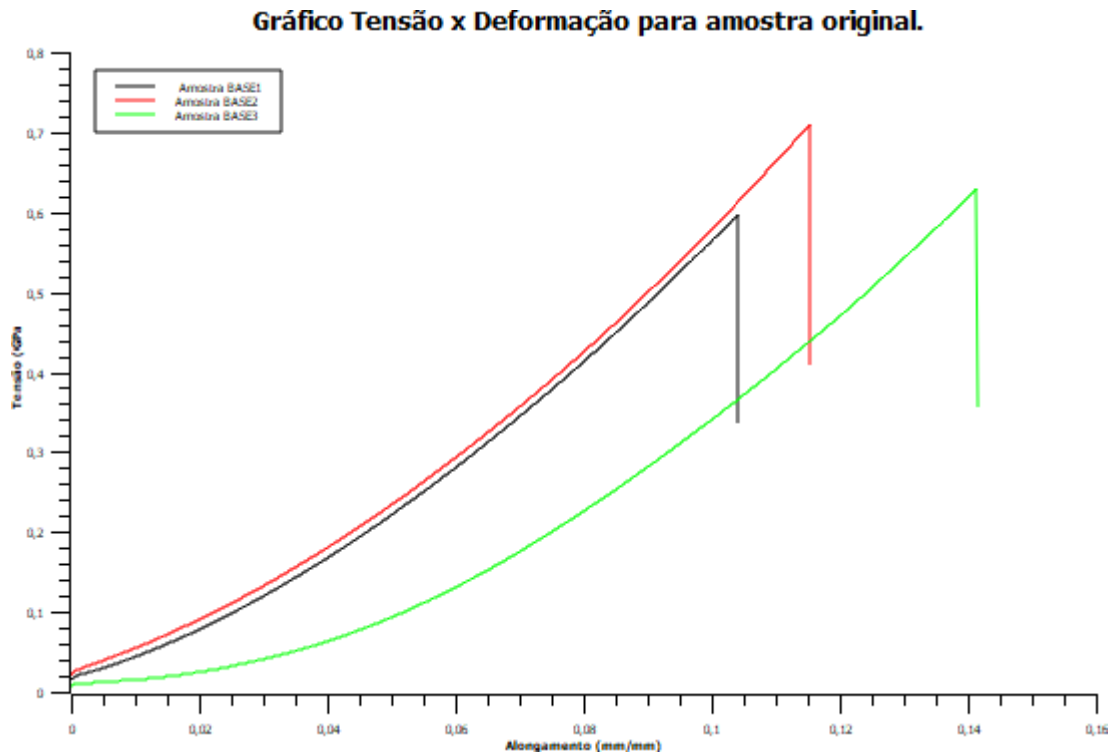


Tabela 12 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova BASE 1, BASE 2 E BASE 3.

Amostra	Tensão Máxima (GPa)	Alongamento máximo (mm/mm)
BASE 1	0,60	0,10
BASE 2	0,71	0,12
BASE 3	0,65	0,14
Média	0,65±0,05	0,12±0,2

Fonte: Autor

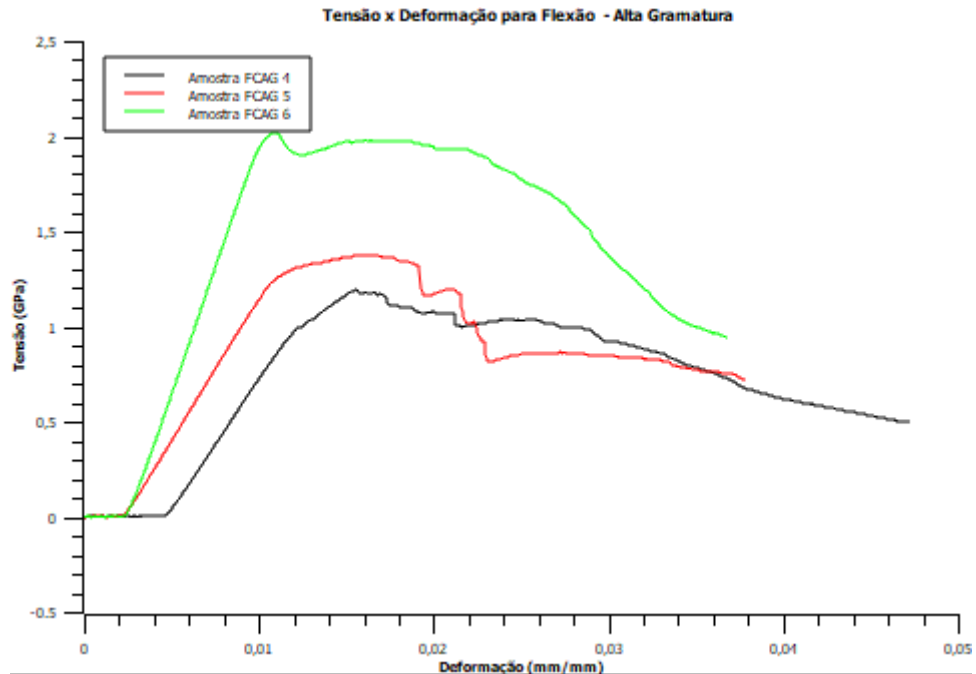
Sobre o ensaio de tração a fibra o compósito com o reforço de fibra de Carbono de maior gramatura alcançou valores de resistência a tração mais próximos aos da amostra base do que a de fibra de carbono de menor gramatura, mesmo que as densidades da fibra de carbono da amostra base ser menor que a utilizada nos corpos de prova das amostras de alta gramatura. A qualidade do processo de fabricação e possivelmente a utilização de uma resina de melhor qualidade propiciaria uma melhor aderência da resina nas fibras, que gera uma maior resistência mecânica.

O formato das curvas geradas pelo ensaio de tração demonstra que para os dois corpos de prova confeccionados pelo processo de laminação, ocorreu uma baixa adesão da resina, pois é visível um comportamento linear da curva de força por deslocamento, indicando que a fibra estava sendo responsável pela maior parte da resistência, evidência não observada para a curva do ensaio para as amostras base que apresentam um comportamento não linear, mais próximo de um material tenaz, isso demonstra exatamente está baixa adesão mencionada, comum para este tipo de laminação, onde não se tem a aplicação de vácuo.

A variação dos valores ensaiados para as amostras confeccionadas dos mesmos componentes, pode ser explicada pelos defeitos provenientes do processo de laminação, como bolhas de ar, áreas onde não aconteceu uma encharque correto da fibra pela resina entre outros defeitos do processo de laminação, ou ainda por diferenças nos corpos de prova que foram rebarbados manualmente.

3.4.2 Resultados do Ensaio de Flexão 3 pontos para as amostras de alta gramatura.

Figura 24 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova FCAG 4, FCAG 5 e FCAG 6.



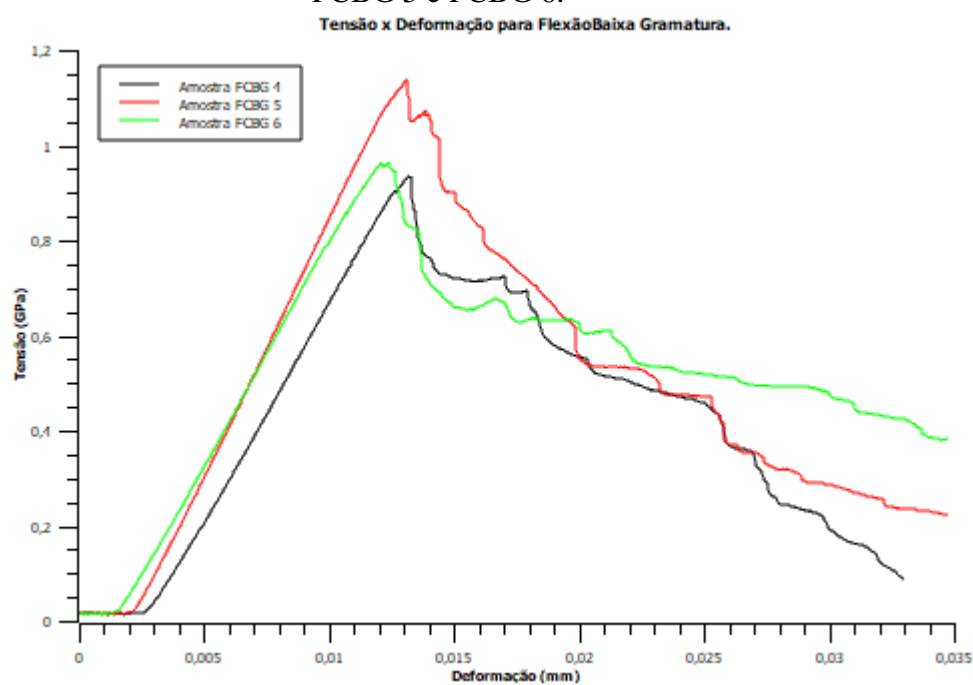
Fonte: Autor.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova FCAG 4, FCAG 5 e FCAG 6.

Amostra	Tensão Máxima (GPa)	Deslocamento na Tensão Máxima (mm/mm)
FCAG 4	1,031	0,0260
FCAG 5	1,323	0,0191
FCAG 6	1,971	0,0185
Média	1,44 ± 0,48	0,0211±0,004

Fonte: Autor.

Figura 25 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova FCBG 4, FCBG 5 e FCBG 6.



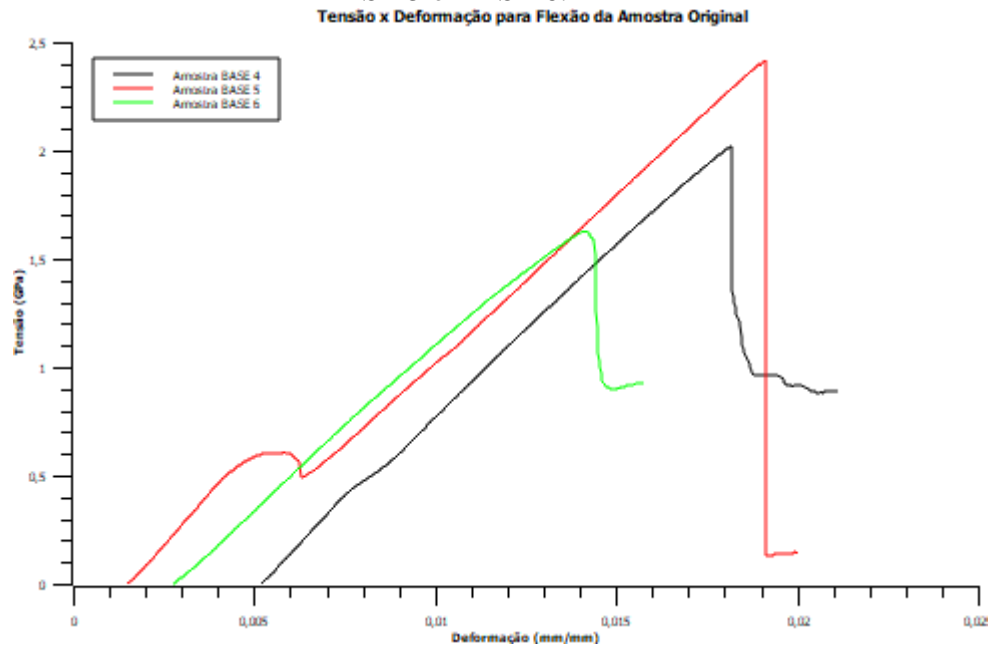
Fonte: Autor.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova FCBG 4, FCBG 5 e FCBG 6.

Amostra	Tensão Máxima (Gpa)	Deslocamento na Tensão Máxima (mm/mm)
FCBG4	0,90	0,0150
FCBG5	0,72	0,0149
FCBG 6	0,67	0,0169
Média	0,76±0,12	0,0156±0,005

Fonte: Autor.

Figura 26 - Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova BASE 4, BASE 5 e BASE 6.



Fonte: Autor.

Tabela 15- Resultados dos ensaios de flexão 3 pontos para os corpos de prova BASE 4, BASE 5 e BASE 6.

Amostra	Tensão Máxima (GPa)	Deslocamento na Tensão máxima (mm/mm)
BASE 4	2,02	0,018
BASE 5	2,41	0,019
BASE 6	1,63	0,014
Média	$2,02 \pm 0,39$	$0,017 \pm 0,002$

Fonte: Autor.

Agora, sobre o ensaio de flexão 3 pontos o compósito que continha a fibra de carbono de maior gramatura alcançou valores de resistência a flexão novamente mais próximos aos da amostra base do que a de fibra de carbono de menor gramatura, mesmo que a gramatura da fibra de carbono da amostra base ser menor que a utilizada nos corpos de prova das amostras de alta gramatura, a qualidade do processo de fabricação e possivelmente a utilização de uma resina de melhor qualidade propicia uma melhor aderência da resina nas fibras, que gera uma maior resistência mecânica.

É importante destacar a diferença das curvas entre as amostras do compósito laminado e das amostras base, para o gráfico das amostras bases ao ocorrer a fratura, ocorria simultaneamente a quebra das fibras, este comportamento é facilmente observado pois nas curvas do gráfico, o corpo de prova apresentou um declínio muito acentuado após a fratura.

Quando comparadas com as curvas provenientes das amostras laminadas manualmente notamos que após a fratura o corpo de prova ainda apresenta uma variação na sua resistência, fenômeno observado, pois a curva vai sofrendo leves decaimentos após a fratura. Este fenômeno está atrelado ao fato das amostras confeccionadas por laminação não apresenta uma boa aderência da resina nas fibras, com isso a transferência de tensões da matriz para a cargas não ocorre de maneira efetiva, e com isso acaba fraturando sozinha, sem passar para o reforço. Após a fratura da matriz superficial a outras camadas de fibra com resina vão se rompendo uma de cada vez, deixando estes decaimentos apresentados no gráfico.

A variação dos valores ensaiados para as amostras confeccionadas dos mesmos componentes pode ser explicada pelos defeitos provenientes do processo de laminação, como bolhas de ar, áreas onde não aconteceu um encharque correto da fibra pela resina entre outros defeitos do processo de laminação, ou ainda por diferenças dimensionais nos corpos de prova que foram rebarbados manualmente.

4 CONCLUSÃO

Avaliando os resultados encontrados, a fibra de carbono comercial de alta gramatura utilizada apresenta resultados dos ensaios mecânicos mais próximos da amostra base do que quando comparada com os valores observados dos corpos de prova confeccionados com a menor gramatura de fibra de carbono.

Entretanto, as amostras confeccionadas para a produção deste trabalho apresentaram alguns defeitos que impossibilitam uma análise mais crítica, pois alguns parâmetros que necessitariam serem controlados para a produção de um compósito de tanta rigorosidade. A temperatura do galpão onde foi efetuada a laminação variou, pois, as amostras foram feitas duas unidades por vez. Por sua vez a produção do compósito deveria ter acontecido em um ambiente com a umidade controlada, pois ela interfere na aderência da resina nas fibras, a localidade onde foi feita os corpos de prova é de altíssima umidade, favorecendo a perda de resistência mecânica.

Ainda, o método de produção de laminação manual não se mostrou efetivo para a produção deste tipo de compósito, pois acaba deixando muitas imperfeições no compósito devido a incidência de bolhas de ar provenientes da laminação ou da agitação durante a mistura da resina com o catalisador. A aplicação de vácuo poderia se tornar uma solução para que estas bolhas não ocorressem, a passagem de um rolo específico para a retirada de bolhas também seria uma opção a ser avaliada. Porém o acabamento superficial da peça ainda ficou como uma incógnita sobre com atingir um padrão tão elevado de processo.

Um processo que pode ser indicado para a confecção deste componente é a infusão a vácuo, que apresenta um melhor molhamento e uma deposição mais uniforme da resina. Devido a utilização do vácuo os compósitos feitos por este processo apresentam uma menor incidência de bolhas na estrutura final do componente. Porém para que este processo seja mais efetivo é indicado que seja confeccionado painéis retangulares no lugar de pequenas tiras, pois a permeabilidade da resina pelas cargas de reforços seria facilitada.

Por fim este estudo apresenta dados que demonstram que para uma peça que apresente um alto desempenho e grande complexidade, o método de produção, as variáveis do local de produção e a seleção de matérias primas utilizadas para este produto necessitam serem controladas para que sejam atingidas as propriedades desejadas com eficiência.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3039:

ASTM Subcommittee D20. 10 on Mechanical Properties. "Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials." American Society for Testing Materials, 1

Augustsson, C., NM Epoxy Handbook, Nils Malmgreen AB, 2004.

BASCHNAGEL, F.; Härdi, R.; Triantafyllidis, Z.; Meier, U.; Terrasi, G.P. Fatigue and Durability of Laminated Carbon Fibre Reinforced Polymer Straps for Bridge Suspenders. *Polymers* 2018, 10, 169.

CALLISTER JUNIOR, William D.. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc Editora, 2002. 589 p.

CAMPOS, Maxidavid. Estudo comparativo de pás para aerogeradores de grande porte fabricadas em materiais compósitos reforçadas com fibra de carbono ou fibras de vidro.. 113 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

CANEVAROLO, S. V. *Técnica de Caracterização de Polímeros*. São Paulo: Artliber editora, p 209-283. 2004.

DE SOUZA, Zulmar. *Fabricação e caracterização de um compósito com matriz de resina poliéster ortostática e cargas de fibra de agave angustifolia haw*. 138 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FAZENDA, Jorge M. R.. *Tintas e Vernizes: Ciência e Tecnologia*. 2. Ed. São Paulo: Textonovo Editora e Serviços Editoriais Ltda., 1995b. 558 p. (Volume 2).

FAZENDA, Jorge M. R.. Tintas: Ciência e Tecnologia. 4. Ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2009. 1124 p

FIORELLI, Juliano. Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço de Vigas de Madeira. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GAMA, Daniel. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE TENSÃO E FLEXÃO DE COMPÓSITOS

Garcia, Amauri, Jaime Alvares Spim, and Carlos Alexandre dos Santos. Ensaios dos materiais. Livros Técnicos e científicos, 2000.

GERMAN, R. M. Particulate Composites: Fundamentals and Applications. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-29917-4 (eBook).

GIANNINI, Helio. SILVA, Renan Wagner Novaes AS VANTAGENS DA FIBRA DE CARBONO EM RELAÇÃO AO AÇO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXIX, Nº. 000181, 29/10/2019. Acessado em: 21/02/2022.

GIBSON, R. F. Principles of Composite Material Mechanics. United States of America: McGraw-Hill, 1994. ISBN ISBN 0-07-023451-5.

Goodman S.H., Handbook of Thermoset Plastics, Noyes, 1986.

HODGKINSON, J. (2000). Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites. 2000.

IANOSHIRO, M Thermal degradation of a composite solid propellant examined by DSC Journal of thermal analysis and calorimetry, 2004.

JAIGOBIND, Allan George A.; AMARAL, Lucia do; JAISINGH, Sammay. Fabricação de peças em fibra de vidro (compósitos). Rio de Janeiro: Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, 2007. 46 p. Disponível em: . Acesso em: 02 abr. 2019.

KAW, A. K. *Mechanic of Composite Materials*. 2.d. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FC 33487-274: Taylor & Francis Group LLC, 2006.

KEMERICH, Pedro Daniel da Cunha; PIOVESAN, Maurício; BERTOLETTI, Luísa Lima; ALTMAYER, Sabrina; HOHMOVORPAGEL, Tatiane. Fibras de Vidro: Caracterização, Disposição final e Impactos Ambientais Gerados. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*. Rio Grande do Sul, v (10) p. 2112-2121, Jan./Abr., 2013.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. *Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia*. 1a. São Paulo: Blucher, 2006.

LIBA, Ademir Donizeti. *Controle da Finalização da Reação de Resina de Poliéster Insaturado via NIR*. 2004. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. Disponível em: . Acesso em: 25 mar. 2019

LOPES, Bruno. *Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Termoplásticos Reforçados por Fibras de Carbono*. 108 p. Dissertacao (Mestrado) - PUC- RIO, Rio de Janeiro, 2018.

LUCAS, E. F.; SOARES, B.G.; MONTEIRO, E. Caracterização de Polímeros Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. Editora E-Papers, p 217-323, 2001

MALLICK, P. K. *Processing of Polymer Matrix Composites*. Boca Raton: CRC Press, 2018. 356 p.

MARINUCCI, Gerson. *Materiais Compósitos Poliméricos: fundamentos e tecnologia*. São Paulo: ArtliberEditora, 2019. 329 p.

MAZUMDAR, Sanjay K.. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. Boca Raton: Crc Press, 2002.

MAZUR, Rogerio. Obtenção e caracterização de compósitos de fibras de carbono/PEKK com aplicações aeronáuticas. 142 p. Tese (Doutorado) - UNESP, Guaratinguetá, 2010.

MERLINI, Claudia et al. Análise experimental de compósitos de poliuretano derivado de óleo de mamona e fibras de bananeira. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MENCZEL, D. PRIME, R.B. Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications, 2008

MITOS e verdades sobre as rodas de liga leve. Brasil, 22 fev. 2017. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/mitos-e-verdades-sobre-as-rodas-de-liga-leve/>. Acesso em: 3 dez. 2020.

NETO, Miguel. Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de palha de aço. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

PETERS, Stanley T. (Ed.). Handbook of composites. Springer Science & Business Media, 2013.

PETERS, S. T. Handbook of Composites. London: Chapman & Hall, 1998. 1118 p. ISBN: 0412540207.

PILATO, L. A., MICHNO, M. J. Advanced Composite Materials, New York, Springer-Verlag, 1994.

RATNA, D. Handbook of Thermoset Resins. iSmit her s. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, United Kingdom. 2009

REIS, Ligia Reghin. Obtenção e Caracterização de Compósitos de Resina Poliéster Insaturada Moldados pelos Processos de Infusão. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. Disponível em: . Acesso em: 02 abr. 2019.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática. São Paulo: Artliber, 2011.

SANDUÍCHE. Orientador: Prof. Dr. João Marciano Laredo dos Reis. 2017. 80 p. Dissertação (Mestrado) - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, Niterói, 2017.

SOBRINHO, L. L. Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito Visando o Reforço de Dutos de Aço. UFRJ. Brasil, 2005. (Dissertação de mestrado)

TEWFIC, T. SARHADI, M. Novel folding device for manufacturing aerospace composite structures. 2000

THE HYBRID of Bridges and Carbon Fiber. EUA, 11 jun. 2019. Disponível em: <https://blog.carbonfibergear.com/the-hybrid-of-bridges-and-carbon-fiber/>. Acesso em: 3 dez. 2020.

VENTURA, A. M. F. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, [S. l.], v. 21, n. 3/4, p. 10-19, 2009.