

**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Automotiva**

**ANÁLISE TORSIONAL COMPARATIVA ENTRE  
LAMINADOS DE FIBRAS DE VIDRO E SISAL EM  
COMPÓSITOS TUBULARES**

**Autor: Celso Augusto Mendes Oliveira  
Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sandra Maria da Luz**

**Brasília, DF  
2023**



**Celso Augusto Mendes Oliveira**

**Análise torsional comparativa entre laminados de fibras de vidro e sisal em compósitos tubulares**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> SANDRA MARIA DA LUZ

**Brasília, DF  
2023**

Celso Augusto Mendes Oliveira.

Análise torsional comparativa entre laminados de fibras de vidro e sisal em compósitos tubulares/ Celso Augusto Mendes Oliveira . Brasília: UnB, 2023. 59 p.: il. ; 30 cm.

Orientação: Profª Drª Sandra Maria da Luz.

Trabalho de Conclusão de Curso –  
Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade do Gama, Brasília, 2023.

1. Compósitos naturais. 2. Pré-impregnados. 3. Ensaio de torção I  
I. Profª Drª Sandra Maria da Luz. II. Universidade de Brasília. III.  
Faculdade UnB Gama. IV - ANÁLISE TORSIONAL  
COMPARATIVA ENTRE LAMINADOS DE FIBRAS DE VIDRO E  
SISAL EM COMPÓSITOS TUBULARES

CDU Classificação



## **REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA**

**Celso Augusto Mendes Oliveira**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação / / ) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

Profa. Dra. Sandra Maria da Luz, UnB/ FGA  
(Orientador)

---

Prof. PhD Cristian Vendittozzi, UnB/ FGA  
Membro Convidado

---

Prof. PhD Edison Gustavo Cueva Galárraga, UnB/ FGA  
Membro Convidado

*Dedico este trabalho a todos aqueles que me apoiaram.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Hélio Idálio e Edineide Siqueira por todo o apoio e condição dada para que este trabalho fosse concluído.

Aos meus irmãos, Hélio Mendes e Ana Júlia pelo apoio, carinho e por sempre acreditarem que eu era capaz.

A minha companheira, Raquel Eucaria, sem seu apoio e companheirismo esse TCC não seria possível.

A todos os professores, especialmente a minha orientadora Sandra Luz, por sempre acreditar em mim, incentivar minha pesquisa e principalmente por compartilhar de sua experiência e sabedoria.

Aos meus colegas de laboratório, Linconl Araujo e Isabella Feitosa por toda paciência, ajuda e amizade demonstrada durante este trabalho.

Aos meus amigos Wallace, João Guilherme, Genilson e Bruno Vieira pela amizade.

A UnB – FGA por toda a estrutura, condição e possibilidade de estudos fornecidos.

A Capes e CNPq pelo suporte financeiro e laboratorial necessário ao projeto.



*“Brincar é condição fundamental para ser sério”.*

(Arquimedes).

## RESUMO

Os materiais compósitos têm sido estudados e validados pelos mais distintos testes, no entanto, o estudo sobre a torção envolvendo tubos desses materiais ainda é um conteúdo escasso. Estruturas tubulares são comuns aos mais diversos campos da engenharia, e os materiais compósitos, especialmente os reforçados com fibras sintéticas e naturais, podem contribuir para o avanço tecnológico da indústria, associando boa resistência e baixa densidade. Neste contexto, este trabalho busca uma caracterização de tubos manufaturados em compósitos submetidos a torção. Os tubos desenvolvidos nesse projeto foram obtidos a partir da pré-impregnação das fibras de vidro e fibra de sisal com resina epóxi como matriz. Os pré-impregnados ou prepregs podem ser definidos como fibras previamente impregnadas com uma resina e quando atingem o seu estado de gel são congeladas, podendo ser moldadas e utilizadas posteriormente, se mantidas em condições ideais, muito depois de sua fabricação. Neste trabalho, o método *hand lay-up* foi utilizado para a obtenção dos prepregs. Como citado anteriormente, duas variedades de fibras foram utilizadas, a fibra de vidro e a fibra de sisal sendo classificadas como fibra sintética e fibra natural respectivamente. A fibra de sisal foi previamente tratada com hidróxido sódio (NaOH) 5% (m/v), para que sua adesão a fibra/matriz ocorresse de forma mais efetiva. Para garantir a melhor condição de comparação entre as duas fibras, a proporção de volume de fibra/matriz para ambas foi a mesma, sendo 30 %v do material fibroso e 70% (v/v) matriz para todos os corpos de prova. O corpo de prova foi obtido a partir do método de *roll wrap*, onde o prepreg foi enrolado manualmente a partir de um molde tubular. Para a sequência deste trabalho, os corpos de prova foram submetidos a testes de torção onde foi resultado um gráfico relacionando o torque aplicado a uma deformação, com esses dois parâmetros foi possível obter o módulo de torção dos materiais, que foram comparados e estudados. A fibra de vidro obteve melhores valores individuais quando observado apenas os resultados mecânicos com o módulo de torção cerca de 46% maior que a fibra de sisal, no entanto a fibra de sisal se mostrou bastante aplicável caso bem avaliada, podendo substituir a de vidro dependendo do projeto a ser analisado.

**Palavras-chave:** Teste de torção. Compósitos. Fibra de vidro. Fibra de sisal. Pré-impregnados.

## ABSTRACT

Composite materials have been studied and validated by the most distinct tests, however, the study on torsion involving tubes of these materials is still scarce. Tubular structures are common to the most diverse fields of engineering, and composite materials, especially those reinforced with synthetic and natural fibers, can contribute to the technological advancement of the industry, associating good strength and low density. In this context, this work seeks a characterization of tubes manufactured from composites submitted to torsion. The tubes developed in this project were obtained from the pre-impregnation of glass and sisal fibers with epoxy resin as matrix. The prepregs can be defined as fibers previously impregnated with a resin and when they reach their gel state they are frozen, and can be molded and used later, if kept in ideal conditions, long after their manufacture. In this work, the hand lay-up method was used to obtain the prepregs. As previously mentioned, two varieties of fibers were used, glass fiber and sisal fiber being classified as synthetic fiber and natural fiber respectively. The sisal fiber was previously treated with sodium hydroxide (NaOH) 5% (w/v), so that its adhesion to the fiber/matrix would occur more effectively. To ensure the best comparison between the two fibers, the fiber/matrix volume proportion for both was the same, being 30%v fiber material and 70% (v/v) matrix for all specimens. The specimen was obtained from the roll wrap method, where the prepreg was manually rolled from a tubular mold. For the sequence of this work, the specimens were submitted to torsion tests where a graph relating the applied torque to a deformation was resulted, with these two parameters it was possible to obtain the torsion modulus of the materials, which were compared and studied. The glass fiber obtained better individual values when observed only the mechanical results with the torsion modulus about 46% higher than the sisal fiber, however the sisal fiber proved to be very applicable if well evaluated, and can replace the glass fiber depending on the project to be analyzed.

**Keywords:** Torsion test. Glass fiber. Sisal fiber. Prepregs.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - (a) Unidirecional. (b) Cruzada. (c) Camada em ângulo. (d) Multidirecional. Fonte: Adaptado (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). .....	21
Figura 2 - Gráfico de temperatura por tempo de cura. Fonte: (Westsystem, 2022). .	22
Figura 3 - Aplicações da fibra de carbono: (a) Chassi Bmw 7-series. (b) Boeing 787. (c) Chassi Alfa Romeo 4C. Fonte: (CompositeWorld, 2022), (AeroIn, 2022) ,(Eurocompulsion, 2022). .....	23
Figura 4 - Estrutura geral do Diglicidil éter bisfenol A. Fonte: Adaptada (HARPER; PETRIE, 2003) . .....	24
Figura 5 – Formas da fibra de vidro: (a) Tecido. (b) Fibra picada. (c) Fibras. Fonte: (a) (E-composites, 2022). (b) (Telhaseco, 2022). (c) (Cpicfiber, 2022). .....	25
Figura 6 - Estrutura de uma fibra vegetal. Fonte: Adaptado de (PEREIRA et al., 2015). .....	27
Figura 7 - Processamento do Sisal. (a) Sisal (Agave Sisalana). (b) Fibra estendida ao sol para secagem. Fonte: (Maestrovirtuelle, 2022), (Alves; Girão; Moreira Lima, 2005). .....	29
Figura 8 - Demonstração da torção em corpos com seções transversais distintas. (a) circular. (b) quadrada. Fonte: Adaptado (BEER, 2021). .....	31
Figura 9 - Tensão de cisalhamento através da seção: (a) circular; (b) tubular. Fonte: Adaptado (BEER, 2021). .....	32
Figura 10 – Aplicação de tubos de compósitos: (a) Semi-eixo. (b) Conjunto de suspensão da Fórmula 1. Fonte: (a) (worksmotorsports, 2022). (b) (Tapscape, 2022) .....	34
Figura 11 - Fluxograma da ordem dos processos. ....	36
Figura 12 – (a) Fibra de Sisal in natura. (b) Banho Maria das fibras. (c) Lavagem das fibras. (d) Fibras secas após o processo. ....	37
Figura 13 - Processamento para obtenção do prepreg: (a) Pentear das fibras. (b) Costura. (c) distribuição da resina através de um rolo. (d) Pré-impregnado de fibra de vidro. ....	39
Figura 14 - Orientação de enrolamento dos tubos. ....	40
Figura 15 - Processo de obtenção dos corpos de prova: (a) Mufla. (b) Tubos curados no molde. (c) Corpo de prova. ....	41
Figura 16 - Instron MT2 - MT series .....	43

Figura 17 - Montagem do cabeçote: (a) Encaixe do mandril. (b) Encaixe do cabeçote na máquina.....	44
Figura 18 - Inserção do corpo de prova: (a) Encaixe dos suportes. (b) Encaixe do corpo de prova à máquina.....	45
Figura 19 - Tubo com avarias após tentativa de remoção do molde.....	47
Figura 20 - Gráfico Torque x Ângulo de torção para o corpo de prova 1 de fibra de sisal.....	49
Figura 21 - Comparação de amostras médias: Vidro x Sisal.....	51
Figura 22 - Comparação entre o alinhamento das fibras de vidro e sisal.....	52
Figura 23 - Corpos de prova após ensaio de torção: (a) Compósito com fibra de sisal. (b) Compósito com fibra de vidro .....	53
Figura 24 - Detalhamento da fratura dos corpos de prova: (a) Compósito de vidro. (b) Compósito de sisal .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade calculada para cada compósito.....	38
Tabela 2 - Dimensão dos corpos de prova.....	41
Tabela 3 - Dimensões dos corpos de prova.....	42
Tabela 4 - Densidades reais dos compósitos.....	47
Tabela 5 - Resultados calculados para todas amostras.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**Araldite 1564** – Resina epóxi

**Aradur 42** - Endureceror

**ASTM** – American Society for Testing and Materials

**DGEBA** - Diglicidil éter de bisfenol A

**GRFP** - Glass Fiber Reinforced Polymer

## LISTA DE SÍMBOLOS

**°C:** Graus Celsius

**°:** Graus

**$\theta$**  : Ângulo de disposição de uma folha em um compósito

**$\sigma_f$**  : Limite de resistência a tração da fibra

**$\beta$** : Distância radial do centro da seção transversal

**v%**: Concentração percentual em volume

**%m/m**: Concentração percentual massa por massa

**cm**: Centímetros

**d** : Diâmetro de fio da fibra

**$F_f$** : Proporção de fibra em volume

**$F_m$** : Proporção de matriz em volume

**$\phi$** : Ângulo de torção

**G**: Módulo de cisalhamento ou torção

**g**: grama

**GPa**: Giga Pascal

**$g/cm^3$** : Gramas por centímetro cúbico

**$I_c$**  : Comprimento crítico da fibra

**J**: Momento polar de inércia

**L**: Comprimento de barra

**Lbf-in**: Libra-força polegada

**mm**: Milímetros

**MPa**: Mega Pascal

**Nm**: Newton-metro

**$\rho_c$** : Densidade do compósito

**$\rho_f$** : Densidade da fibra

**$\rho_m$** : Densidade da Matriz

**$r_i$**  : Raio interno de um tubo circular

**$r_e$**  : Raio externo de um tubo circular

**RPM**: Rotações por minuto

**$\tau_c$**  : Menor valor de ligação fibra-matriz ou escoamento em cisalhamento

**T**: Torque

**$\gamma_{m\acute{a}x}$** : Deformação máxima de cisalhamento

**$\tau$** : Tensão de cisalhamento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.2 Objetivos .....	19
1.2.1 Objetivo geral .....	19
1.2.2 Objetivos específicos .....	19
1.3 Revisão Bibliográfica .....	20
1.3.1 Processamento e Orientação de Fibras em Pré-impregnados .....	20
1.3.2 Produção e Aplicações de Pré-impregnados .....	22
1.3.3 Resinas Epóxi Como Matriz .....	23
1.3.4 Fibras de Vidro .....	25
1.3.5 Fibra de Sisal .....	26
1.3.6 Superfície de contato Fibra/matriz .....	29
1.3.7 Entendendo a Torção .....	30
1.3.8 Aplicação da Torção para Materiais Compósitos .....	33
<b>2 METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
2.1 Materiais Utilizados .....	36
2.2 Tratamento Superficial da fibra de Sisal em NaOH .....	36
2.3 Proporção de Fibra/Matriz .....	38
2.4 Confecção dos Pré-impregnados .....	38
2.5 Confecção dos Corpos de Prova .....	40
2.6 Vazios nos Corpos de Prova .....	42
2.7 Ensaio de Torção .....	43
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
3.1 Obtenção dos Corpos de prova .....	46
3.2 Vazios nos Corpos de Prova .....	47
3.3 Resultados Ensaio de Torção .....	48
3.4 Análise da superfície fraturada .....	53
<b>4 CONCLUSÃO .....</b>	<b>56</b>
<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Por possuir inúmeras vantagens e aplicações, os compósitos têm ganhado cada vez mais espaço nos mais diversos tipos de mercados e áreas da sociedade moderna. Esses materiais buscam unir duas ou mais propriedades físicas de seus constituintes buscando formar um novo material muito mais eficiente e rebuscado para a função na qual ele irá desempenhar (LOPES, 2017).

Tendo um destaque na função de resistência mecânica, os metais ganham em termos de propriedades gerais, entretanto, quando trata-se da diminuição de peso e impactos ambientais, não podemos dizer o mesmo. Já tendo em vista a fácil reutilização dos metais os compósitos ficam encurralados quando comparados nesse quesito, principalmente tratando de matrizes epóxi termorrígidas e fibras sintéticas (K.KAR, 2017; LENGSELD; WOLFF-FABRIS, 2016). Uma matriz termorrígida uma vez curada ou polimerizada, não pode ser reaproveitada; e o aquecimento deste material implica em sua degradação ou perda de sua resistência e rigidez (LIBERA JUNIOR, 2019). Para amenizar o impacto ambiental causado por estes materiais sintéticos é necessário buscar opções viáveis de aplicações dentro dos compósitos, que tenham propriedades semelhantes e que sejam possíveis de serem aplicadas. Uma dessas opções são as chamadas fibras naturais.

As fibras naturais mostram-se vantajosas por serem biodegradáveis, apresentarem boas propriedades mecânicas e terem um custo bastante reduzido (BEVITORI, 2014). Diversos estudos atuais buscam uma análise mais aprofundada sobre a possibilidade de aplicações destas fibras em materiais poliméricos biodegradáveis (SEIXAS; GRANADA, 2018). Uma das fibras vegetais com destaque positivo na indústria é *Agave Sisalana* ou sisal. Se trata de uma planta abrangente no Brasil que tem sido usada cada vez mais em materiais compósitos. Na engenharia civil seu uso já é utilizado como reforços de gesso e até mesmo de concreto (SALUM, 2019). As fibras naturais, no entanto, também têm obstáculos quando utilizadas. A compatibilidade entre a fibra e matriz de um material compósito é essencial para que suas propriedades mecânicas não sejam reduzidas. Quando se trata de fibras naturais e matrizes poliméricas, devido a compatibilidade entre características hidrofóbicas e hidrofílicas, tratamentos químicos a base de soluções alcalinas são processos mais comuns para contornar este problema. Estes tratamentos são capazes de solubilizar as porções amorfas das fibras e aumentar sua adesão superficial (TEIXEIRA, 2019).

Dentre os compósitos poliméricos, os pré-impregnados destacam-se por sua facilidade de utilização, fácil comercialização e acabamento de alta qualidade, tudo isso junto as propriedades mecânicas bem conservadas geram um material extremamente comercializável, visto que os prepregs são globalmente utilizados nos mais diversos tipos de indústrias de alta performance (K.KAR, 2017; LENGSELD et al., 2016). Um pré-impregnado consiste na impregnação de uma fibra com uma matriz polimérica semicurada. Para que a cura da matriz não continue acontecendo o prepeg, este é mantido em baixas temperaturas e quando utilizado, a cura completa deste material pode ser feita tanto por aumento de temperatura quanto de pressão. Uma cura bem desenvolvida é essencial para que as propriedades do material se mantenham (LENGSELD et al., 2016).

Para a aplicação destes materiais compósitos em eixos, tubos, barras circulares e nos mais diversos tipos de indústria, se faz necessário um estudo do comportamento destes materiais quando submetidos a torção. Peças como eixos de transmissão, eixos propulsores, hastes de direção, hastes de sustentação, brocas todos estes materiais sofrem torção e podem ser feitos de materiais compósitos. Equipes de Fórmula 1, aviões dos mais diversos tipos e até mesmo alguns carros mais convencionais já utilizam estes itens em sua estrutura (REZENDE; BOTELHO, 2000). A torção trata-se de uma tensão e deformação cisalhante que ocorre quando um torque é aplicado em uma barra retilínea de seção transversal qualquer (BEER, 2021).

Este trabalho busca mostrar o desempenho das fibras de sisal quando comparadas às fibras de vidro, mais comumente utilizadas, quando aplicadas em compósitos tubulares. Para isso, o trabalho foi dividido em 4 partes principais. A primeira parte aborda uma revisão bibliográfica envolvendo a caracterização dos pré-impregnados, a descrição de algumas propriedades das fibras naturais e sintéticas, bem como uma revisão da parte mecânica de torção. A segunda parte busca revisar e apresentar os métodos da parte experimental de todo o processo, iniciando com a escolha dos materiais, tratamento da fibra natural, confecção dos prepregs e corpos de prova e finalizando com o teste de torção no qual esses corpos serão submetidos. A terceira parte aborda uma discussão e alguns resultados obtidos sobre as partes experimentais realizadas, método de fabricação, algumas dificuldades do processo e o que é esperado com o desenvolvimento deste trabalho. Por fim, a quarta parte retorna a ideia principal, enfatizando os resultados esperados e os obtidos através da literatura e parte experimental.

## **1.2 Objetivos**

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral é caracterizar comparativamente tubos de compósitos laminados de fibra de sisal e fibra de vidro/ epóxi por ensaios de torção.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Comparar os módulos de torção entre os compósitos reforçados com fibra de vidro ou sisal obtidos a partir de pré-impregnados.
- b) Estudar a superfície fraturada dos laminados após os ensaios de torção.

## 1.3 Revisão Bibliográfica

### 1.3.1 Processamento e Orientação de Fibras em Pré-impregnados

A preocupação do mercado de estruturas quanto a materiais que tenham ótimas propriedades, sendo elas tanto físicas quanto químicas sempre foi presente. Todavia, atualmente além de conter os aspectos citados surgiu um novo empecilho para estes materiais que devem impactar o mínimo possível o nosso meio-ambiente, ou seja, serem materiais considerados limpos.

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas já estão presentes nas mais diversas aplicações da engenharia e indústria, no entanto, uma das principais desvantagens em relação ao uso desses materiais está relacionada com o processo de biodegradação e/ou reciclagem que são mínimos ou inexistentes. As fibras naturais vêm se destacando positivamente, por conter ótimas propriedades mecânicas, e claro, gerarem poucos resíduos na natureza (PEREIRA et al., 2015).

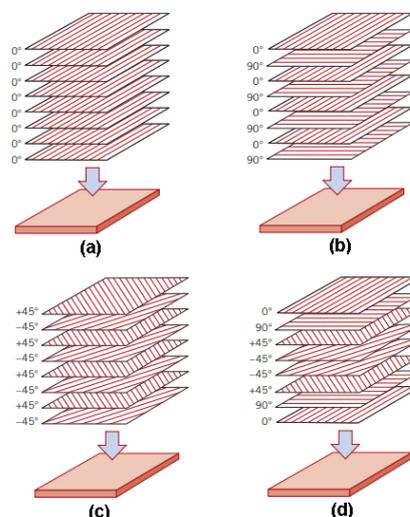
Para formar um compósito, essas fibras são revestidas por uma matriz, que podem ser cerâmicas, metálicas e poliméricas e com a junção desses materiais espera-se um ganho em alguma propriedade específica do material. Diversas são as possibilidades de combinação entre fibras, matrizes, orientações, disposições, teor de reforço e tantas outras características que podem ser modificadas. Desta forma, a quantidade de aplicações desse tipo de material torna-se incrivelmente vasta, (CALLISTER; RETHWISCH, 2018), já que o material será feito e projetado especialmente para a função que ele irá exercer. Dentro dos pré-impregnados isso se faz ainda mais presente tendo em vista que o controle de volume de fibra disposta no material é bem alto e a disposição e organização dessas fibras também, otimizando a relação entre o peso deste material e suas propriedades mecânicas (LIBERA JUNIOR, 2019).

Dos mais distintos métodos de obtenção de um material compósito, um que se destaca pelo seu fácil manuseio é o empilhamento de camadas de pré-impregnados ou prepregs. Esse tipo de material é amplamente utilizado em aplicações estruturais, sendo a principal forma de obtenção dessas peças (CALLISTER; RETHWISCH, 2018) 2018). O processo de fabricação de um prepreg compreende na disposição de fibras que serão impregnadas previamente com uma resina polimérica que se encontra em um estágio de semicura. Se feita corretamente, o material se encontrará em um estado semissólido que irá ao congelador (LIBERA JUNIOR, 2019) e com a diminuição da

temperatura ocorrerá um atraso ou quase paralização no processo de cura possibilitando a armazenamento desse material, que mais tarde será moldado e posto em condições para que haja a terminação da cura total deste prepreg (GARCÍA-MANRIQUE et al., 2019).

Compósitos poliméricos compõem uma parte significativa de aplicações e funções dentro destes materiais, principalmente quando se trata de pré-impregnados. Este tipo de compósito consiste em painéis ou lâminas cada uma com sua direção preferencial de resistência e que quando juntos compõem um laminado por completo. Existem várias possibilidades de ordenação de fibras, quantidade de fibras, disposição destas folhas e até mesmo o tipo de trançado, além de que esses materiais não necessariamente têm de ser feitos com a mesma fibra e material, podendo ser um material composto até mesmo com fibras de metais e cerâmicas, fazendo com que cada material seja quase único (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

A disposição destes laminados também pode ser classificada em compósitos unidirecionais que tem todas as suas folhas em  $0^\circ$ , ou seja, é um material anisotrópico tendo suas propriedades variando bastante de acordo com a direção de onde haverá a carga; como cruzadas que teriam suas lâminas dispostas alternadamente a  $0^\circ$  e  $90^\circ$  aumentando assim a isotropia do material, mas apenas nas direções principais, com camadas em ângulo que alternariam em  $+\theta$  e  $-\theta$  também deixando o material um pouco mais isotrópico que o unidirecional e por fim multidirecional que seriam o mais próximo de um material isotrópico (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; GAY; HOA; TSAI, 2003). A Figura 1 permite uma melhor observação destas disposições.

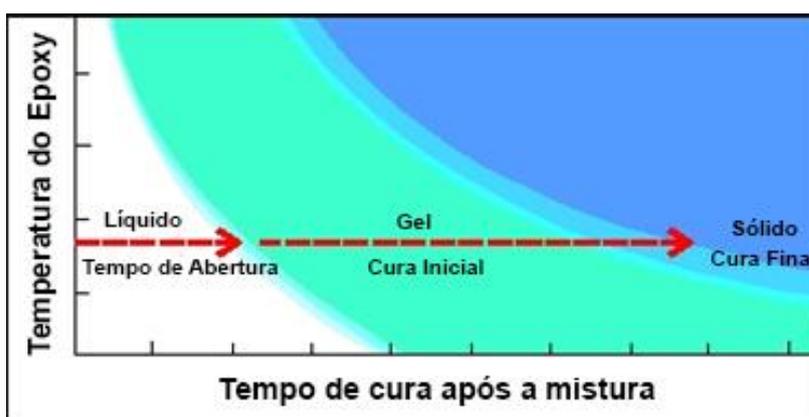


**Figura 1** - (a) Unidirecional. (b) Cruzada. (c) Camada em ângulo. (d) Multidirecional.  
Fonte: Adaptado (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

### 1.3.2 Produção e Aplicações de Pré-impregnados

Os materiais compósitos são utilizados para os mais diversos tipos de aplicações, principalmente naquelas em que é exigido pouco peso e grandes esforços mecânicos de suas peças, já que a resistência destes materiais manufacturados é comparada a materiais metálicos, além do mais há um ganho em relação ao peso do projeto. Como exemplos de mercado temos a indústria automotiva, a aeronáutica, de transportes aquáticos, veículos leves sobre trilhos e muitas outras.

Como mencionado, um prepreg consiste em um produto que ainda não foi finalizado que contém uma fibra banhada em uma matriz que não atingiu o seu estágio de cura já que no meio deste processo o material é congelado no que é chamado de estágio B como demonstrada na Figura 2, onde o estágio chamado de *gel* representa o estágio onde deve-se congelar o compósito (SILVA, 2020).

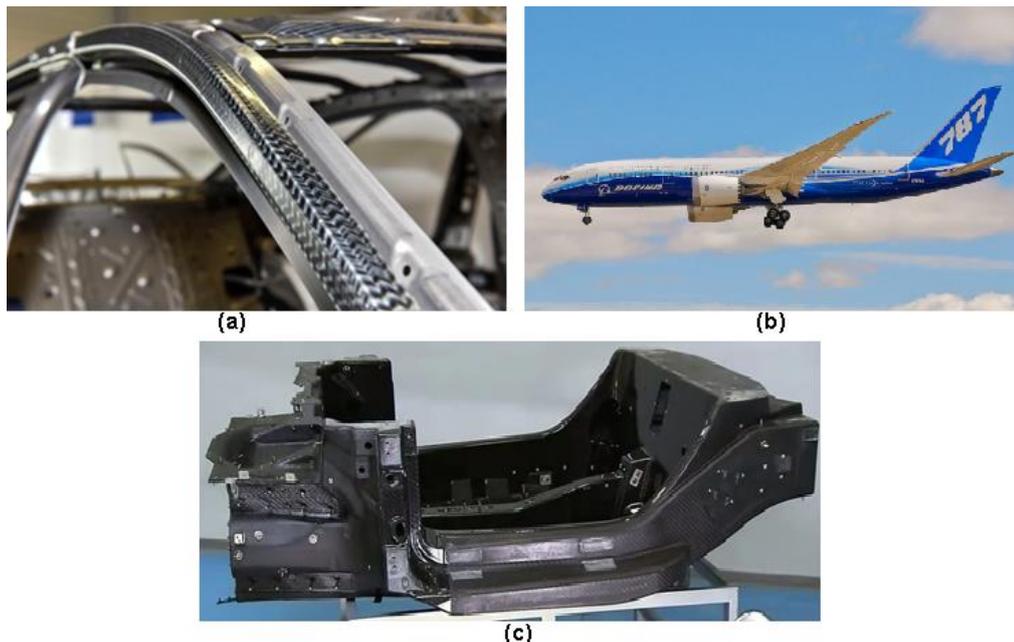


**Figura 2** - Gráfico de temperatura por tempo de cura. Fonte: (Westsystem, 2022).

Por conta de sua versatilidade, alta concentração de fibras e grande variedade de combinação entre matriz e fibras possíveis, os prepregs foram ganhando popularidade com o passar do tempo (SILVA, 2020). Os mais diversos tipos de produção desses compósitos foram se desenvolvendo, como exemplo temos a *vacuum bag* que consiste em um método que a fibra é impregnada com a matriz e posta em uma câmara de vácuo. Neste método, o ar é completamente removido da câmara o que ocasiona em uma ótima distribuição de resina sobre a fibra e ainda gera um ótimo acabamento para o material (K.KAR, 2017; LENGSELD; WOLFF-FABRIS, 2016). Além desta forma, podem ser citadas a pultrusão, moldagem por compressão, moldagem por transferência de resina, infusão de resina e outras diversas formas de moldagem que vem se desenvolvendo com o passar do tempo (K.KAR, 2017).

Com o avanço da tecnologia para componentes com alto desempenho vários tipos de mercados vêm procurando e desenvolvendo cada vez mais a forma de obtenção e produção de um prepreg. Atualmente os pré-impregnados representam mais da metade da produção de fibras de carbono distribuídas para o mundo (LENGSFELD; WOLFF-FABRIS, 2016).

Visto que a fibra de carbono é um material leve e resistente, sua área de aplicação é enorme. Como exemplo, destaca-se o primeiro avião comercial com fuselagem inteiramente montada em fibra de carbono, o Boing-787 (Figura 3b). Na área automotiva temos diversas aplicações indo das mais simples como a utilização desta fibra nas rodas, retrovisores e partes internas do veículo e indo até as partes estruturais, como nas *7-Series Sedan* da marca BMW que tem parte do seu chassi formado por fibra de carbono (Figura 3a) e até mesmo a Alfa Romeo 4C, que tem o seu chassi inteiramente feito com fibra de carbono (Figura 3c).



**Figura 3** - Aplicações da fibra de carbono: (a) Chassi Bmw 7-series. (b) Boeing 787. (c) Chassi Alfa Romeo 4C. Fonte: ([CompositeWorld](#), 2022), ([AeroIn](#), 2022), ([Eurocompulsion](#), 2022).

### 1.3.3 Resinas Epóxi Como Matriz

A fase matriz nos compósitos, tem o principal objetivo conferir a estrutura do compósito, ou seja, quando uma tensão é aplicada na parte exterior do compósito a

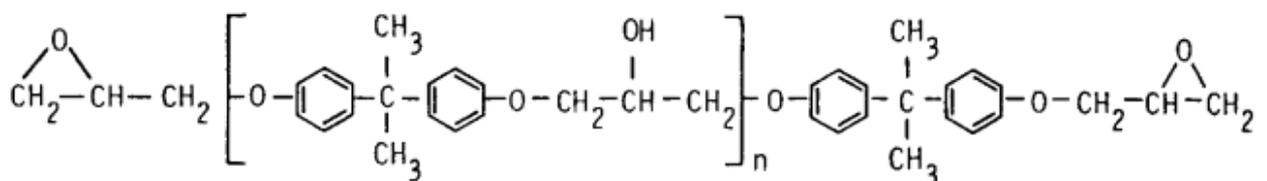
matriz é a responsável por transmitir e distribuir esta tensão entre as fibras e até mesmo proteger essas fibras de danos externos.

Um problema que poderia ocorrer caso a matriz não cumprisse seu papel é a propagação de trincas que poderia resultar em uma falha catastrófica do material, e esta falha apenas ocorrerá caso o material já esteja bastante danificado, com diversas fibras propensas a romper. Esta fase não irá suportar cargas grandes, seu objetivo não é tão mecânico como os das fibras, mas a matriz normalmente é mais dúctil que a fibra o que faz com que o material compósito já pronto tenha uma ductilidade também (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Em relação as matrizes poliméricas que é bastante utilizada quando se trata de compósitos, existem três subdivisões, que seriam as matrizes termorrígidas, termoplásticas e elastômeros. Dentre as matrizes termorrígidas, destacam-se as resinas epóxi.

As resinas epóxi são classificadas como matrizes termorrígidas que normalmente endurecem a partir da mistura da resina com o agente de cura. Essas matrizes apresentam boas propriedades mecânicas e químicas e junto a isso o elevado número de aplicações possíveis para este tipo de material (BARBERO, 2017). Quando curadas o processo de cura é irreversível, caso posto a altas temperaturas o epóxi irá se desintegrar, diferentemente dos termoplásticos, que podem ser reaproveitados em contato com temperaturas elevadas.

Quimicamente, as resinas epóxi são caracterizadas pela presença de um grupo chamado anéis oxiranos, as resinas mais comumente utilizadas são chamadas de Diglicidil éter de bisfenol A ou DGEBA (Figura 4).



**Figura 4** - Estrutura geral do Diglicidil éter bisfenol A. Fonte: Adaptada (HARPER; PETRIE, 2003) .

Os agentes de cura agem ramificando essas estruturas e estabelecendo ligações cruzadas entre essas moléculas. A escolha correta deste agente é

extremamente importante para que seja alcançado um equilíbrio em relação as propriedades, tempo de cura e forma de manuseio.

### 1.3.4 Fibras de Vidro

Com ótimas propriedades mecânicas os compósitos reforçados com fibra de vidro se destacam no meio das fibras sintéticas, por ser extremamente acessível quando se trata de valor econômico comparada a demais fibras que são suas concorrentes. Não é à toa que a fibra de vidro se estendeu não apenas ao mercado estrutural, aonde é usada para suportar diversos tipos de carga, mas também se introduziu em mercados como o odontológico e até mesmo na indústria da estética, onde são feitas unhas de fibra de vidro.

Esta fibra é produzida quando a sílica (ou areia) é aquecida a uma temperatura de aproximadamente 1600 °C e entra em seu estado líquido, neste momento este líquido é ao mesmo tempo resfriado rapidamente e lançado em orifícios extremamente finos que serão os responsáveis em dar o formato do fio. Além das vantagens aqui já citadas a fibra de vidro ainda abrange diversas outras características que facilitaram seu fracionamento nos mais diversos mercados, sendo elas a baixa condutividade térmica e elétrica, não é inflamável não propagando chamas e é um material tem alta resistência a corrosão (INEIA et al., 2021). Um dos problemas deste material é que ele é considerado frágil, tendo pouca deformação antes de sua ruptura. Pode ser distribuída das mais diversas formas sendo elas contínuas e alinhadas, descontínuas e alinhadas e descontínuas e orientadas aleatoriamente (Figura 5).



**Figura 5** – Formas da fibra de vidro: (a) Tecido. (b) Fibra picada. (c) Fibras. Fonte: (a) ([E-composites](#), 2022). (b) ([Telhaseco](#), 2022). (c) ([Cpicfiber](#), 2022).

Fibras com maior organização e maior comprimento tendem a apresentar melhor propriedades mecânicas do que aquelas ditas como aleatórias e com fios mais curtos. Um compósito reforçado com fibra de vidro (*Glass Fiber Reinforced Polymer – GFRP*) nada mais é que esta fibra banhada ou preenchida por materiais poliméricos que são materiais mais flexíveis possibilitando essa propriedade para o compósito, se tornando relativamente rígido, resistente e com alguma flexibilidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Um comprimento crítico da fibra é indispensável para que haja um aumento significativo nas propriedades mecânicas de um compósito. Este comprimento crítico é representado por  $I_c$  e pode ser calculado pela Equação 1.

$$I_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \cdot \tau_c} \quad (1)$$

Onde  $\sigma_f$  representa o limite de resistência a tração da fibra,  $d$  se trata do diâmetro do fio da fibra, e por fim  $\tau_c$  que estará atrelado ao menor valor entre ligação fibra-matriz e tensão de escoamento em cisalhamento da matriz correspondente para que seja considerado aquele que irá falhar primeiro após a aplicação de uma tensão. Para fins de comparação este comprimento para um compósito de fibra de vidro e um compósito de fibra de carbono costuma ser da ordem de 1 mm, sendo muitas vezes maior que o diâmetro da fibra (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

#### 1.3.5 Fibra de Sisal

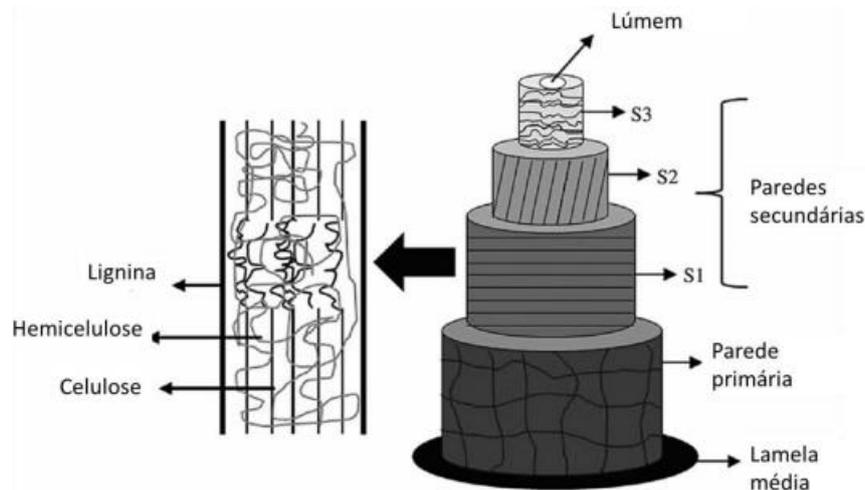
Novos tipos de fibra vêm conquistando um destaque no mercado de compósitos essas são chamadas de fibras naturais. Essas fibras podem conter propriedades físicas similares as fibras sintéticas e tem com sua principal vantagem o menor impacto na natureza, abrangendo toda a área industrial de uma maneira geral. Além disso, a preocupação com o impacto ambiental de todo e qualquer produto fabricado é cada vez mais um fator importante para seu desenvolvimento, para a área de materiais compósitos isso também se aplica.

Para uma fibra ser considerada natural ela terá que ter origem animal, vegetal ou mineral. Dentre esses tipos, o vegetal se destaca para a aplicação em compósitos e mais um subgrupo pode ser dividido dentre essas fibras em relação ao lugar da

planta em que ela foi extraída, podendo ser do caule, folha (fibra de Sisal), semente, fruta, madeira, casca e junco (LIBERA JUNIOR, 2019).

Como o desenvolvimento dessas fibras para aplicação em compósitos ainda é uma tarefa bastante recente, há alguns problemas que devem ser resolvidos para que as fibras naturais entrem de vez no mercado. Um deles é a absorção de umidade pela fibra, que pode gerar a diminuição de suas propriedades mecânicas, biodegradabilidade e mudança nas dimensões (WANG; SAIN; COOPER, 2006). Outro possível problema para uma fibra natural é a não uniformidade de suas propriedades, já que a influência de diversos itens como clima, altitude, idade, fertilidade do solo, umidade dentre os mais diversos tipos de condições devem ser exigidas para que a fibra tenha uma boa qualidade (ALVES; GIRÃO; MOREIRA LIMA, 2005). Esta qualidade está diretamente relacionada a composição da fibra que tem como seus principais componentes a celulose, hemicelulose e a lignina vale ressaltar que a porcentagem de lignina está diretamente relacionada a rigidez da fibra, já que ela atua como um agente de conexão das células (TEIXEIRA, 2019).

As fibras vegetais são compostas por regiões tanto cristalinas com muita ordenação quanto amorfas que são desordenadas. As fibras são caracterizadas por uma estrutura bastante definida, como mostra a Figura 6, onde o lúmen é canal central responsável pelo transporte de água e de outros nutrientes, seguido por as paredes secundárias, sendo uma interna (S3) uma média (S2) a externa (S1). Por fim aparece a parede primária junto a lamela média. As paredes secundárias têm arranjos compostos de microfibrilas orientadas em um ângulo definido (TEIXEIRA, 2019).



**Figura 6** - Estrutura de uma fibra vegetal. Fonte: Adaptado de (PEREIRA et al., 2015).

Algumas fibras naturais podem ser destacadas quando se trata de materiais compósitos e uma dessas é o sisal. O sisal (*Agave Sisalana*) é uma planta que foi trazida do México em aproximadamente 1903 e requer que as condições climáticas do local em que ela será cultivada sejam características de um clima semiárido, com grandes quantidades de luminosidade e quentes (ALVES; GIRÃO; MOREIRA LIMA, 2005).

O sisal irá florescer apenas uma vez em sua vida, sendo considerado uma planta monocárpica criando uma estrutura que é emitida como um caule, denominado de flecha (Figura 7). Uma planta de sisal é capaz de produzir de 50 a 70 folhas em seu primeiro corte, e os subsequentes tem um rendimento um pouco menor, retirando aproximadamente 30 folhas por planta. Seu ciclo de vida total varia de 8 a 12 anos e neste tempo é estimado que cada planta consiga produzir uma média de 220 folhas de 500 g a 600 g cada, variando a quantidade e até mesmo o tamanho da folha de acordo com o local plantado (ALVES; GIRÃO; MOREIRA LIMA, 2005).

Com a remoção das folhas desta planta, que pode ocorrer uma ou duas vezes no ano, dependendo da quantidade de água despejada pelas chuvas, após a colheita destas folhas é recomendado que no mesmo dia elas sejam desfibradas, tendo em vista que uma folha murcha tem uma dificuldade bem maior para ser desfibrada.

Esta etapa de desfibramento do sisal consiste em remover a polpa que envolve a fibra da folha através de uma raspagem. O ideal depois desta etapa seria lavar a fibra em tanques com água, deixando-a imersa por aproximadamente 20 horas. No Brasil essa etapa normalmente não acontece, visto a escassez de água e o custo deste processo. Por fim as fibras devem ser estendidas ao sol (Figura 7) para que sequem e deve ser removido o pó que está impregnado dentre as fibras em uma máquina chamada batedeira. Este pó não é desperdiçado e pode ser utilizado em ração de animais e até compostos agrícolas (SOUSA et al., 2016).



**Figura 7** - Processamento do Sisal. (a) Sisal (*Agave Sisalana*). (b) Fibra estendida ao sol para secagem. Fonte: ([Maestrovirtuale](#), 2022), (Alves; Girão; Moreira Lima, 2005).

Para a aplicação de materiais compósitos, o sisal tem características bastante interessantes, tendo baixa densidade, baixo custo, não abrasivas, não são tóxicas, são abundantes e suas propriedades mecânicas são comparáveis as de fibras sintéticas comumente utilizadas, como a fibra de vidro (LOPES, 2017). Em alguns casos se faz necessário o tratamento destas fibras para que tenham melhor desempenho para o papel que vão desempenhar e isto também é aplicável ao sisal. Comparada a outras fibras como a de curauá a de sisal tem propriedades mecânicas um pouco menor, já que a curauá varia em resistência a tração de 800-1400 MPa e módulo de elasticidade variando entre 20 e 30 GPa (LIBERA JUNIOR, 2019), contra os 468-700 MPa de resistência a tração e módulo elástico variando de 10 a 25 GPa para o sisal (SILVA, 2020).

#### 1.3.6 Superfície de contato Fibra/matriz

Uma das características mais importantes de um material compósito é a capacidade de aderência da fibra a matriz, se bem feito, a matriz exercerá o seu papel de transferir as tensões para a fibra e distribuí-las muito bem. Mas caso não ocorra o material irá perder diversas propriedades sendo elas principalmente mecânicas já que as fibras serão arrancadas da matriz ao invés de se romperem em um fenômeno conhecido com *pullout* (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; K.KAR, 2017).

Quando se trata de fibras naturais essas conexões entre fases se tornam mais delicadas, tendo em vista que esses materiais têm problemas de compatibilidade, no entanto, a solução destes problemas se encontra em prévios tratamentos químicos ou

físicos nas fibras para que se tornem mais rugosas e promovem uma melhora na adesão entre a fibra/matriz (TEIXEIRA, 2019).

O tratamento mais comum para a obtenção de fibras naturais de alta qualidade é o alcalino, esse tipo de tratamento com álcali é capaz de remover os principais componentes amorfos (lignina e hemicelulose) das fibras naturais. Estes polímeros orgânicos são focados pois são algumas das partes que mais absorvem água a fibra, tornando-a hidrofílica, já a matriz, tem dificuldade de aderir a superfície da fibra já que é hidrofóbica o que reforça ainda mais o uso de um tratamento para a fibra (LIBERA JUNIOR, 2019).

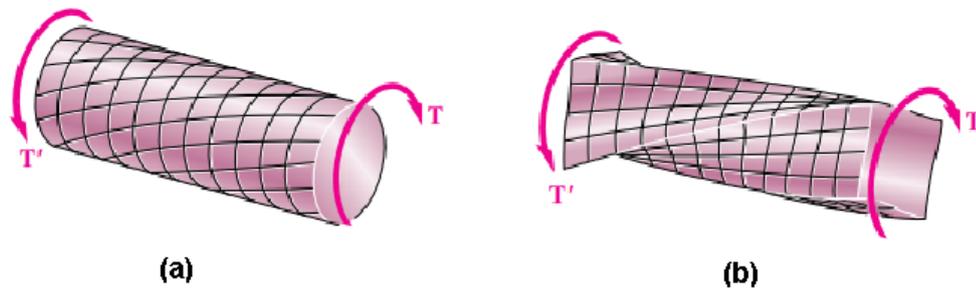
Em alguns casos estes tratamentos além de melhorar a aderência entre as fases de um compósito pode melhorar as propriedades de resistência mecânica e química da fibra.

Caso o tratamento não apresente boas respostas ou por algum motivo específico não consiga ser bem feito, isso poderá ser constatado quando os corpos de provas forem rompidos, já que o *pullout* é facilmente identificável, onde é possível ver que as fibras deslizem pela matriz ficando parcialmente ou totalmente para fora do lugar de rompimento do corpo de prova (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; K.KAR, 2017).

### 1.3.7 Entendendo a Torção

A torção pode ser considerada como a torção de um objeto causada por um momento orientada ao longo do eixo do componente (HIBBELER, 2017) . Este momento que tende a causar a torção é denominado torque (T), e quando aplicado a uma barra circular, o torque causará uma torção ao longo da barra. Uma outra característica em se tratando de seções transversais circulares (também aplicadas a tubos), é que toda sua seção permanece plana e indeformada quando submetida a uma torção. Embora, observando seções transversais em diferentes pontos da barra haverão rotações diferentes, cada seção transversal girará como um disco, essa característica somente é válida pois a seção transversal com essa característica é considerada axissimétrica (BEER, 2021) .

Por exemplo, ao torcer uma barra com seção transversal retangular não ocorrerá o mesmo fenômeno, já que nesta barra a torção irá gerar um empenamento, mudando a seção transversal de acordo com o local em que se está sendo analisada esta torção (BEER, 2021). A Figura 8 ajuda a entender a axissimetria.



**Figura 8** - Demonstração da torção em corpos com seções transversais distintas. (a) circular. (b) quadrada. Fonte: Adaptado (BEER, 2021).

Quando se abrange o assunto torção, outro importante aspecto e variável que deve ser notada é o que é chamado de ângulo de torção ( $\phi$ ). Considerando uma barra engastada apenas de um lado e com sua outra extremidade livre. Nesta extremidade livre será aplicado um torque, após esta aplicação, a barra apresentará um giro com um certo ângulo que foi introduzido anteriormente como ângulo de torção, que irá variar com o torque ( $T$ ) aplicado e o comprimento ( $L$ ) da barra (BEER, 2021).

Para que se determine esses valores de ângulo de torção é necessário conhecer uma propriedade do material e uma propriedade da seção transversal que está sofrendo a torção. A propriedade do material na qual é necessário o conhecimento é chamado de módulo de cisalhamento ou módulo de torção ( $G$ ) normalmente é dado em Pascal e é definido através da razão entre a tensão de cisalhamento aplicada a um corpo e sua deformação específica (GERE; GOODNO, 2018) ou obtido experimentalmente. Já a propriedade da seção transversal é chamada de momento polar de inércia ( $J$ ) e descreve a resistência de uma seção transversal devido apenas a deformação torsional.

Agrupando todas as informações podemos calcular o ângulo de torção ( $\phi$ ), no regime elástico pela equação 2 (BEER, 2021):

$$\phi = \frac{T \cdot L}{G \cdot J} \quad (2)$$

Como o foco, nas seções circulares, o momento polar de inércia para uma seção circular completa será a Equação 3 e analogamente a Equação 4 será para tubos, onde  $r$  correspondem aos raios sendo  $d_i$  o diâmetro interno do tubo e  $d_e$  o diâmetro externo:

$$J_{circular} = \frac{1}{32} \pi \cdot d^4 \quad (3)$$

$$J_{tubo} = \frac{1}{32} \pi \cdot (d_e^4 - d_i^4) \quad (4)$$

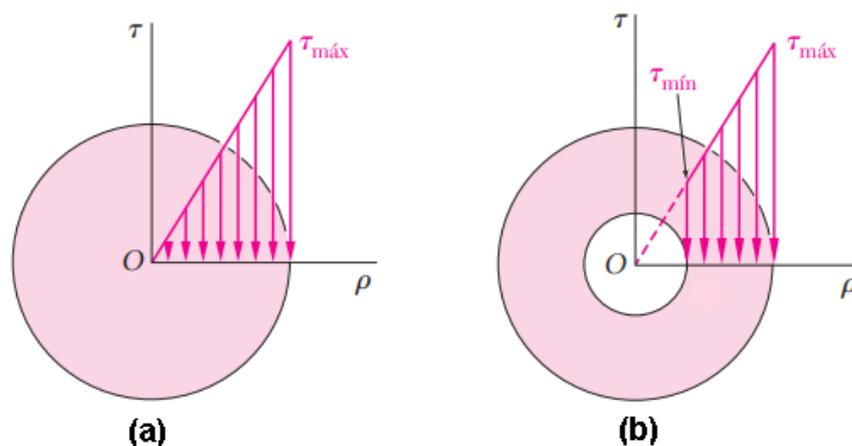
Ainda pensando no exemplo anterior, algo que também pode ser calculado é a deformação de cisalhamento máxima ( $\gamma_{m\acute{a}x}$ ), multiplicando o raio pelo ângulo de torção e dividindo-os pelo comprimento da barra (Equação 5), tendo em vista que a deformação cresce de acordo com a distância do centro da seção transversal, logo, pode-se generalizar a equação anterior considerando  $\beta$  como sendo a distância radial do centro da seção transversal, possibilitando calcular esta deformação em qualquer parte da barra (Equação 6) (BEER, 2021).

$$\gamma_{m\acute{a}x} = \frac{r\phi}{L} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\beta\phi}{L} \quad (6)$$

Analogamente a deformação de cisalhamento a tensão de cisalhamento máxima também ocorre na superfície externa da seção transversal e varia de acordo com a distância do centro desta seção até seu raio completo (BEER, 2021).

Vale ressaltar que seções transversais de barra ocas (tubos) reagem melhor que seções circulares sólidas quando expostos a torção, já que em sua parte central não haverá tensão de cisalhamento, como demonstrado na Figura 9.



**Figura 9** - Tensão de cisalhamento através da seção: (a) circular; (b) tubular. Fonte: Adaptado (BEER, 2021).

Essa tensão de cisalhamento pode ser calculada pela equação 7:

$$\tau = \frac{T\beta}{J} \quad (7)$$

Sendo uma função do Torque (T), a distância do centro da seção transversal e o momento polar de inércia da peça (BEER, 2021; GERE; GOODNO, 2018).

### 1.3.8 Aplicação da Torção para Materiais Compósitos

Muitos componentes estruturais nas indústrias são submetidos a carregamentos cisalhantes, principalmente quando falamos de eixo de transmissão, que estão constantemente sofrendo os mais diversos tipos de torção (BETEMPS; BARBIERI; VERRAN, 2021).

Principalmente quando tratando de veículos, sejam eles aéreos, terrestres ou aquáticos, a redução de peso para que maiores distâncias sejam percorridas com a menor quantidade possível de combustível é um tema de bastante relevância na área, se substituídos parte dos materiais metálicos por materiais mais leves e com resistência similares o aumento do rendimento deste transporte será considerável.

Na indústria automotiva, a redução de peso é uma das propriedades mais eficazes de reduzir o dano ambiental causado e isto é utilizado não somente para veículos de alto desempenho, mas em todos os tipos de veículos automotivos (KIMOTO et al., 2011). Um dos possíveis projetos que exemplificam isso seria o *Gurgel Supermini* que tem o chassi fabricado em metal mas sua carroceria completamente de fibra de vidro, contendo apenas 36 cavalos e pesando apenas 645 kg esse modelo de 1992 conseguia alcançar até 15 quilômetros por litro de gasolina, o que pra seu ano de lançamento era um valor extremamente significativo (Gurgel800, 2023).

Outra aplicação na área automotiva se dá nos eixos e semi-eixos de um veículo (Figura 10), que são responsáveis por transmitir a força do motor para as rodas do carro e permitir seu movimento, nestes componentes o torque é constantemente aplicado sendo necessário um estudo prévio sobre a torção ali exercida. O primeiro semi-eixo feito com materiais compósitos foi feito em 1985 e os resultados desta inovação foram bastante positivos, melhorando não somente o peso do veículo, mas tendo ótima absorção de vibrações, conforto na cabine e aumentando até mesmo a tração dos pneus (SIVAKANDHAN; SURESH PRABHU, 2015). Em um carro de

Fórmula 1 como exemplo, temos a haste de suspensão (*push-rods/pull-rods*), que sofre diversos tipos de tensões e deformações incluindo a torção (Figura 10).



**Figura 10** – Aplicação de tubos de compósitos: (a) Semi-eixo. (b) Conjunto de suspensão da Fórmula 1. Fonte: (a) ([worksmotorsports](https://www.worksmotorsports.com), 2022). (b) ([Tapscape](https://www.tapscape.com), 2022)

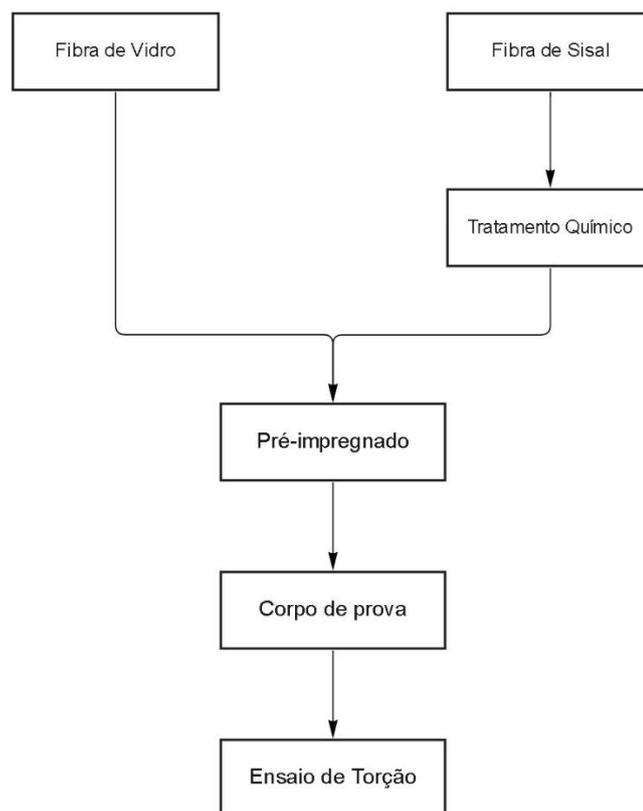
Também na área de transportes, a aviação já se encontra em níveis de uso e aplicação para compósitos bem desenvolvida, sendo utilizados para os mais diversos tipos de estruturas e componentes de uma aeronave. Um dos elementos que sofrem torção são os suportes das asas ou *stiffeners*, esses componentes quando bem projetados concentram a maioria das cargas de torção e flexão da estrutura da asa (MEGSON, 2016).



## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Materiais Utilizados

A resina utilizada foi a Araldite LY 1564 BR, junto ao seu agente de cura Aradur 42, ambos da marca *HUNTSMAN* e fornecidos pela empresa *E-composites*. A fibra de vidro fornecida pela *E-composites* é descrita como uma fibra unidirecional VRW700, tendo 70% das suas fibras orientadas para a direção principal e o restante a 90° desta direção. As fibras de sisal foram obtidas *in natura* no fornecedor e fabricante SISALSUL. Estas fibras são comercializadas com comprimento médio de 1,1 m. Para facilitar a visualização do processo que ocorrerá para cada uma das fibras o fluxograma da Figura 11 irá descrever a proposta da parte experimental deste trabalho.



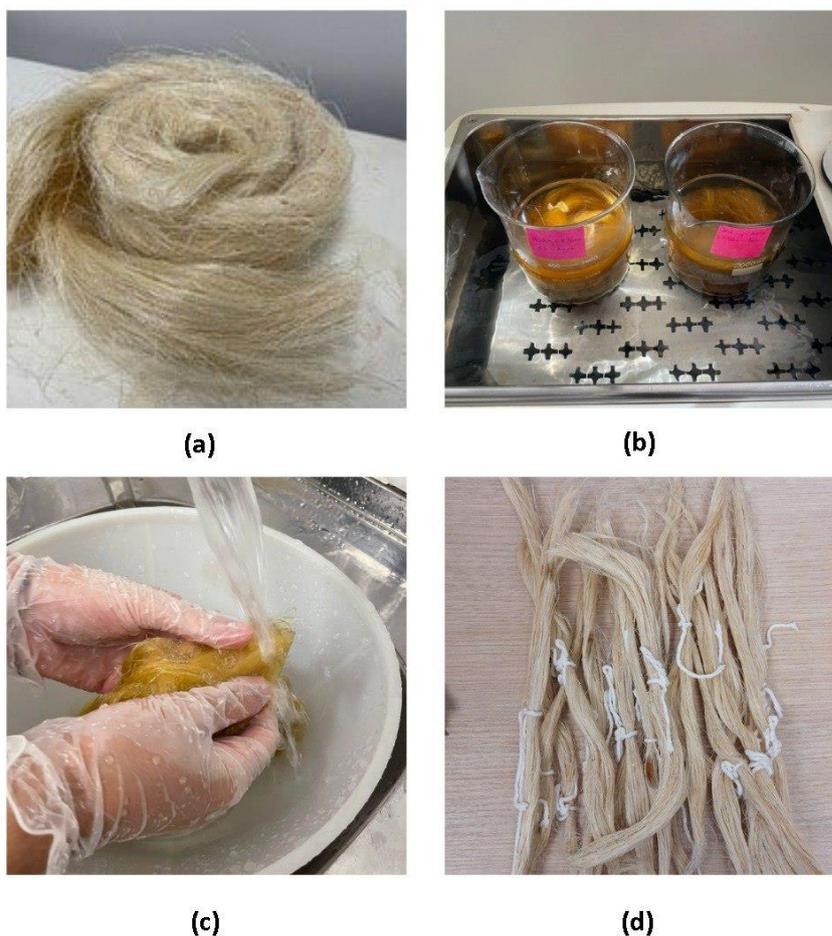
**Figura 11** - Fluxograma indicando as principais etapas experimentais deste trabalho.

### 2.2 Tratamento Superficial da fibra de Sisal com NaOH

Inicialmente cortou-se a fibra de sisal em aproximadamente 23-25 cm. Após cortadas as fibras foram separadas em partes menores e amarradas com barbante para que fosse iniciado o processo de tratamento superficial. Em seguida, as fibras de

sisal foram colocadas em beckers com água destilada até que ficassem completamente submersas. Posteriormente, os beckers já com as fibras e a água destilada, foram colocados em banho maria a 80 °C, equipamento Q215M da marca Quimis, mantendo uma agitação manual por 2 horas.

Após esse processo, a água foi removida de dentro dos beckers e dessa vez foi adicionada uma solução aquosa de hidróxido de sódio 5% (m/v), e de forma similar deixada em banho maria a 50 °C por 2 horas, também com agitação manual. A próxima etapa deste processo se trata de lavar as fibras com água destilada de modo com que fiquem com seu pH neutro e após isso, deixar as fibras secando por aproximadamente 96 horas, caso as fibras ainda estivessem úmidas, se fez necessário deixá-las até que sequem completamente. As etapas deste processo como um todo foram dispostas na Figura 12.



**Figura 12** – (a) Fibra de Sisal *in natura*. (b) Tratamento das fibras em Banho Maria das fibras. (c) Lavagem das fibras. (d) Fibras secas após o processo.

### 2.3 Determinação da Proporção Fibra/Matriz

Para uma comparação justa entre os dois tipos de fibra, se faz necessário manter a proporção de volume de fibra e matriz igual para ambos os compósitos. Neste trabalho a proporção escolhida foi de 70%v de matriz para 30%v de fibra, com base nisso foi calculada a densidade de cada compósito a partir da equação 8.

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{F_f}{\rho_f} + \frac{F_m}{\rho_m}} \quad (8)$$

Onde  $F_f$  e  $\rho_f$  correspondem a proporção de fibra e densidade de fibra, respectivamente e  $F_m$  e  $\rho_m$  as mesmas propriedades, mas referentes a matriz epóxi.

**Tabela 1** – Densidade calculada para cada compósito.

<b>Material</b>	<b>Densidade da fibra (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade do compósito (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Fibra de Vidro	2,55	1,38
Fibra de Sisal	1,45	1,23
Epóxi	1,15	-

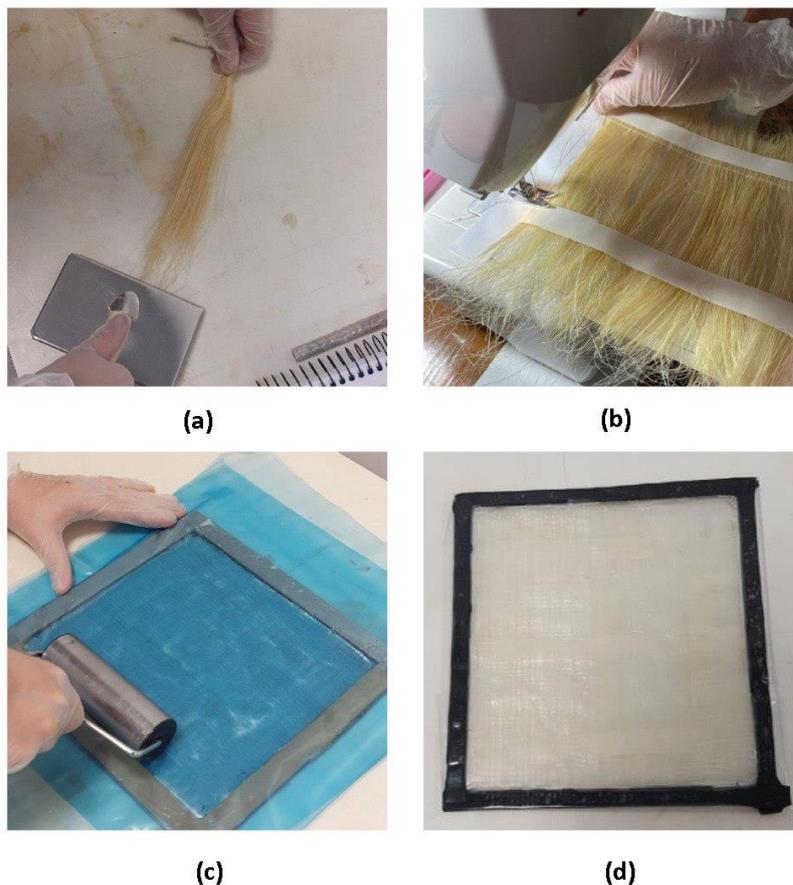
### 2.4 Confeccção dos Pré-impregnados

Para a confeccção dos pré-impregnados, foi utilizado o método conhecido como *hand lay-up*, o primeiro passo foi dispor as fibras de sisal de forma com que elas ficassem unidireccionais. Para isto, as fibras foram escovadas com uma rosqueadeira até ficarem lineares. Logo após, foram dispostas em uma folha de papel e manualmente arrumadas em cima de fitas adesivas, para deixa-las seguras, foram costuradas por meio de uma máquina de costura e na hora da aplicação somente retirada as fitas adesivas e a folha de papel, deixando as fibras alinhadas apenas pela costura.

A partir deste ponto, a produção dos prepregs são similares para ambas as fibras. A etapa se inicia com a mistura da resina epóxi com o seu agente de cura em um recipiente em temperatura ambiente, para a resina utilizada a proporção de partes em peso de resina para agente de cura é de 100:25 (resina: agente de cura), após misturados, a resina/agente de cura é posta em um degasador por 6 minutos em um

banho ultrassônico em um equipamento da Kondorteck, para que todas as bolhas sejam removidas de seu interior.

Logo após isto, as fibras de sisal e de vidro (70 %v) foram dispostas em um molde de 22 x 20 x 0,1 cm e são impregnadas com a resina, esse processo é manual e deve ser feito com cautela para que a resina se espalhe bem entre as fibras, para ajudar nessa distribuição foi utilizado um rolo de compressão que auxilia na retirada do acúmulo de bolhas, ajudando na impregnação do material e diminuindo a incidência de vazios. Com o objetivo de deixar o material bem preservado da umidade e não grudar em outras superfícies, este foi coberto em ambos os lados com folhas de polietileno e vedado com uma fita adesiva dupla face. Para esta resina foi informado pelo fabricante que para que chegue em seu estágio B, ou estado de gel é necessário deixá-lo por aproximadamente 3 horas a temperatura ambiente. Este tempo varia de acordo com a temperatura que o material ficará. Ao final do processo o material foi armazenado em congelador a aproximadamente -18 °C, onde ocorre a diminuição da velocidade de cura, possibilitando o armazenamento do prepreg.



**Figura 13** - Processamento para obtenção do prepreg: (a) Pentear das fibras. (b) Costura. (c) distribuição da resina através de um rolo. (d) Pré-impregnado de fibra de vidro.

## 2.5 Confeção dos Corpos de Prova

O processo utilizado foi o de *roll wrap*, seguindo a norma ASTM E 143 – 02. A primeira parte deste processo consistiu em aplicar o desmoldante 8 vezes em intervalos de 15 minutos em uma barra circular de alumínio com 9,4 mm de diâmetro, a qual servirá de molde para o prepreg. O material da barra ajuda no processo de desmoldagem, já que sua expansão térmica é mais alta que a dos compósitos. A orientação das fibras foi de  $45^\circ$  para ambas as fibras (segundo a Figura 14). Para que os corpos de prova ficassem com as dimensões padronizadas, os prepregs foram cortados previamente ao processo de enrolamento.



**Figura 14** - Orientação de enrolamento dos tubos.

O diâmetro interno de cada tubo foi justamente igual ao da barra de molde (9,4 mm), mas para manter a proporção de volume de 30% de fibra para ambos os compósitos, o número de voltas ao redor do molde foi diferente para cada um deles como demonstrado a Tabela 2. Para cada volta dada no compósito de fibra de vidro serão necessárias duas voltas no compósito de fibra de Sisal.

**Tabela 2** – Dimensões esperadas dos corpos de prova tubulares.

<b>Compósito</b>	<b>Diâmetro Interno (mm)</b>	<b>Diâmetro Externo (mm)</b>	<b>Comprimento (cm)</b>	<b>Número de voltas</b>
Sisal	9,4	13,4	10	4
Vidro	9,4	12	10	2

Os prepgs já enrolados ao molde (Figura 15b) foram cobertos por uma fita termoretrátil que pressionou o compósito contra o molde, deixando assim a superfície externa do tubo lisa e bem-acabada. Depois, o tubo semiacabado completou seu ciclo de cura a 120 °C por 30 minutos em uma estufa (Figura 15 a). Depois da cura completa, o tubo de compósito foi desmoldado (Figura 15c) usando um saca polias.

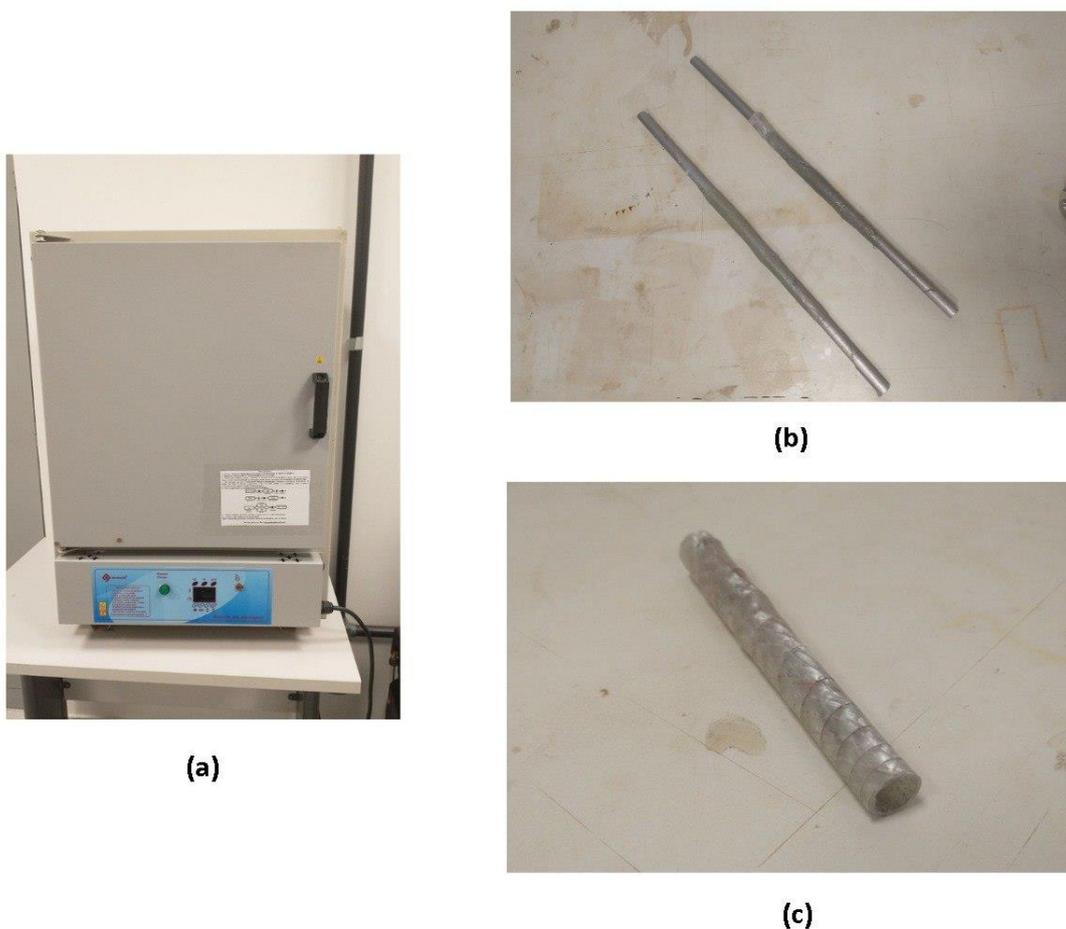


Figura 15 - Processo de obtenção dos corpos de prova: (a) Mufla. (b) Tubos curados no molde. (c) Corpo de prova tubular.

As amostras moldadas a partir de *roll wrap* foram utilizadas nos ensaios de torção pura para avaliação de sua resistência mecânica. A Tabela 3 mostra as dimensões dos corpos de prova. Para todas as amostras o erro foi de 0,05 mm conforme indicado pelo fabricante do instrumento de medição.

**Tabela 3 – Dimensões finais para cada tubo em compósito.**

Tubo em Compósito	Comprimento (mm)	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro Externo (mm)
Fibra de sisal	1	102	9,6
	2	100	9,9
	3	102	10,0
	4	97	9,8
	5	104	9,7
Fibra de vidro	1	98	9,8
	2	97	9,7
	3	97	9,6
	4	101	10,0
	5	98	9,85

## 2.6 Determinação de Densidade e de Teor Vazios dos Compósitos

Os corpos de provas podem ter seus resultados amplamente influenciados com a presença de vazios, reduzindo drasticamente as propriedades mecânicas do material, como se tratando de um processo de fabricação completamente manual é natural que haja vazios que os rolos não consigam alcançar.

Para calcular a quantidade de vazios e validar os corpos de prova, foram utilizadas amostras de cada pré-impregnado curado. A densidade destes compósitos foi determinada a partir de um volume e massa conhecidos de cada amostra com dimensões de 1 x 1 x 0,1 cm. A densidade foi determinada, dividindo a massa obtida pelo volume de cada amostra a seu volume total. As densidades teóricas dos materiais já foram calculadas anteriormente e se encontram na Tabela 1.

Por fim, para identificar a quantidade destes vazios ( $V_r$ ) foi utilizada a equação 9, onde,  $\rho_t$  corresponde a densidade teórica e  $\rho_r$  a densidade real:

$$V_r = \frac{\rho_t - \rho_r}{\rho_t} \quad (9)$$

## 2.7 Ensaio de Torção

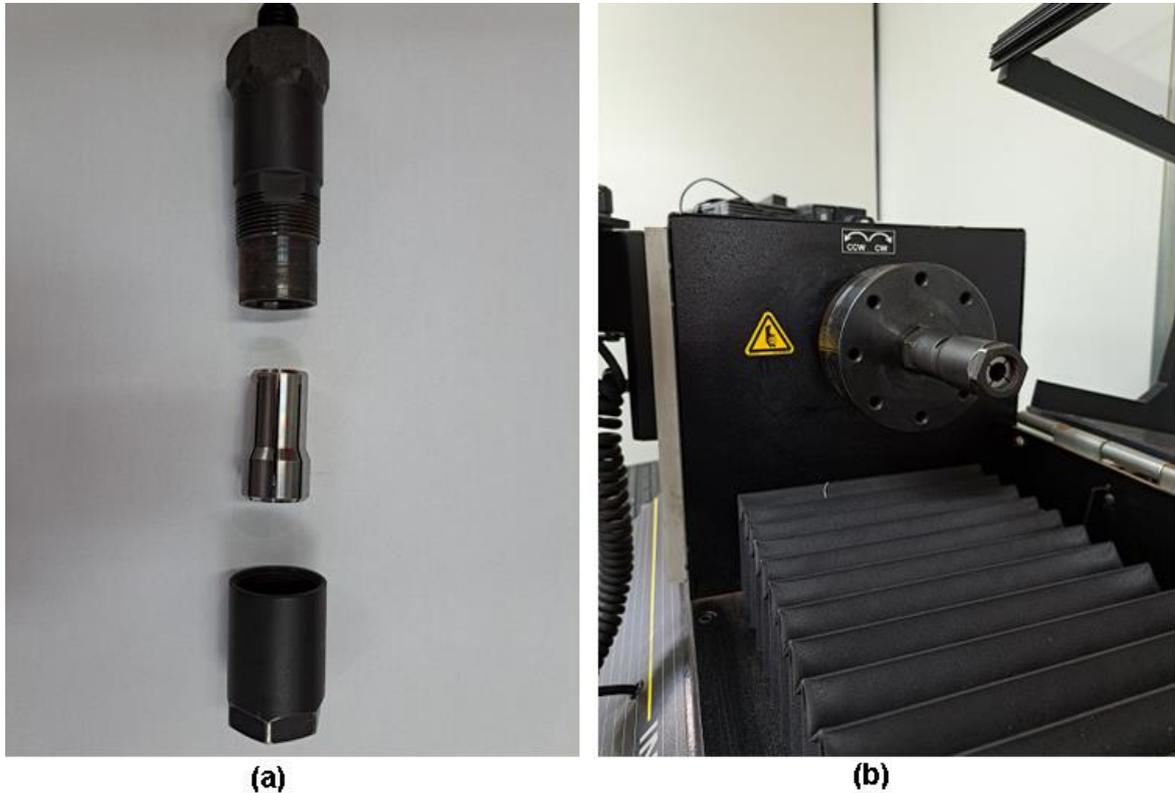
Para este ensaio foi utilizada uma máquina da marca INSTRON, modelo será o MT2 da linha *MT series*. Esse equipamento tem a capacidade de exercer até 225 Nm (2000lbf-in) de torque e alcançar a rotação máxima de 60 RPM e se encontra no laboratório de materiais da Universidade de Brasília – Campus do Gama (FGA). O processo iniciou-se com a inserção do corpo de prova no espaço de teste, encaixando através de mandris e o fixando a célula de torque (Figura 16). Como uma das contribuições deste trabalho, foi desenvolvido um vídeo com todos os passos para o ensaio de torção (disponibilizado em Link).



**Figura 16** - Instron MT2 - *MT series*

A Instron MT2 fornece acessórios que podem ser corretamente utilizados durante a realização dos testes de torção. O primeiro passo a se observar é qual a dimensão do corpo de prova, e escolher qual será o cabeçote e seu mandril correspondente. Para a máquina utilizada temos dois conjuntos completos de diferentes diâmetros, sendo um preferencialmente utilizados para fios contendo 28 mandris e dois cabeçotes e um segundo conjunto com diâmetros um pouco maiores para tubos e cilindros com maiores dimensões que contêm 22 mandris e dois cabeçotes específicos, ver (Figura 17). Quando definido o mandril necessário para o

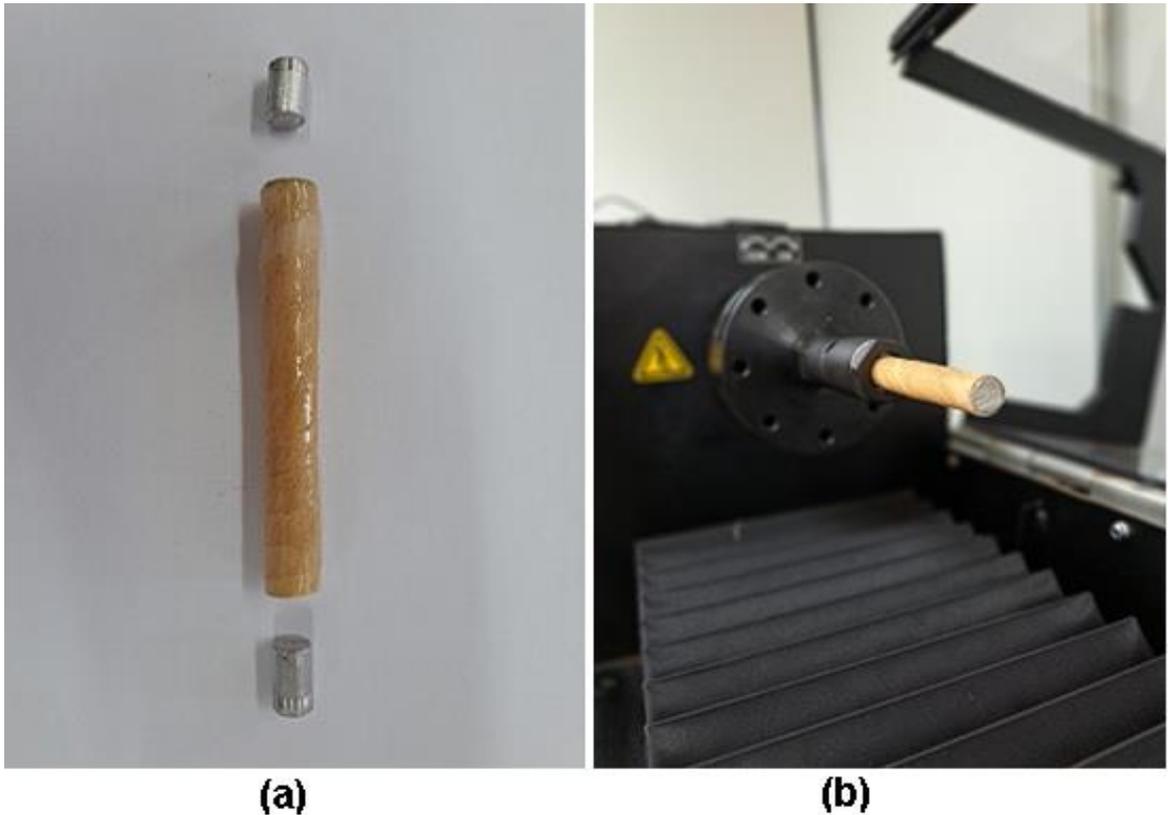
teste basta encaixar o cabeçote a parte principal da máquina e em seguida encaixar o mandril no cabeçote e em seguida, fixar o corpo de prova conforme a Figura 17.



**Figura 17** - Montagem do cabeçote: (a) Encaixe do mandril. (b) Encaixe do cabeçote na máquina

Para que o ensaio de torção ocorra como o planejado é necessário que as amostras estejam devidamente encaixadas na máquina, além disso, é necessário observar se os mandris estão segurando o corpo de prova de modo que não danifique as amostras e não permitam com que elas deslizem durante o ensaio.

Para isso foi utilizado pequenas barras circulares de alumínio dentro do corpo de prova, apenas no local em que o corpo de prova é fixado pelo mandril, conforme a Figura 18. Após, a fixação da amostra na máquina de torção, configurou-se os parâmetros para início dos testes, a velocidade de rotação neste teste foi de 1º/s. Vale ressaltar também que é possível submeter os corpos de prova a tração durante o teste de torção, o que resultaria em uma carga combinada para os corpos de prova, como demonstrado na Figura 18.



**Figura 18** - Inserção do corpo de prova: (a) Encaixe dos suportes. (b) Encaixe do corpo de prova à máquina.

O teste pode termina a partir de vários parâmetros que serão sugeridos pelo usuário. O teste foi realizado até a fratura do corpo de prova.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Manufatura dos corpos de prova tubulares

Na parte experimental, foi explicado como foram obtidos os corpos de prova e o resultado deste processo, no entanto, durante o desenvolvimento como um todo houve várias dificuldades. O primeiro obstáculo empregado a essa etapa foi a resina utilizada no prepreg, como uma primeira tentativa a resina utilizada foi a HEX-135 e seu endurecedor FAST. Essa resina, diferentemente da utilizada efetivamente no trabalho, tem um tempo de cura bastante reduzido, cerca de 25 minutos a temperatura ambiente. Assim o prepreg com essa resina curou rapidamente, dificultando o enrolamento do tubo. A mudança para a resina LY 1564 corrigiu se mostrou mais adequada para esta aplicação, tendo em vista que seu processo de cura é lento, proporcionando o estado de gel por um tempo maior, facilitando a manipulação.

O segundo obstáculo foi a superfície do corpo de prova. Ao colocar o prepreg enrolado na estufa, a folha de pré-impregnado abriu, não possibilitando a cura correta do corpo de prova. Assim, a fita termoretrátil solucionou este problema. Com o aumento da temperatura, a fita se contraiu, pressionando o prepreg contra o molde, formando uma superfície mais lisa para o corpo de prova.

O terceiro obstáculo desta etapa foi a retirada dos tubos de seus moldes (barras de alumínio). Em duas tentativas anteriores, a retirada do material do molde sem danificar o tubo não foi possível (Figura 19). Isto se deu, pois, a resina curada aderiu ao molde e o desmoldante colocado não foi o suficiente, já que foi aplicado apenas uma camada antes de colocar o material na estufa para que fosse curado. Como correção deste problema o desmoldante foi aplicado por 8 vezes no molde de 15 em 15 minutos, para que fosse formada uma fina película de desmoldante, permitindo que o material fosse removido com maior facilidade.



**Figura 19** - Tubo com avarias após tentativa de remoção do molde.

Como resultado da correção de todos esses problemas, os tubos foram finalmente obtidos. O método *roll wrap*, embora pareça simples, deve levar em consideração todos esses fatores estudados a fim de obter tubos livres de imperfeições.

### 3.2 Determinação de densidade e teor de vazios dos pré-impregandos

Para a comprovação da qualidade dos corpos de prova fabricados utilizando o método de pré-impregnação e o *roll wrap*, foram calculadas a densidade e o teor de vazios conforme descrito na seção 2.5 deste trabalho.

**Tabela 4** – Densidades e volume de vazios dos pré-impregnados.

Pré-impregnado	Densidade		Teor em vazios (%)
	real ( $g/cm^3$ )	Densidade teórica ( $g/cm^3$ )	
Sisal	$1,20 \pm 0,021$	1,23	2,5
Vidro	$1,33 \pm 0,033$	1,38	3,6

É notável que o teor de vazios dos pré-impregnados de fibra de vidro seja maior em relação aos de fibra de sisal. Mesmo após a degasagem da resina e a passagem do rolo sobre os pré-impregnados durante a fabricação do compósito não foi o suficiente para anular completamente todos os vazios do compósito.

Ao comparar o teor em vazios com estudos recentemente realizados, esses valores encontram-se dentro do esperado, para a fibra de sisal o compósito de sisal se comportou 59% melhor que ao trabalho realizado, já que neste trabalho a

porcentagem de vazios encontradas foi de 4,22% e a fibra de vidro obteve cerca de 10% menos vazios que o estudo onde foi encontrado 3,98% de vazios (TEIXEIRA, 2019).

### 3.3 Resultados do Ensaio de Torção

Os resultados obtidos do ensaio de torção encontram-se na Tabela 4. Para a obtenção dos dados apresentados na Tabela 4 foi necessário o uso das Equações 2 e 4 juntamente aos dados recebidos do teste de torção.

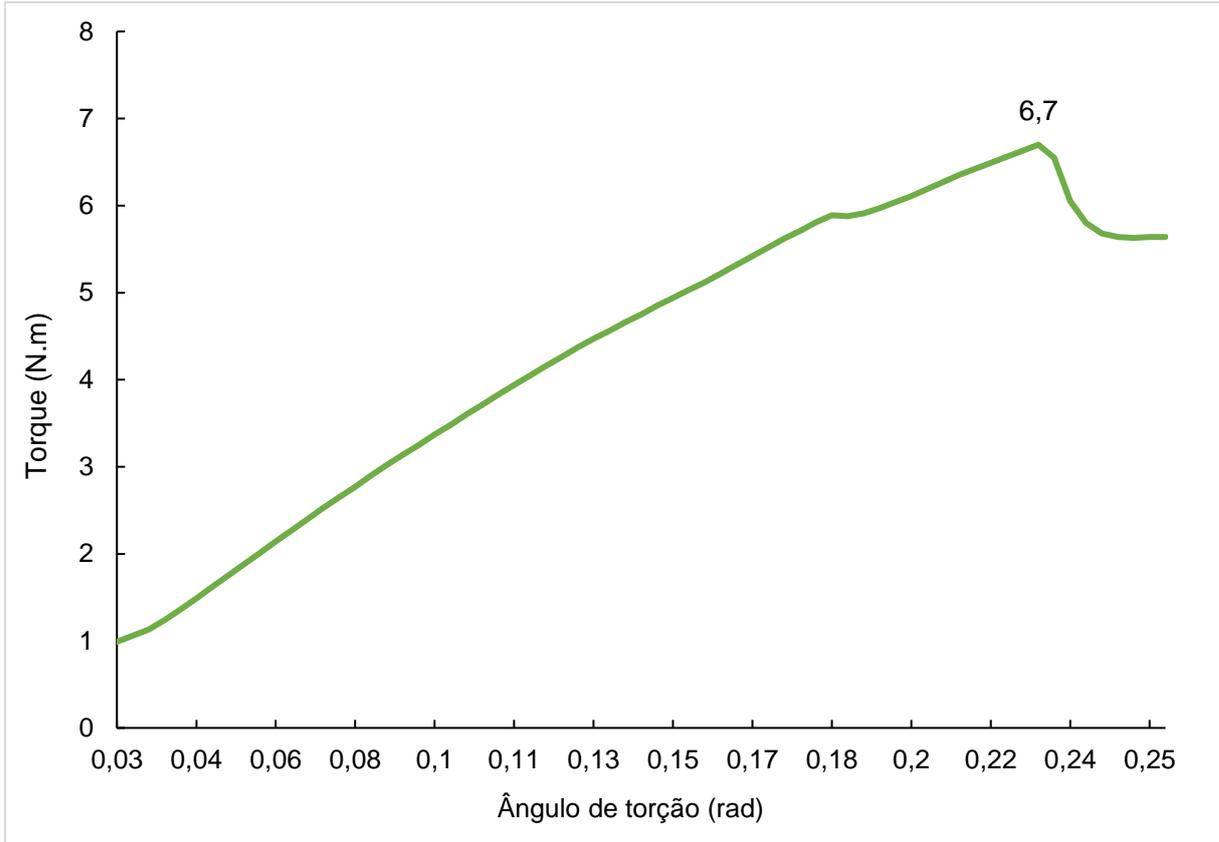
A título de ilustração, optou-se pela representação de uma única amostra devido a semelhança entre as curvas. Ademais, todos os dados obtidos das curvas estão descritos nas Tabela 4, conforme citado no parágrafo anterior. Adaptou-se os valores de dimensão e resultado do teste para cada corpo de prova.

Para o corpo de prova 1 feito com fibra de sisal (Tabela 3) temos as medições de comprimento (L) de 10,2 cm, diâmetro externo ( $d_e$ ) de 13 mm e o diâmetro interno ( $d_i$ ) de 9,7 mm. Fazendo a conversão dessas medições e aplicando esses valores a Equação 4 encontrou-se o momento polar de inércia do corpo de prova têm-se:

$$J_{sisal,1} = \frac{1}{32} \pi \cdot (0,013^4 - 0,0097^4)$$

$$J_{sisal,1} = 0,1935 \text{ m}^4$$

A Figura 20 mostra o gráfico gerado pelo ensaio de torção. E por meio deste teste, foi possível obter um gráfico de torque-ângulo de rotação. Assim sendo, algumas informações geradas por essa figura foram obtidas.



**Figura 20** - Torque x Ângulo de torção para o corpo de prova 1 de fibra de sisal.

Como destacado na Figura 20, o pico de toque que o corpo de prova suportou foi de 6,7 (N.m) rompendo após a aplicação deste momento, observando-se o eixo x do gráfico notou-se que o corpo de prova sofreu uma deformação de 0,23 (rad). Junto ao comprimento do corpo de prova (Tabela 3), o cálculo do momento de inércia (J) a partir desses dados retirados do gráfico podem agora ser inseridos a equação 2, resultando assim no módulo de cisalhamento (G).

$$G_{sisal,1} = \frac{T_{sisal,1} \cdot L_{sisal,1}}{\phi_{sisal,1} \cdot J_{sisal,1}} = \frac{6,7[N \cdot m] \cdot 0,102[m]}{0,23[rad] \cdot 1,935 \cdot 10^{-9}[m^4]}$$

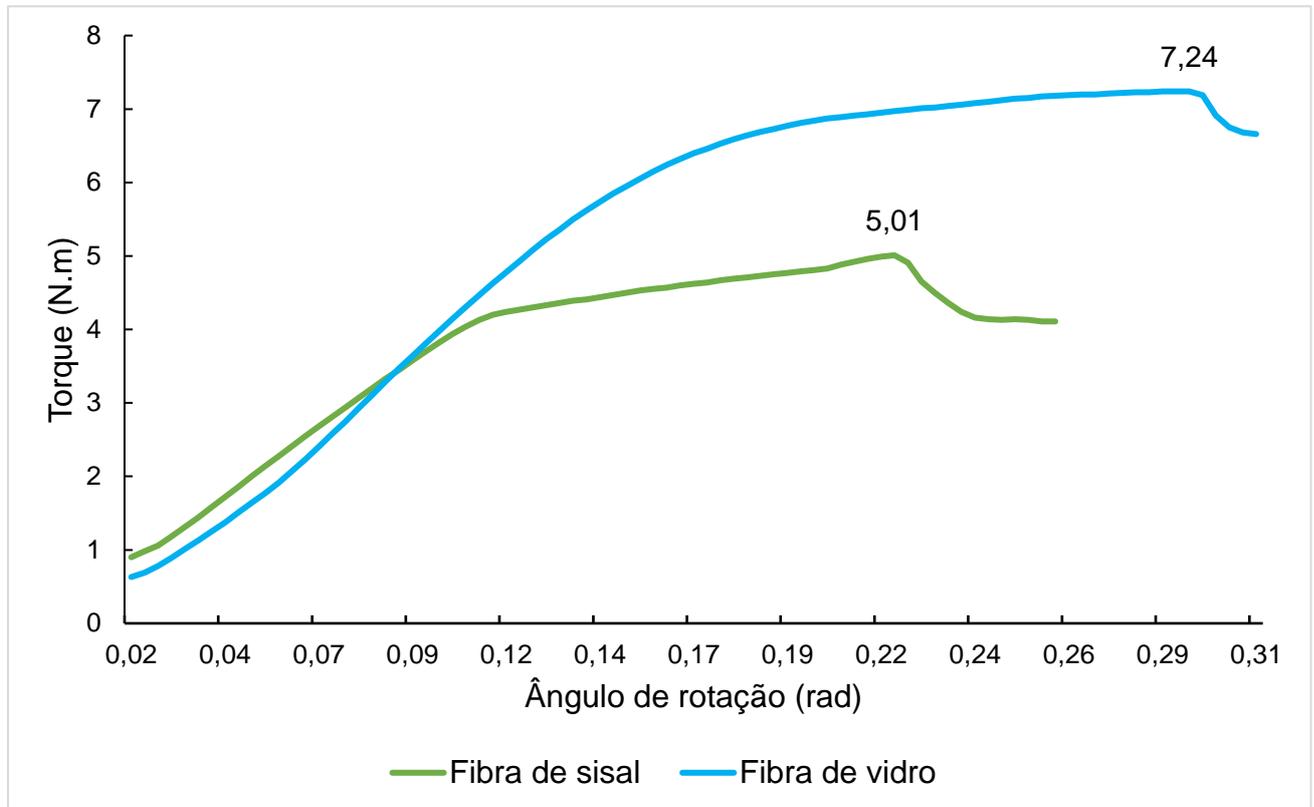
$$G_{sisal,1} = 1535688409,750 \left[ \frac{N}{m^2} \right] \text{ ou } 1,536 \text{ GPa}$$

Como explicado anteriormente para os demais 9 corpos de prova o processo foi o mesmo, resultando nos dados apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Resultados dos testes de torção para todas as amostras dos diferentes tubos em compósito.

Tubo em Compósito	Comprimento (m)	Torque máx (N.m)	Ângulo de quebra (rad)	Momento de inércia (m <sup>4</sup> )	Módulo de Torção (GPa)	
Fibra de sisal	1	0,102	6,70	0,23	1,935E-09	1,54 ± 0,06
	2	0,100	5,01	0,23	1,730E-09	1,26 ± 0,06
	3	0,102	2,32	0,12	1,572E-09	1,25 ± 0,06
	4	0,097	3,00	0,11	2,260E-09	1,17 ± 0,06
	5	0,104	5,24	0,17	2,296E-09	1,39 ± 0,06
Média	-	-	4,45 ± 0,79	0,17 ± 0,026	-	1,32 ± 0,06
Fibra de vidro	1	0,098	8,51	0,20	1,730E-09	2,41 ± 0,31
	2	0,097	7,57	0,16	1,605E-09	2,86 ± 0,31
	3	0,097	7,24	0,29	1,487E-09	1,62 ± 0,31
	4	0,101	8,20	0,15	1,654E-09	3,34 ± 0,31
	5	0,098	7,10	0,21	1,630E-09	2,03 ± 0,31
Média	-	-	7,72 ± 0,027	0,20 ± 0,025	-	2,45 ± 0,31

Notou-se que os compósitos de fibra de vidro obtiveram os maiores valores de resistência mecânica quando comparados aos compósitos de fibra de sisal. Observou-se que para os parâmetros de torque máximo onde a fibra de sisal apresentou 42% menos efetiva, ângulo de quebra resultado que mais aproximou as duas fibras com a superioridade da de vidro em 15% e módulo de cisalhamento que por sua vez, também houve um resultado positivo, para a fibra de vidro, com cerca de 46% a mais que a fibra de sisal,. A Figura 21 mostra os valores médios de ambos os materiais (correspondentes as amostras 2 de sisal e amostra 3 de vidro), observa-se o torque atingido pela a amostra de fibra de vidro foi de 7,24 (N.m) junto a um ângulo de torção de 16,61°, enquanto a de fibra de sisal atingiu apenas 5,01 (N.m) de torque com um ângulo de torção de 13,17 °.



**Figura 21** - Comparação de amostras médias: Vidro x Sisal

A resistência a torção dos compósitos reforçados com fibras quando submetidos ao ensaio depende principalmente das propriedades mecânicas individuais do reforço, teor ou porcentagem de fibra, orientação, comprimento das fibras e da superfície de contato entre a fibra/matriz.

A fibra de vidro se sobressaiu com melhores resultados mecânicos em relação a fibra de sisal devido as suas propriedades mecânicas de resistência que são mais elevadas. No entanto, optou-se por utilizar a fibra de sisal, que embora tenha uma perda de resistência de 46% em relação a de vidro, por ser uma fibra biodegradável e com densidade menor que a fibra de vidro, além disso, resultados de torção na literatura sobre essa fibra são escassos.

Ademais, percebeu-se a orientação das fibras e o processo de fabricação podem interferir nos resultados mecânicos, pois, todos os corpos de prova foram produzidos de uma maneira completamente manual. Além disso, a fibra de sisal passa por um processo totalmente manual já que suas lâminas de fibra foram costuradas e

dispostas manualmente gerando alguns erros associados a este processo, caso este que não ocorre com as fibras de vidro que se encontravam perfeitamente orientadas e alinhadas (Figura 22), tendo em vista que essas fibras foram costuradas e alinhadas por máquina com extrema precisão.



**Figura 22** - Comparação entre o alinhamento das fibras de vidro e sisal.

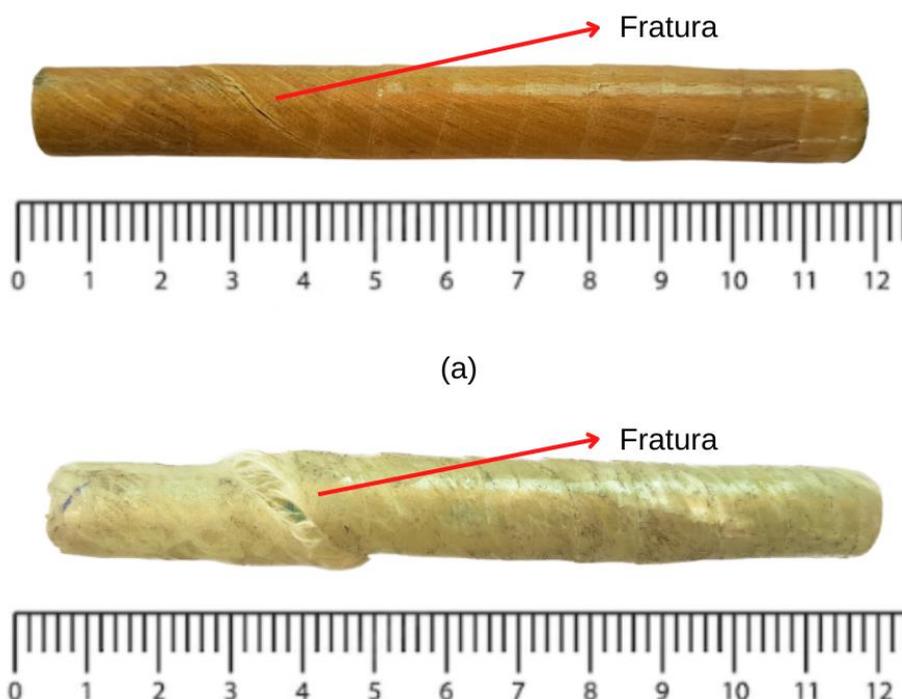
Por fim, a superfície de contato entre a fibra/matriz foi outro fator que pode ter contribuído para essa diferença de valores entre as amostras. As fibras de vidro têm uma adesão extremamente boa com matrizes poliméricas. Além disso, o tratamento químico feito na fibra de sisal foi extremamente eficaz e isso foi demonstrado em um estudo que sugere a comparação destes tratamentos feitos em fibras naturais (TEIXEIRA, 2019) chegando a bons resultados com o tratamento em hidróxido de sódio (NaOH).

O conjunto destes fatores facilitam a distribuição de tensão entre a matriz e a fibra, permitindo assim que a matriz cumpra seu papel com maior eficácia e conseqüentemente resultando números melhores de resistência. Em um estudo conduzido por (H. DE CARVALHO; S. CAVALCANTI, 2006) é citada esta possível diferença quando tratado de processos de fabricação dos corpos de prova quanto aos resultados mecânicos.

É intrigante notar, como as propriedades mecânicas dos materiais não variaram mesmo com a diferença de dimensões de seus corpos de prova, que embora alguns corpos de prova tenham resistido menos à torção, quando considerado também suas dimensões (pelo momento de inércia), isso é contornado e é mantido as suas propriedades mecânicas, o que é uma forma de comprovar que o material se manteve com propriedades extremamente parecidas independente de qual corpo de prova utilizado. Uma boa exemplificação para tal feito seriam a segunda e terceira amostras feitas com fibra de sisal (Tabela 4), que embora tenham resistido e se deformado quantidades totalmente diferentes ainda mantiveram quase que constante o módulo de cisalhamento do material.

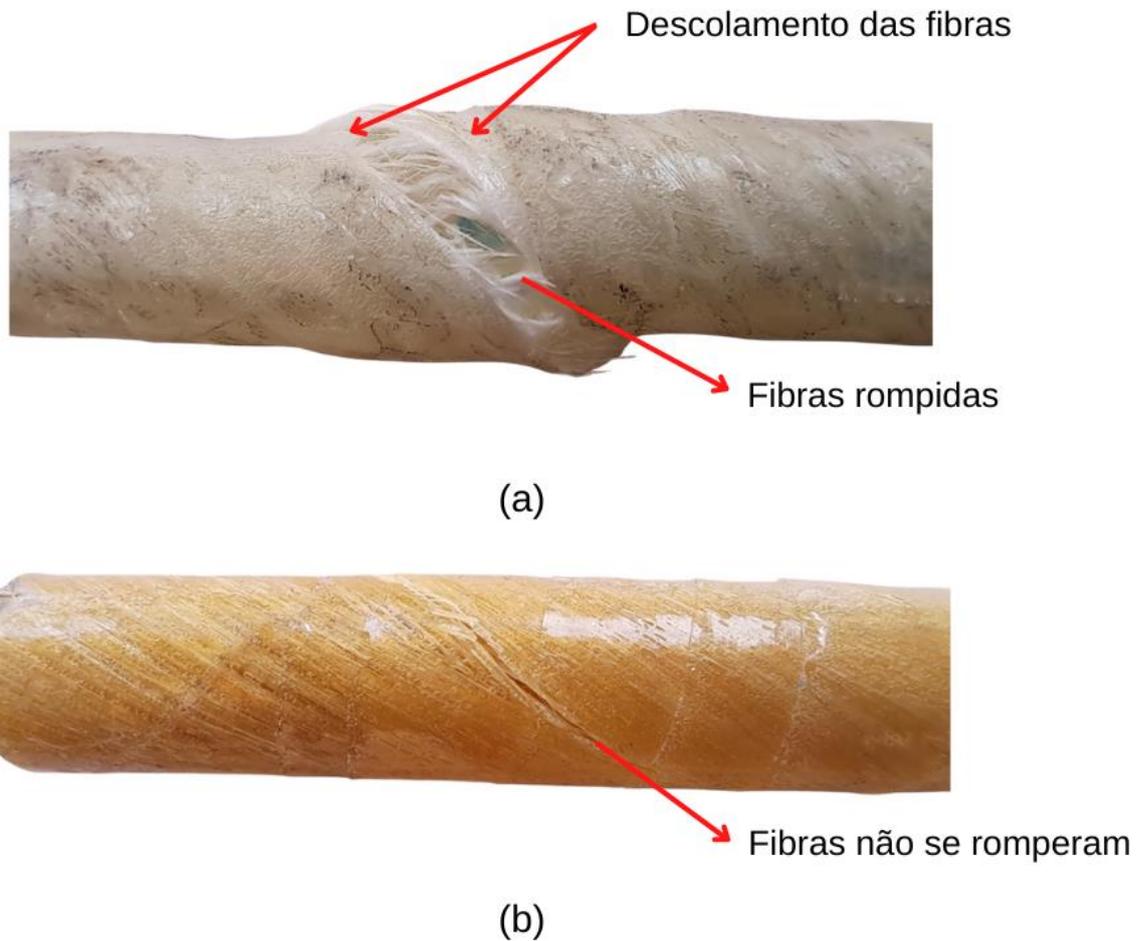
#### 3.4 Análise da superfície fraturada

Observando a Figura 23, é perceptível que o rompimento de ambas as amostras foi similar, não conseguindo romper diretamente as fibras, mas acompanhando seu alinhamento e separando a fibra da matriz. Por meio da análise de torção são possíveis dois tipos principais de fratura, quando o material é considerado dúctil, ele tem um rompimento perpendicular a seu eixo longitudinal, já um material considerado frágil, a fratura ocorre projetando um eixo paralelo a  $45^\circ$  aproximadamente (BEER, 2021).



**Figura 23** - Corpos de prova após ensaio de torção: (a) Compósito com fibra de sisal. (b) Compósito com fibra de vidro

O tipo de fratura observado para ambos os corpos de prova (Figura 23) é condizente com os esperados na literatura (HE; VAZ; CAIRE, 2021). Outra possível causa do rompimento acompanhando as fibras, é que quando um material é submetido a torção simples a tensão máxima de tração é encontrada a um plano a exatos  $45^\circ$  do eixo. Observando mais atentamente esses rompimentos é possível notar que embora ambos falhem na mesma direção, os dois tem detalhes diferentes como demonstrando na Figura 24.



**Figura 24** - Detalhamento da fratura dos corpos de prova: (a) Compósito de vidro. (b) Compósito de sisal

É perceptível que algumas fibras do corpo de prova feito a partir de fibras sintéticas foram completamente rompidas, enquanto no compósito de fibra de sisal isso não ocorre, no momento seguinte ao que o material se rompe diversas fibras têm que suportar uma tração quase que individualmente, e nesse caso a fibra de sisal teria

uma vantagem, tendo em vista que a espessura é fundamental quando tratada de resistência a tração das fibras (BRASIL et al., 1972).

Em suma, os corpos de provas orientados a  $45^\circ$  não favorecem os testes de torção simples realizados nesse projeto, como pode ser observado em ambos os corpos de prova. As fibras não conseguiram desempenhar o papel de receber a carga totalmente, justamente por essa disposição as fibras foram descoladas uma das outras, como demonstrado na Figura 24, fica perceptível esse descolamento tanto nos compósitos de vidro quanto nos de sisal, apenas separando as fibras e não as rompendo.

## 4 CONCLUSÕES

A confecção dos pré-impregnados foi positiva, já que a diminuição da temperatura adiou significativamente o processo de cura e permitiu que os compósitos fossem utilizados em um outro momento. Ainda a escolha da resina apropriada para impregnados também favorece a confecção dos tubos.

A confecção do corpo de prova o método de *roll wrap* apresentou algumas dificuldades por conta da destreza necessária e a quantidade significativa de materiais a serem minuciosamente fabricados. Neste processo também foram necessárias várias adaptações para que fosse possível principalmente a retirada do corpo de prova do molde, que se provou a maior complicação deste processo.

Para a validação da qualidade dos compósitos, o teor de volume de vazios foi inferior a 4%, que é um valor aceitável para fabricação manual. Vale ressaltar que a fibra de sisal obteve melhores valores, já que apresentou apenas 2,5% de vazios contra 3,6% do compósito de fibra de vidro.

Com relação aos ensaios de torção, obteve-se resultados satisfatórios. Além disso, foi possível otimizar o ensaio de torção na FGA. A comparação entre os módulos de torção dos compósitos mostrou uma clara vantagem dos compósitos de fibra de vidro em relação aos de fibra de sisal. No entanto, os resultados deste trabalho sugerem que uma melhor organização das fibras e adesão entre fibra matriz pode proporcionar melhores propriedades para compósitos com fibras naturais.

Ademais, a maior vantagem de fibras naturais é sem dúvida o desenvolvimento sustentável e a preocupação com o meio ambiente, associado com menor densidade, podendo ser um material em potencial para o desenvolvimento de estruturas tubulares.

### 4.0.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar o enrolamento filamentar para comparação de tubos em torção, obtendo corpos de prova ainda mais uniformes
- Comparar o módulo de cisalhamento de um mesmo compósito, variando apenas a angulação das folhas.
- Definir um módulo de cisalhamento esperado, e a partir disto mudar a dimensão dos corpos de prova de fibra de vidro e sisal, para verificar a

diferença que os dois materiais teriam em relação a dimensão para um mesmo resultado.

- Incluir no estudo um compósito híbrido.
- Comparar a torção apenas as fibras de sisal e vidro.

## REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALVES, M. O.; GIRÃO, E.; MOREIRA LIMA, R. **Diagnóstico socioeconômico do setor sisaleiro do Nordeste brasileiro**. 4. ed. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2005. v. 1

AEROIN. **Boeing coloca uma nova data-alvo para retomar as entregas do 787**. 2022 Disponível em: < <https://aeroin.net/boeing-coloca-uma-nova-data-para-retomar-as-entregas-do-787/> >. Acesso em: 06 de agosto de 2022.

BARBERO, E. **Introduction to composite materials design**. Third ed. Londres - NY: CRC Press, 2017.

BARRETO BEVITORI, A. **Avaliação das Propriedades e Estrutura de Fibras de Rami e seus Compósitos Poliméricos**. Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 2014.

BEER, F. P. **Mecânica dos materiais (8a. ed.)**. 8. ed. São Paulo: McGraw Hill Brasil Ltda, 2021.

BETEMPS, M. I.; BARBIERI, R.; VERRAN, G. O. A digital torsimeter for torsion testing of materials and shear elasto-plastic parameters evaluation. **Revista Materia**, v. 26, n. 1, 2021.

BRASIL, M. A. M. et al. **Variação das características e das propriedades físico-mecânicas com a refinação da celulose sulfato de madeira de Eucalyptus saligna**. [s.l: s.n.].

CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. **Materials science and engineering: an introduction**. 9. ed. Rio de Janeiro: Gen, 2018.

COMPOSITESWORLD. **Is the BMW 7 Series the future of autocomposites?**. 2022. Disponível em: < <https://www.compositesworld.com/articles/is-the-bmw-7-series-the-future-of-autocomposites> >. Acesso em: 06 de agosto de 2022.

GARCÍA-MANRIQUE, J. A. et al. Study of the degree of cure through thermal analysis and Raman spectroscopy in composite-forming processes. **Materials**, v. 12, n. 23, 1 dez. 2019.

GAY, D.; HOA, S. V. (SUONG V. ); TSAI, S. W. **Composite materials : design and applications**. 4. ed. Paris: CRC Press, 2003.

GERE, J. M.; GOODNO, B. J. **Mecânica dos materiais – Tradução da 8ª edição norte-americana**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2018.

Gurgel800. **Gurgel supermini**. 2023. Disponível em: < <https://www.gurgel800.com.br/gurgel/?supermini> > . Acesso em: 04 de janeiro de 2023

H. DE CARVALHO, L.; S. CAVALCANTI, W. **Propriedades Mecânicas de Tração de Compósitos Poliéster/ Tecidos Híbridos Sisal/ Vidro**. [s.l: s.n.].

HARPER, C. A.; PETRIE, E. M. **Plastics Materials and Processes A Concise Encyclopedia**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

HE, Y.; VAZ, M. A.; CAIRE, M. Stress and failure analyses of thermoplastic composite pipes subjected to torsion and thermomechanical loading. **Marine Structures**, v. 79, 1 set. 2021.

HIBBELER, R. C. **Engineering Mechanics Statics & Dynamics**. 14. ed. Hoboken, New Jersey : Pearson Education, Inc, 2016.

INEIA, A. et al. Barras de fibra de vidro, uma alternativa inovadora e suas potencialidades: revisão bibliográfica. **Tecno-Lógica**, v. 25, n. 2, p. 243–251, 5 jul. 2021.

KIMOTO, N. et al. **Studies on Torsional Strength of Carbon Fiber Composites Shaft by Inovate Sheet Widin**. Saitama: [s.n.].

K.KAR, K. **Composite Materials**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

LENGSFELD, H. et al. **Composite Technology: Prepregs and monolithic Part Fabrication Technologies**. Munich: Hanser Publications, 2016.

LENGSFELD, H.; WOLFF-FABRIS, F. **Composite Technology: Prepregs and Monolithic Part Fabrication**. Munich: © Carl Hanser Verlag, Munich 2016, 2016.

LIBERA JUNIOR, V. D. **Laminados de fibra de curauá/epóxi obtidos a partir de pré-impregnados**. Dissertação de Mestrado—Brasília: Universidade de Brasília - UnB, 2019.

LOPES, B. L. S. **Polímeros reforçados por fibras vegetais uma revisão sobre esses compósitos**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

MAESTROVIRTUALE. **Agave americano: características, habitat, usos, cultivo**. 2022. Disponível em: < <https://maestrovirtuale.com/agave-americano-caracteristicas-habitat-usos-cultivo/> >. Acesso em: 07 de agosto de 2022

MEGSON, T. H. G. (THOMAS H. G. **An introduction to aircraft structural analysis**. 4. ed. Burlington: Elsevier, 2016.

PEREIRA, P. H. F. et al. **Vegetal fibers in polymeric composites: A review**. **Polimeros** Associação Brasileira de Polimeros, , 1 jan. 2015.

REZENDE, M. C; BOTELHO, E. C. O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. **Polímeros: Ciência de Tecnologia**, v. 10, p.4-10, 2000.

SALUM, L. P. S. **Viabilidade do uso de fibra de sisal como reforço para concreto**. Rio de Janeiro: PUC - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2019.

SEIXAS, J. N.; GRANADA, J. E. Compósitos de Polipropileno Reforçados com Fibras Naturais do Talo da Banana em Diferentes Granulometrias. p. 32–37, 2018.

SHOPEUROCOMPULSION. **Alfa Romeo 4C Carbon Fiber Chassis Information**. 2022. Disponível em:< <https://shopeurocompulsion.net/blogs/technical-articles/alfa-romeo-4c-carbon-fiber-chassis-info> >. Acesso em 08 de agosto de 2022.

SILVA, S. O. **Controle de Qualidade e Desempenho de Pré-impregnados Fibra Natural/Epóxi para a Produção de Compósitos**. Brasília: UnB - Universidade de Brasília, 9 dez. 2020.

SIVAKANDHAN, C.; SURESH PRABHU, P. Investigation of Hybrid Composite Drive Shaft under Tensile, Bending and Torsion Testing. **International Journal of Vehicle Structures and Systems**, v. 6, n. 4, 15 jan. 2015.

SOUSA, C. S. et al. Potencial agrícola de um composto organomineral à base de resíduo de sisal, esterco e farinha de rocha para produção de mudas de sisal. **Scientia Plena**, v. 12, n. 2, 25 fev. 2016.

TAPSCAPE. **Why is carbon fiber still used to manufacture Formula One racing cars?**. 2022. Disponível em:< <https://www.tapscape.com/why-is-carbon-fiber-still-used-to-manufacture-formula-one-racing-cars/> >. Acesso em: 06 de agosto de 2022.

TEIXEIRA, L. A. **O efeito da modificação química das fibras de curauá nas propriedades morfológicas, térmicas e mecânicas de compósitos de poliéster**. . Tese de Mestrado—Brasília: , Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, 2019.

WANG, W.; SAIN, M.; COOPER, P. A. Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites. **Composites Science and Technology**, v. 66, n. 3–4, p. 379–386, mar. 2006.

WESTSYSTEM. **Epoxy Chemistry**. 2022. Disponível em:< <https://www.westsystem.com/instruction-2/epoxy-basics/epoxy-chemistry/> >. Acesso em: 08 de agosto de 2022.