



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CAMPUS JOINVILLE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Tiago Vinícius Herzmann

**Produção e Determinação de Propriedades Mecânicas de
Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal**

Joinville

2022

Tiago Vinícius Herzmann

**Produção e Determinação de Propriedades Mecânicas de
Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal**

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Claudimir A. Carminatti, Dr.

Coorientador: Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, Ph.D.

Joinville

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Herzmann, Tiago Vinícius

Produção e Determinação de Propriedades Mecânicas de
Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal / Tiago Vinícius
Herzmann ; orientador, Claudimir Antonio Carminatti,
coorientador, Hazim Ali Al-Qureshi, 2022.

71 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Compósitos. 3.
Fibra de sisal. 4. Fibras naturais. 5. Propriedades
mecânicas. I. Carminatti, Claudimir Antonio. II. Al
Qureshi, Hazim Ali. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências
Mecânicas. IV. Título.

Tiago Vinícius Herzmann

**Produção e Determinação de Propriedades Mecânicas de
Compósitos Reforçados com Fibras de Sisal**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Rafael Gonçalves de Souza, Dr.
Instituto Federal Catarinense

Prof. Alexandre Mikowski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profª. Derce de Oliveira Souza Recouvreux, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Rafael de Camargo Catapan, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Prof. Claudimir Antonio Carminatti, Dr.
Orientador

Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, Ph.D.
Coorientador

Joinville, 2022

Este trabalho é dedicado à minha família e a todos que tive o prazer de conhecer, conviver e trabalhar durante este período.

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Dr. Claudimir Antonio Carminatti, pela paciência, orientação, confiança e pelos ensinamentos, além de sempre estar disposto a ajudar;

Ao professor coorientador Dr. Hazim Ali Al-Qureshi, pela colaboração e disposição em ajudar no desenvolvimento deste trabalho;

Ao Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina Campus Joinville por disponibilizar os equipamentos necessários para o ensaio mecânico de tração;

Ao Instituto Federal Catarinense Campus Blumenau por disponibilizar o local e os materiais para realização da confecção do molde e das amostras;

À minha família por todo o suporte e paciência durante esta jornada.

RESUMO

Os materiais compósitos surgiram como uma opção mais leve e de alta resistência aos materiais tradicionais. Um compósito é composto por uma fase matriz e uma fase reforçadora. Os compósitos reforçados com fibras sintéticas, como as fibras de vidro e de carbono, são amplamente aplicados na indústria em diversos setores, como automobilístico, naval, aeroespacial, entre outros. Embora as fibras sintéticas sejam interessantes devido a suas características mecânicas, elas não são biodegradáveis e criam diversos problemas ecológicos. Os compósitos reforçados com fibras naturais têm atraído um interesse crescente como uma alternativa aos compósitos reforçados por fibras sintéticas. O objetivo deste trabalho foi a produção e a caracterização de um compósito composto de matriz polimérica (epóxi), reforçado com fibras naturais de sisal (*Agave sisalana*) em diferentes configurações de ângulo das camadas, juntamente com a inclusão ou não de fibras curtas não alinhadas. As amostras foram produzidas utilizando um molde de aço projetado e construído para este fim. As amostras foram produzidas utilizando o método *hand lay-up* com cura sob pressão variando as configurações das camadas de fibras. As amostras foram submetidas ao ensaio mecânico de tração para obtenção das propriedades mecânicas de limite de resistência à tração, alongamento percentual máximo e módulo de elasticidade. A utilização do método de produção com a cura sob pressão permitiu a obtenção de laminados com fibras dispostas nos ângulos definidos. Os resultados dos ensaios mecânicos de tração mostraram que a adição de fibra curta aos compósitos os tornou menos rígidos, diminuindo os valores de seus módulos de elasticidade e aumentando os valores do alongamento percentual máximo. As amostras contendo duas e três camadas de fibras alinhadas à direção longitudinal de carregamento e com adição de fibras curtas apresentaram os maiores valores de deformação, 3,38% e 3,78% respectivamente, e, conseqüentemente, também apresentaram menores valores de módulo de elasticidade, 2,52 e 3,19 GPa, quando comparadas às amostras pares sem adição de fibras curtas (3,84 GPa e 3,73 GPa). Em relação ao limite de resistência à tração, as configurações com as maiores quantidades de camadas alinhadas à direção de tração longitudinal apresentaram os maiores valores, 53,44 MPa e 53,47 MPa, resultado este esperado pois as fibras possuem a maior resistência à tração quando a carga ocorre no sentido longitudinal. Os compósitos produzidos com fibras de sisal apresentaram uma resistência mecânica elevada na direção do carregamento, sendo os valores bastante reduzidos na direção transversal das fibras, como pôde ser visto nas amostras ensaiadas com menor quantidade de camadas alinhadas com a direção de tração. Pode-se concluir que compósitos produzidos com fibras naturais de sisal possuem boas propriedades mecânicas, podendo ser utilizados como substitutos de compósitos produzidos com fibras de vidro em aplicações que exijam menores valores de tensão e rigidez e que não exista uma direção de carga predominante.

Palavras-chave: Compósitos. Fibra de sisal. Fibras Naturais. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Composite materials emerged as a lighter and high-strength option to traditional materials. A composite is composed of a matrix phase and a reinforcing phase. Composites reinforced with synthetic fibers, such as glass and carbon fibers, are widely applied in industry in various sectors, such as automotive, naval, aerospace, among others. Although synthetic fibers are interesting due to their mechanical characteristics, they are not biodegradable and create several ecological problems. Natural fiber reinforced composites have attracted increasing interest as an alternative to synthetic fiber reinforced composites. The objective of this work was the production and characterization of a composite composed of a polymer matrix (epoxy), reinforced with natural fibers of sisal (*Agave sisalana*) in different configurations of angle of the layers, together with the inclusion or not of non-aligned short fibers. The samples were produced using a steel mold designed and built for this purpose. The samples were produced using the hand lay-up method with curing under pressure varying the configurations of the fiber layers. The samples were submitted to the mechanical tensile test to obtain the mechanical properties of tensile strength limit, maximum percentage elongation and modulus of elasticity. The use of the production method with pressure curing allowed obtaining laminates with fibers arranged at defined angles. The results of the mechanical tensile tests showed that the addition of short fiber to the composites made them less rigid, decreasing the values of their elastic modulus and increasing the values of the maximum percentage elongation. The samples containing two and three layers of fibers aligned to the longitudinal direction of loading and with the addition of short fibers presented the highest values of deformation, 3.38% and 3.78% respectively, and, consequently, also presented lower values of modulus of elasticity, 2.52 and 3.19 GPa, when compared to even samples without the addition of short fibers (3.84 GPa and 3.73 GPa). Regarding the tensile strength limit, the configurations with the highest amounts of layers aligned to the longitudinal tensile direction had the highest values, 53.44 MPa and 53.47 MPa, a result expected because the fibers have the highest tensile strength. when the load occurs in the longitudinal direction. The composites produced with sisal fibers showed a high mechanical strength in the direction of loading, with very low values in the transverse direction of the fibers, as could be seen in the samples tested with a lower number of layers aligned with the direction of traction. It can be concluded that composites produced with natural sisal fibers have good mechanical properties and can be used as substitutes for composites produced with glass fibers in applications that require lower values of tension and stiffness and that there is no predominant load direction.

Keywords: Composites. Sisal fibers. Natural fibers. Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pesquisa de documentos realizada na base de dados SCOPUS (Julho 2022) com as palavras “Compósitos” e “Fibras naturais” .	16
Figura 2 – Pesquisa de documentos realizada na base de dados SCOPUS (Julho 2022) com as palavras-chave “Compósitos”, “Sisal” e “Epóxi” .	16
Figura 3 – Importância relativa de metais, polímeros, compósitos e cerâmicas em função do tempo.	19
Figura 4 – Estrutura molecular de um anel epóxi.	21
Figura 5 – Evolução do processo de cura da resina epóxi.	22
Figura 6 – Esquema de classificação de materiais compósitos.	23
Figura 7 – Classificação das fibras naturais.	25
Figura 8 – Estrutura típica das fibras naturais oriundas de plantas.	26
Figura 9 – Cultivo do sisal (<i>Agave sisalana</i>).	27
Figura 10 – Revestimento produzido com material compósito reforçado com fibras naturais aplicado na indústria automotiva.	28
Figura 11 – Reação química entre a fibra e o NaOH (a) e uma visão esquemática da estrutura celulósica da fibra, antes (b) e depois (c) do tratamento com hidróxido de sódio.	30
Figura 12 – Fibras utilizadas nos experimentos (a), e fibras organizadas antes da impregnação com resina (b).	31
Figura 13 – Fibras alinhadas (a) e costuradas (b) em intervalos de 50 mm de forma longitudinal para a fabricação das amostras.	32
Figura 14 – Região de separação das fibras devido à tensão transversal aplicada.	33
Figura 15 – Micrografia da microestrutura da fibra do sisal mostrando (a) uma visão geral, (b) ampliação contendo os detalhes dos lumen e das células e (c) indicação das lamelas médias e as paredes das células.	33
Figura 16 – Tecido de juta contendo fibras de sisal costuradas e alinhadas.	35
Figura 17 – Curvas tensão-deformação obtidas dos resultados dos ensaios dos compósitos.	36
Figura 18 – Fibras de sisal utilizadas na produção do compósitos.	38
Figura 19 – Fibras de sisal imersas em solução de NaOH 5% durante o tratamento de mercerização (a), e aparência da solução após remoção das fibras (b).	39
Figura 20 – Máquina de ensaio mecânico de tração Instron 23-100 utilizada nos ensaios.	40

Figura 21 – Esmerilhadeira angular e o disco utilizado para o corte da placa base (a) e a placa base durante o processo de corte (b).....	43
Figura 22 – Corte da cantoneira L em 45 graus para fabricação do molde (a) e o quadro soldado antes da furação para passagem dos tarugos de barra roscada (b).	44
Figura 23 – Chapa base, quadro e placa para prensagem (a) antes do acabamento e (b) após o acabamento.	44
Figura 24 – Desenho esquemático da configuração das camadas de fibras contínuas/curtas de sisal nas amostras produzidas.	46
Figura 25 – Organização das fibras de sisal para composição das camadas.	47
Figura 26 – Feixes contendo as fibras de sisal organizadas sobre o molde antes da impregnação com resina epóxi.	47
Figura 27 – Feixes de fibras de sisal (a) antes da adição da resina epóxi e (b) após a prensagem com a resina.....	48
Figura 28 – Amostras marcadas em (a) e corpos de prova cortados em (b).....	49
Figura 29 – Curvas tensão-deformação dos compósitos produzidos.	50
Figura 30 – Corpo de prova fraturado na região central entre as garras da máquina de ensaios (indicado pela seta).	51
Figura 31 – Região das fraturas dos CPs da Amostra 1.	52
Figura 32 – Fratura dos CPs da Amostra 3 ($0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$) predominantemente na direção perpendicular a força aplicada.	53
Figura 33 – Limite de resistência à tração (MPa) das amostras e seus respectivos desvios padrão.	54
Figura 34 – Alongamento percentual máximo das amostras e seus respectivos desvios padrão.	56
Figura 35 – Região de cálculo do módulo de elasticidade entre 0,05% e 0,10% a partir da curva tensão-deformação para a Amostra 1 ($0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}$, com adição de fibras curtas).	58
Figura 36 – Valores dos módulos de elasticidade (GPa) das amostras e seus respectivos desvios padrão.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas típicas de fibras naturais e sintéticas.	27
Tabela 2 – Propriedades da resina epóxi 2004 e endurecedor 3154 da fabricante Redelease. ..	37
Tabela 3 – Propriedades físicas e composição química do sisal (<i>Agave sisalana</i>).	38
Tabela 4 – Comprimento, espessura e largura dos corpos de prova e seus respectivos desvios padrão.	41
Tabela 5 – Relação de amostras confeccionadas e suas configurações de camadas e presença de fibras curtas.	45
Tabela 6 – Média das tensões máximas (MPa) dos compósitos produzidos.	54
Tabela 7 – Média das deformações máximas (%) dos compósitos produzidos.	56
Tabela 8 – Média dos módulos de elasticidade (GPa) dos compósitos produzidos.	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais vantagens e desvantagens das fibras naturais quando comparadas as fibras sintéticas.	15
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	18
2.2	MATRIZES	20
2.2.1	Resinas epóxi	21
2.3	REFORÇOS	22
2.4	FIBRAS NATURAIS.....	24
2.4.1	Adesão entre as fibras naturais e as matrizes	28
2.5	ESTADO DA ARTE	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	MATERIAIS	37
3.1.1	Resina epóxi	37
3.1.2	Fibra de sisal	38
3.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	40
3.2.1	Ensaio mecânico de tração	40
3.2.2	Determinação das dimensões dos corpos de prova	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	PREPARAÇÃO E LAMINAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	42
4.1.1	Confeção do molde para prensagem/cura dos compósitos	42
4.1.2	Preparação dos compósitos	45
4.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	49
4.2.1	Limite de resistência à tração	53
4.2.2	Alongamento percentual máximo	56
4.2.3	Módulo de elasticidade	57
5	CONCLUSÕES	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A – CORPOS DE PROVA FRATURADOS	68

1 INTRODUÇÃO

O cuidado com o meio ambiente vem se destacando no desenvolvimento de novos materiais. Muitos dos materiais atuais utilizados, como metais, cerâmicas e polímeros, possuem excelentes propriedades mecânicas, químicas e físicas, que permitem sua utilização em uma grande variedade de aplicações. Mas, devido as suas características de degradabilidade, muitos destes materiais não são recicláveis, sendo destinados a aterros industriais/sanitários quando sofrem algum dano ou no final de sua vida útil.

Nos últimos anos, compósitos reforçados com fibras naturais vêm se mostrando uma alternativa atraente para a substituição de materiais e compósitos tradicionais, ganhando popularidade crescente em muitos campos da engenharia, principalmente na indústria automotiva. Fibras naturais como banana, sisal, linho, cânhamo, juta, coco, bambu, etc. estão sendo usadas como reforço em diferentes compósitos poliméricos devido, principalmente, ao apelo ecológico.

Os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais vêm sendo utilizados em diversas aplicações, principalmente pelas indústrias de construção civil, aeroespacial e automotiva, que tem no peso e densidade fatores importantes no desempenho final de seus produtos e possuem grande preocupação com seu ciclo de vida (ROBLEDO-ORTÍZ et al., 2020).

O uso de fibras naturais como reforço em materiais compósitos tem sido amplamente estudado. As fibras naturais têm muitas vantagens, como baixo peso, baixa densidade, baixo custo, neutralidade de carbono, reciclabilidade e sustentabilidade. Nos últimos anos, o uso de fibras naturais como substitutas de fibras sintéticas no reforço em materiais compósitos tem sido pesquisado com o objetivo de produzir compósitos mais ambientalmente amigáveis. Em países em desenvolvimento, a cadeia de produção de fibras naturais pode melhorar a qualidade de vida e sobrevivência de muitas comunidades (TORRES; RODRIGUEZ; SAAVEDRA, 2019).

O Quadro 1 apresenta, de forma resumida, as principais vantagens e desvantagens das fibras naturais quando comparadas as fibras sintéticas.

Quadro 1 – Principais vantagens e desvantagens das fibras naturais quando comparadas as fibras sintéticas.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Baixa densidade e alta resistência específica e rigidez; • As fibras naturais são um recurso renovável, cuja produção requer pouca energia e envolve a absorção de CO₂ da atmosfera; • As fibras naturais podem ser produzidas a um menor custo quando comparadas às fibras sintéticas; • Processos de fabricação de baixo risco e baixa periculosidade; • Baixa emissão de fumos tóxicos quando submetido ao calor extremo e durante a incineração no final da vida útil; • Menos danos aos equipamentos utilizados nos processos devido a menor abrasão em comparação com os compósitos de fibra sintética. 	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidade menor do que compósitos de fibra sintética, porém pode ser melhorada consideravelmente com tratamentos; • Alta absorção de umidade, o que resulta em dilatação da fibra; • Menor resistência, principalmente resistência ao impacto, quando comparados aos compósitos de fibra sintética; <ul style="list-style-type: none"> • Grande variabilidade das propriedades; • Temperaturas de processamento reduzidas, o que limita as opções de materiais a serem utilizados como matriz.

Fonte: Adaptado de PICKERING; EFENDY; LE (2016)

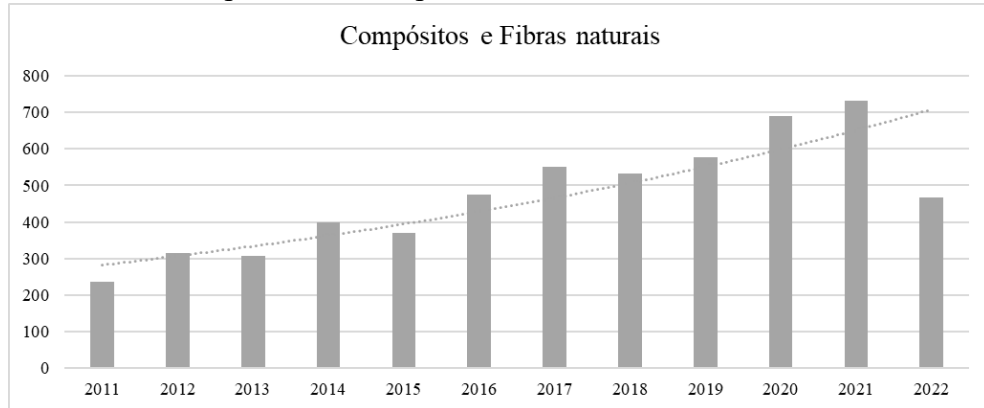
Dentre as diversas fibras naturais existentes, as fibras oriundas do sisal (*Agave sisalana*) vem se destacando como sendo uma boa opção na aplicação como material de reforço em compósitos devido as suas propriedades. A maior parte das fibras de sisal produzidas no mundo são cultivadas no Haiti, Brasil, Índia, Indonésia e África Oriental. O cultivo do sisal é simples e a planta possui grande resistência a doenças. A fibra de sisal possui resistência e módulo específicos comparáveis a fibra de vidro, podendo ser utilizado em sua substituição em diversas aplicações de engenharia (NAVEEN et al., 2018).

No Brasil, o cultivo do sisal também é realizado por pequenos produtores, com predomínio do trabalho familiar, tornando-se uma alternativa importante em condições de clima e solo desfavoráveis a outras culturas, como observado na região do semiárido nordestino (EMBRAPA, 2008). O aumento da utilização do sisal em materiais poliméricos provoca um efeito benéfico a esta cadeia produtiva, garantindo melhores condições a estas famílias.

A Figura 1 representa pesquisa realizada na base de dados SCOPUS com um filtro contendo as palavras-chave “Compósitos” e “Fibras naturais” para o período de 2011 a 2021.

Com base nos resultados, é possível observar um aumento considerável no interesse relacionado aos materiais compósitos e fibras naturais, sendo que o número de trabalhos publicados saltou de 235 em 2011 para 733 em 2021, sendo de 467 até julho de 2022.

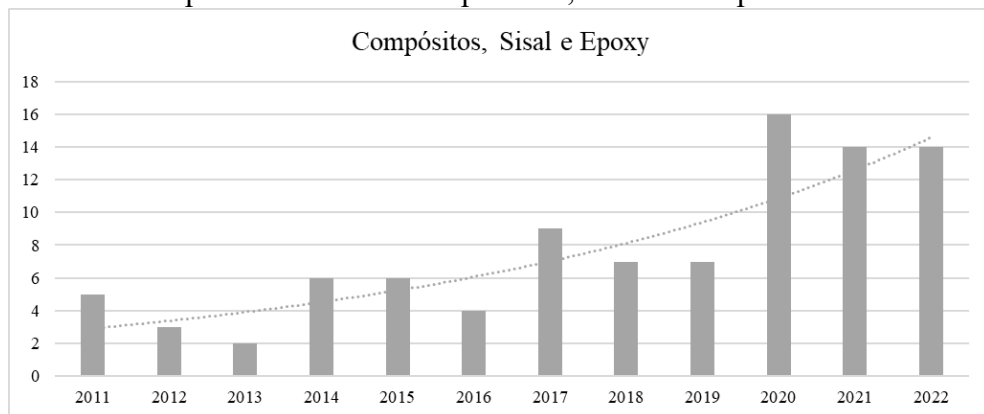
Figura 1 – Pesquisa de documentos realizada na base de dados SCOPUS (Julho 2022) com as palavras “Compósitos” e “Fibras naturais”.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Repetindo a mesma pesquisa, porém utilizando as palavras-chave “Compósitos”, “Sisal” e “Epóxi”, o resultado da busca é mostrado na Figura 2. Apesar de menores quantidades de documentos encontrados, o que é esperado, pois agora os termos pesquisados foram menos generalistas, a figura mostra uma tendência de aumento do interesse nos assuntos pesquisados, sendo que o número de trabalhos publicados em 2021 foi quase 3 vezes maior comparado com 2011.

Figura 2 – Pesquisa de documentos realizada na base de dados SCOPUS (Julho 2022) com as palavras-chave “Compósitos”, “Sisal” e “Epóxi”.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Diante do exposto, o presente trabalho propõe a produção e a caracterização de materiais compósitos de matriz epóxi reforçados com fibra de sisal (*Agave sisalana*), determinando suas propriedades em comparação com outros materiais compósitos produzidos, especialmente os compósitos reforçados com fibra de vidro.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi produzir compósitos em matriz de resina epóxi reforçados com fibras de sisal com diferentes configurações, avaliando as suas propriedades mecânicas de limite de resistência à tração, alongamento percentual máximo e módulo de elasticidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Produzir materiais compósitos em matriz de resina epóxi reforçados com fibras de sisal variando a configuração dos laminados quanto à quantidade e orientação das camadas;
- Verificar a influência da adição de fibras curtas nas propriedades mecânicas de limite de resistência à tração, alongamento percentual máximo e módulo de elasticidade dos compósitos produzidos;
- Caracterizar as amostras de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de sisal quanto as suas propriedades mecânicas de limite de resistência à tração, alongamento percentual máximo e módulo de elasticidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

“O desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND; COMUM, 1987). Nos últimos anos, devido à maior conscientização sobre os problemas ambientais causados pelo uso de produtos oriundos da indústria petroquímica em todos os aspectos de nossas vidas, o interesse na aplicação de materiais naturais à base de plantas aumentou, especialmente quanto à aplicação em compósitos reforçados com fibras (SOUZANDEH; NETRAVALI, 2018).

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são uma classe de materiais com grande importância na indústria, sendo seu uso incrementado a cada ano. Eles constituem uma das classes mais amplas e importantes de materiais de engenharia, perdendo apenas para os aços na utilização e na variedade de aplicações. Um dos motivos para esta grande importância é que oferecem combinações muito interessantes de rigidez, força, tenacidade, leveza e resistência à corrosão. Outro é a possibilidade de adequar sua estrutura às mais diversas aplicações. Esse conceito pode ser visto em materiais biológicos, como madeira, ossos, dentes e pele, todos compostos com estruturas internas complexas que foram projetados pela natureza para fornecer propriedades mecânicas adequadas aos requisitos de desempenho (CLYNE; HULL, 2019).

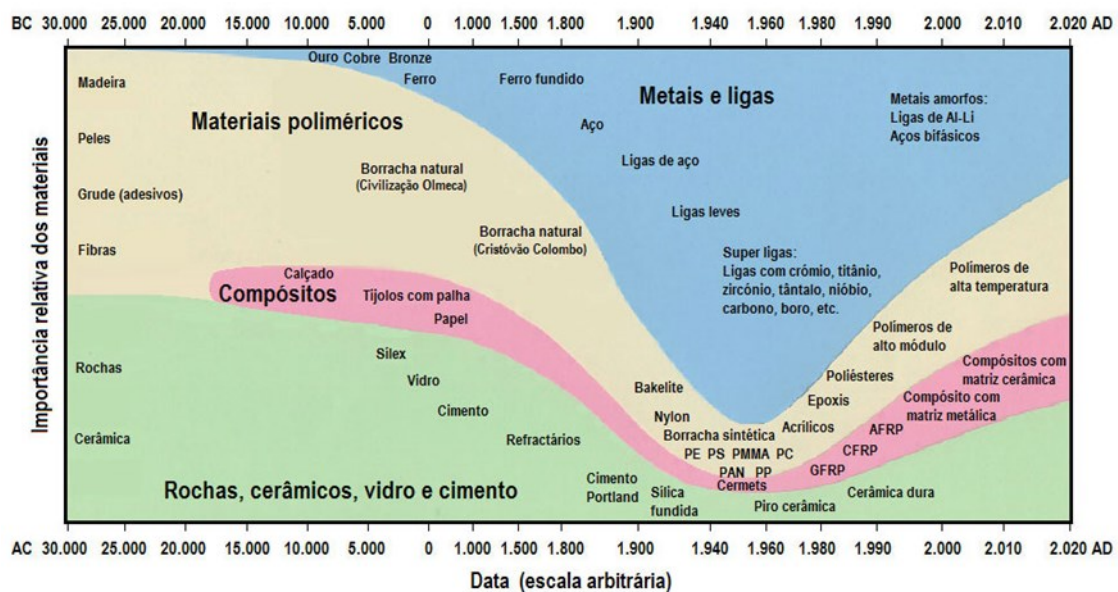
De uma forma geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de modo tal que é obtida uma melhor combinação de propriedades devido ao efeito do princípio da ação combinada (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). Os materiais compósitos podem ser selecionados para fornecer combinações incomuns de rigidez, resistência, densidade, desempenho em alta temperatura, resistência à corrosão, dureza ou condutividade (BROWN; ASKELAND, 2014).

O principal objetivo do desenvolvimento de materiais compósitos é a obtenção de características desejáveis de dois materiais diferentes através da combinação destes em um terceiro material (AL-QURESHI, 2010).

Em meados do século XX os compósitos começaram a receber uma classificação distinta dos demais materiais, com a fabricação de compósitos multifásicos projetados e

produzidos com o uso de engenharia, como os polímeros reforçados com fibra de vidro. Embora materiais multifásicos, como madeira, tijolos de barro reforçado com palha, conchas de frutos-do-mar e até ligas, como o aço, sejam conhecidos há milênios, conforme apresentado na Figura 3, o reconhecimento desse novo conceito de combinação de materiais diferentes durante a fabricação levou à identificação dos compósitos como sendo uma nova classe separada dos metais, cerâmicas e polímeros (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Figura 3 – Importância relativa de metais, polímeros, compósitos e cerâmicas em função do tempo.



Fonte: Adaptado de ASHBY (2011)

A maioria dos materiais compósitos possuem apenas duas fases: uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, geralmente chamada de fase dispersa ou reforço (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). Por exemplo, a madeira é composta de cadeias fibrosas de moléculas de celulose em uma matriz de lignina, enquanto ossos e dentes são essencialmente compostos de cristais inorgânicos duros em uma matriz de um constituinte orgânico resistente chamado colágeno (CLYNE; HULL, 2019).

Os materiais compósitos (principalmente plásticos reforçados com fibras de aramida, carbono e/ou vidro) são muito utilizados nas indústrias aeroespacial, de lazer, automotiva, de construção e esportiva. As fibras de vidro, por exemplo, são as mais utilizadas para reforçar os plásticos devido ao seu baixo custo (quando comparado à aramida e ao carbono) e às suas boas propriedades mecânicas (WAMBUA; IVENS; VERPOEST, 2003).

No entanto, as fibras sintéticas possuem limitações quanto à sua não degradabilidade, o que traz problemas no descarte e na reciclagem, causando grande impacto ambiental e levando imensa poluição ao meio ambiente, o que é motivo de preocupação dos governos e de pesquisadores (SENTHILKUMAR et al., 2018).

Uma das principais linhas de pesquisa que tem como objetivo atingir o desenvolvimento sustentável é aquela que é dedicada ao estudo dos materiais, principalmente quanto ao desenvolvimento de materiais que sejam renováveis, que também possuam fontes renováveis, que possibilitem melhores índices de reciclagem, dentre outras que possam tornar um produto mais ambientalmente amigável e sustentável.

2.2 MATRIZES

A maioria dos materiais compósitos são constituídos de duas fases: a fase matriz e a fase dispersa. A fase matriz é dita fase contínua e envolve os constituintes da fase dispersa fornecendo estabilidade ao material compósito.

Segundo Mallick (2007), são funções das matrizes nos materiais compósitos: manter as fibras no lugar, transferir as cargas e forças entre as fibras, fornecer uma barreira contra um ambiente adverso (como produtos químicos e umidade), e proteger a superfície das fibras contra a degradação mecânica (por exemplo, por abrasão). Além das funções já mencionadas, Campilho (2015) também cita a aparência como sendo uma das características influenciadas pela matriz.

Nos últimos anos, muitos estudos foram realizados na tentativa de encontrar uma alternativa economicamente viável para as matrizes convencionais à base de petróleo, principalmente por serem derivados de um combustível fóssil não renovável e ao impacto ambiental do uso dessas matrizes à base de petróleo (FARUK et al., 2012).

Os polímeros são compostos de origem natural ou sintética com massa molar elevada, formados pela repetição de muitas unidades químicas. Entre os polímeros incluem-se materiais como filmes utilizados na embalagem de alimentos, fibras têxteis, borrachas etc. (AKCELRUD, 2007).

Nas últimas décadas os polímeros substituíram muitos dos materiais convencionais em diversas aplicações, fato ocorrido devido às vantagens que os polímeros oferecem, como, por exemplo, facilidade de ser processado, alta produtividade, e custos reduzidos. Em muitas aplicações, as propriedades dos polímeros são modificadas com a utilização de reforços

(fibras, particulados ou materiais de preenchimento), tornando-se assim, materiais compósitos (NABI SAHEB; JOG, 1999).

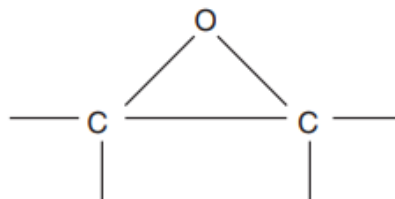
Os polímeros são um tipo de material muito aplicado como matriz nos materiais compostos. Os polímeros termofixos, como epóxis, poliésteres e ésteres de vinila, são geralmente utilizados em compósitos reforçados com fibras longas, principalmente devido à facilidade de serem processados devido à sua baixa viscosidade. Os polímeros termoplásticos são mais comuns de serem utilizados em compósitos reforçados com fibras curtas. As matrizes metálicas e cerâmicas são aplicadas principalmente em materiais que requerem resistência a altas temperaturas (MALLICK, 2007).

2.2.1 Resinas epóxi

Resinas epóxi são uma importante classe dentre os diversos materiais poliméricos. As resinas epóxi são amplamente utilizadas como matriz em materiais compósitos poliméricos e são constituídas de polímeros termofixos que possuem ótimas propriedades, incluindo propriedades de adesão, químicas, mecânicas e térmicas. As resinas epóxi reagem com um endurecedor para formar redes 3D insolúveis e infusíveis através do processo conhecido como cura (RANGAPPA et al., 2022).

As matrizes epóxi são constituídas de resinas líquidas orgânicas de baixa massa molecular contendo vários grupos epóxis, que são anéis constituídos de um átomo de oxigênio e dois átomos de carbono. A Figura 4 apresenta um anel epóxi (MALLICK, 2008).

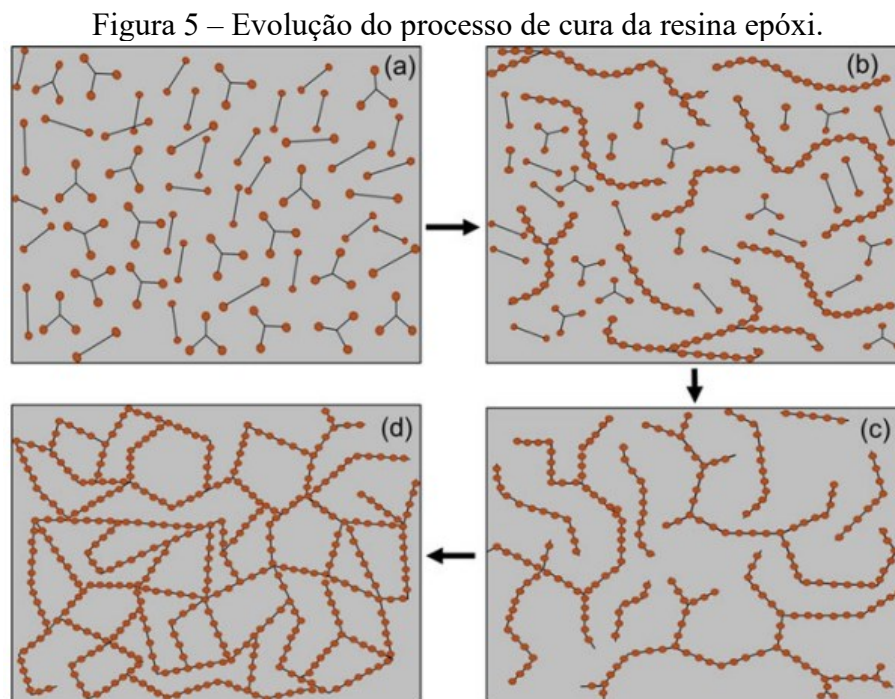
Figura 4 – Estrutura molecular de um anel epóxi.



Fonte: (MALLICK, 2008)

As resinas epóxi são produzidas usando epícloridrina de olefinas e perácidos. Éter diglicidílico de bisfenol A (DGEBA) é o principal elemento intermediário na confecção das resinas epóxi, que é um produto obtido do bisfenol A e da epícloridrina (RANGAPPA et al., 2022).

A cura é um processo químico no qual a resina epóxi é combinada com um agente de cura (endurecedor) e/ou acelerador para criar uma rede tridimensional fortemente reticulada, resultando em um substrato infusível e rígido. As resinas epóxi, endurecedores e/ou aceleradores usados, bem como a temperatura e o tempo de cura, determinam as propriedades físicas e a performance dos compósitos. A Figura 5 mostra os estágios de cura de uma resina epóxi com o uso de um agente endurecedor, em que (a) tem-se o monômero parcialmente funcional, (b) constituintes lineares e ramificados antes do estágio de gel, (c) a gelificação foi iniciada, porém a reticulação ainda está incompleta e (d) rede 3D reticulada de epóxi completamente curada (RANGAPPA et al., 2022).



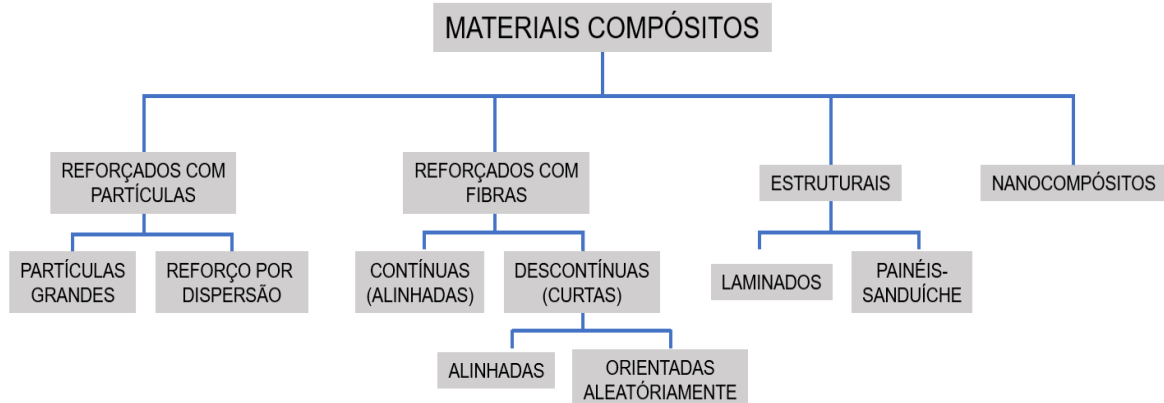
Fonte: (RANGAPPA et al., 2022)

2.3 REFORÇOS

Os reforços, constituintes da fase dispersa, são materiais adicionados ao compósito que tem como objetivo melhorar suas propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas. Em algumas situações, são utilizados outros materiais na fase dispersa que não possuem função de melhorar as propriedades do compósito, mas sim de atuarem como elementos de carga, aumentando o volume e diminuindo o peso e o custo do material.

O tipo de reforço utilizado serve como base para a classificação dos materiais compósitos: compósito reforçado com partículas, compósito reforçado com fibras, compósitos estruturais, e nanocompósitos, sendo estes subdivididos nas demais classificações (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). A Figura 6 apresenta uma classificação para os diversos tipos de materiais compósitos.

Figura 6 – Esquema de classificação de materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de CALLISTER; RETHWISCH (2018)

Nos compósitos reforçados com partículas, as dimensões destas são aproximadamente as mesmas em todas as direções, ou seja, são equiaxiais. Para os compósitos reforçados com fibra, estas possuem uma grande proporção comprimento/diâmetro (característica das fibras). Já quanto aos compósitos estruturais, estes são formados por multicamadas e projetados para possuir baixas densidades e elevados graus de integridade estrutural. Nos nanocompósitos, os materiais de reforço possuem dimensões da ordem de nanômetros (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

As fibras possuem várias características que tornam seu uso muito interessante como reforços em materiais compósitos, como o fato de muitos materiais possuírem uma maior resistência mecânica e rigidez na forma de fibra do que na forma de partículas (GIBSON, 2016). Esta característica ocorre em diversos materiais muito aplicados em compósitos, como as fibras de vidro, fibras de carbono, etc., porém o motivo nem sempre é o mesmo, a depender do material.

Com a utilização de fibras, é possível obter a máxima resistência à tração e rigidez de um material. No entanto, as fibras por si só não suportam cargas compressivas longitudinais e suas propriedades mecânicas transversais são geralmente piores que as suas propriedades longitudinais correspondentes. Por este motivo, as fibras geralmente não são utilizadas como

materiais estruturais, a menos que sejam mantidas juntas em uma unidade estrutural com um material aglutinante ou matriz, e a menos que seja fornecido algum reforço transversal. Felizmente, a configuração geométrica das fibras também se mostra muito eficiente do ponto de vista da interação com o aglutinante ou matriz (GIBSON, 2016).

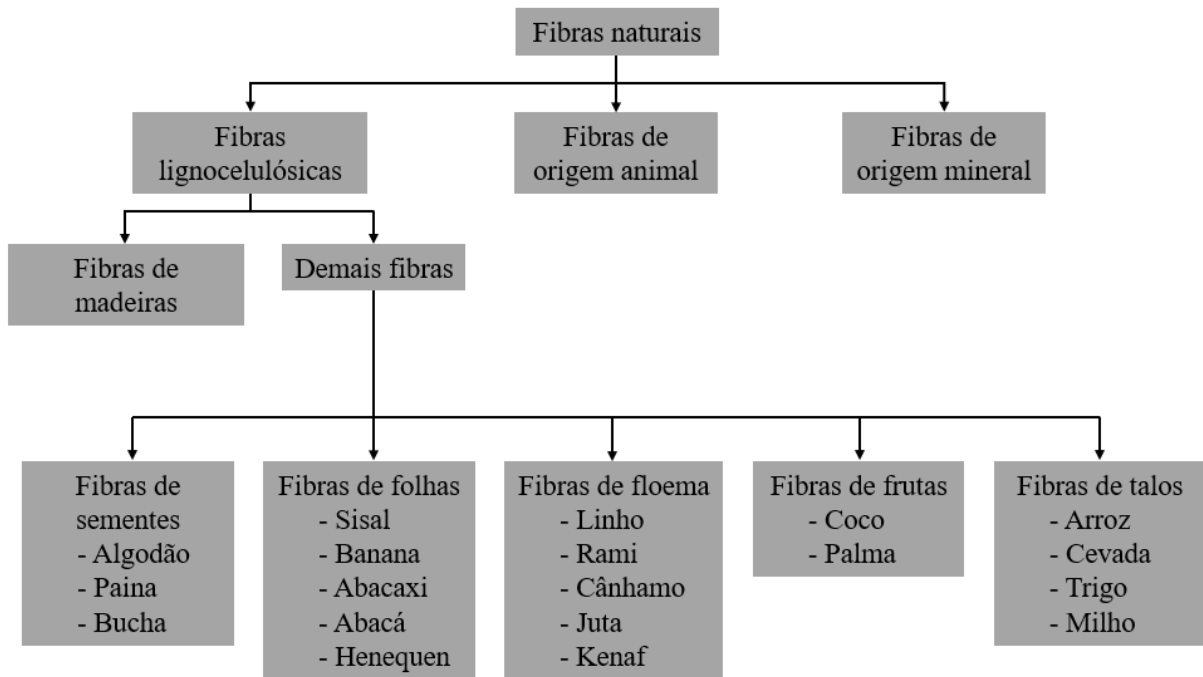
É essencial que as forças de ligação adesiva entre a fibra e a matriz sejam altas o suficiente para minimizar o arrancamento das fibras. A resistência da ligação é uma consideração importante na seleção de uma combinação matriz-fibra. A resistência máxima do compósito depende em grande parte da magnitude dessa ligação; uma ligação adequada é essencial para maximizar a transmissão da tensão de uma matriz de baixa resistência para as fibras mais resistentes (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

2.4 FIBRAS NATURAIS

Dentre as diversas opções voltadas a reduzir a degradação do meio ambiente causada pelos processos e materiais atualmente utilizados, uma que vem ganhando espaço é a aplicação de fibras naturais como elemento de reforço ou preenchimento em materiais compósitos poliméricos (JOSEPH et al., 1999). Na indústria automotiva, a substituição de componentes reforçados com fibra de vidro pelos reforçados com fibras naturais, além de reduzir os problemas inerentes à reciclagem dos veículos no fim de vida, conduz a uma redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, da emissão de gases, contribuindo deste modo para a melhoria da qualidade de vida (ROMÃO, 2003).

As fibras naturais são aquelas que existem naturalmente, ou seja, que não são produzidas pelo homem. A Figura 7 apresenta uma classificação realizada por Tesinova (2011) para as fibras naturais conforme a sua origem.

Figura 7 – Classificação das fibras naturais.



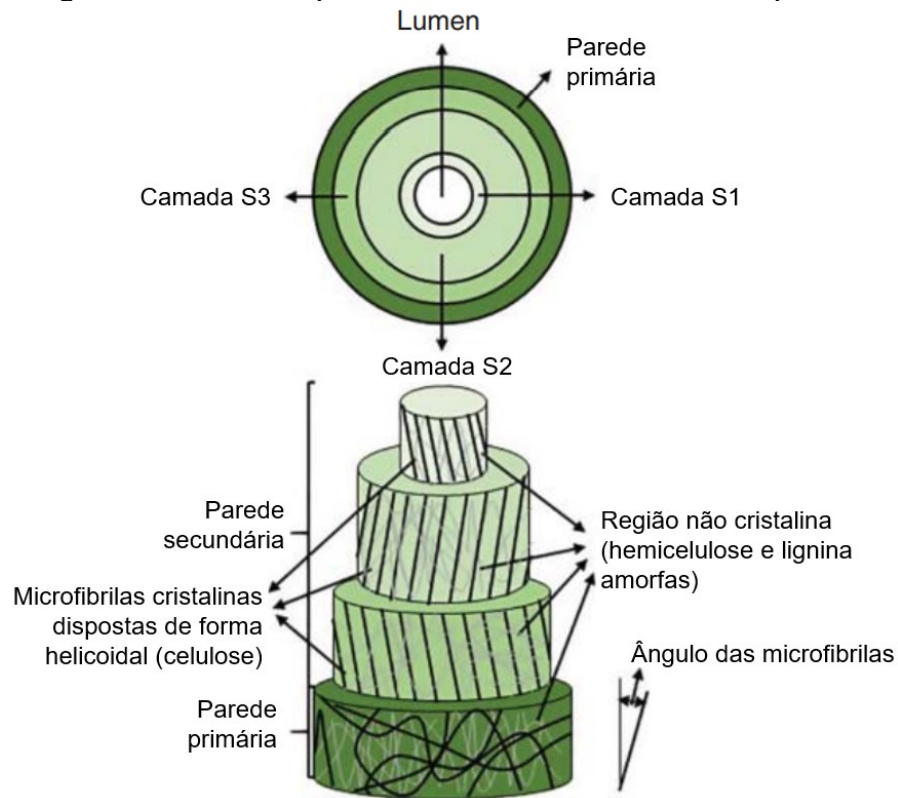
Fonte: Adaptado de TESINOVA (2011)

As propriedades mecânicas das fibras naturais podem ter uma grande variação, mesmo quando oriundas da mesma planta. Isso ocorre devido a vários fatores presentes no ciclo de vida da planta, incluindo as condições de crescimento, o quão maduras as fibras estavam quando foram colhidas, os métodos usados para extrair as fibras e até mesmo o transporte e armazenamento das fibras ao longo do tempo (DITTENBER; GANGARAO, 2012).

As propriedades das fibras naturais originadas de plantas dependem principalmente da natureza da planta, localidade em que é cultivada, idade da planta e método de extração utilizado (JOSEPH et al., 1999). No entanto, em geral, as fibras vegetais originadas do caule de suas plantas tendem a exibir melhores propriedades mecânicas (CAMPILHO, 2015).

Embora as fibras naturais oriundas de plantas tenham origens diferentes, elas possuem uma microestrutura e constituintes químicos bastante semelhantes, incluindo celulose, hemicelulose, lignina, pectina e cera em diferentes concentrações. A Figura 8 apresenta uma estrutura típica das fibras naturais (PARAMESWARANPILLAI et al., 2021).

Figura 8 – Estrutura típica das fibras naturais oriundas de plantas.



Fonte: Adaptado de PARAMESWARANPILLAI et al. (2021)

Como reforço, as fibras naturais podem eventualmente ser utilizadas para substituir as fibras de vidro em algumas aplicações, fornecendo peças fabricadas com materiais compósitos para serem usadas na indústria automotiva, construção e embalagem. Em geral, fibras naturais lignocelulósicas, como linho, cânhamo, henequen, sisal, coco, juta, palma, bambu, casca de arroz, trigo, cevada, aveia, centeio, cana (açúcar e bambu), junco, kenaf, rami, óleo de palma, fibra de coco, fibra de banana, folha de abacaxi, papiro, madeira ou papel têm sido utilizados como reforço em compósitos termorrígidos e em termoplásticos (CAMPILHO, 2015).

Dentre as diversas fibras naturais que podem ser empregadas comercialmente em materiais compósitos, o sisal (Figura 9) vem sendo muito utilizado devido principalmente à sua boa resistência mecânica, baixa densidade, ser ambientalmente amigável e a uma boa relação custo-benefício. A fibra de sisal pertence à família *Asparagaceae*, com o nome botânico *Agave sisalana*. É uma espécie de agave com origem no sul do México, mas pode ser encontrada em outros países como Brasil, Tanzânia, China, Etiópia, Angola, África do Sul e Marrocos (OYEN, 2011).

Figura 9 – Cultivo do sisal (*Agave sisalana*).

Fonte: EMBRAPA (2008)

Dentre as propriedades mais interessantes para a aplicação de fibras naturais nos materiais compósitos está a densidade, o limite de resistência à tração e o módulo de elasticidade. A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas e mecânicas típicas de fibras naturais e sintéticas aplicadas em materiais compósitos.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas típicas de fibras naturais e sintéticas.

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Comprimento (mm)	Diâmetro (µm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Tração (GPa)	Módulo Específico (aproxim.)	Alongamento (%)	Teor de umidade (%)
<i>E-glass</i>	2,5–2,59	–	<17	2000–3500	70–76	29	1,8–4,8	–
Abacá	1,5	–	–	400–980	6,2–20	9	1,0–10	5–10
Alfa	0,89	–	–	35	22	25	5,8	–
Bagaço	1,25	10–300	10–34	222–290	17–27,1	18	1,1	–
Bambu	0,6–1,1	1,5–4	25–40	140–800	11–32	25	2,5–3,7	–
Banana	1,35	300–900	12–30	500	12	9	1,5–9	8,7–12
Coco	1,15–1,46	20–150	10–460	95–230	1,8–6	4	15–51,4	8,0
Algodão	1,5–1,6	10–60	10–45	287–800	5,5–12,6	6	3–10	7,85–8,5
Curauá	1,4	35	7–10	87–1150	11,8–96	39	1,3–4,9	–
Linho	1,4–1,5	5–900	12–600	343–2000	27,6–103	45	1,2–3,3	8–12
Cânhamo	1,4–1,5	5–55	25–500	270–900	23,5–90	40	1–3,5	6,2–12
Henequen	1,2	–	–	430–570	10,1–16,3	11	3,7–5,9	–
Isora	1,2–1,3	–	–	500–600	–	–	5–6	–
Juta	1,3–1,49	1,5–120	20–200	320–800	8–78	30	1–1,8	12,5–13,7
Kenaf	1,4	–	–	223–930	14,5–53	24	1,5–2,7	–
Urtiga	–	–	–	650	38	–	1,7	11–17
Palmeira	0,7–1,55	–	150–500	80–248	0,5–3,2	2	17–25	–
Piaçava	1,4	–	–	134–143	1,07–4,59	2	7,8–21,9	–
Rami	1,0–1,55	900–1200	20–80	400–1000	24,5–128	60	1,2–4,0	7,5–17
Sisal	1,33–1,5	900	8–200	363–700	9,0–38	17	2,0–7,0	10–22

Fonte: Adaptado de CAMPILHO (2015)

Compósitos reforçados com fibras naturais possuem um grande apelo em sua utilização devido a sua sustentabilidade e baixa massa específica em comparação com compósitos convencionais semelhantes, o que os torna especialmente populares na indústria automotiva na confecção de peças mais leves e igualmente resistentes (MIELEWSKI, 2015).

A Alemanha é líder no uso de compósitos de fibras naturais. Os fabricantes de automóveis alemães Mercedes, BMW, Audi e Volkswagen foram os pioneiros em utilizar compósitos de fibra natural em suas linhas de produção. O primeiro exemplo comercial é o painel interno da porta do Mercedes-Benz 1999 S-Class, fabricado na Alemanha, com 35% de elastômero Baypreg F semi-rígido (PUR) da Bayer e 65% de uma mistura de linho, cânhamo e sisal (SANJAY et al., 2016). A Figura 10 apresenta um exemplo da utilização de fibras naturais em materiais compósitos aplicados no revestimento interno utilizado pela indústria automotiva na construção das portas dos automóveis.

Figura 10 – Revestimento produzido com material compósito reforçado com fibras naturais aplicado na indústria automotiva.



Fonte: BASF (2018)

2.4.1 Adesão entre as fibras naturais e as matrizes

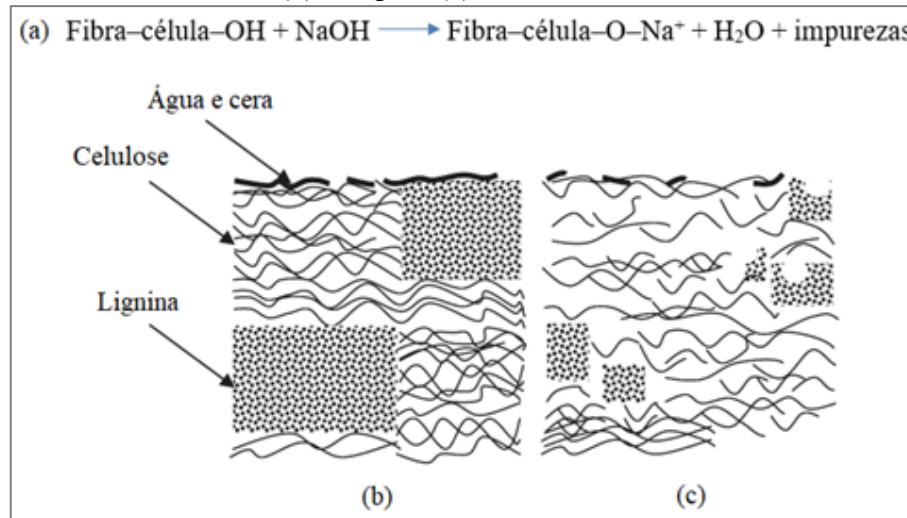
As propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais estão intrinsecamente relacionadas a adesão na interface entre as fibras e a matriz. As fibras naturais possuem alto teor de celulose, hemicelulose, pectina e lignina, que são grupos hidroxil, ou seja, elas tendem a possuir fortes características polares e hidrofílicas, enquanto os polímeros exibem significativa hidrofobicidade. Em outras palavras, é comum existirem incompatibilidades entre as fibras naturais e as matrizes, que são responsáveis pelo enfraquecimento da união entre elas na interface fibra/matriz (SHALWAN; YOUSIF, 2013).

A natureza da ligação entre a fibra e a matriz depende do arranjo atômico, das propriedades químicas da fibra e da constituição química da matriz. No entanto, em compósitos de fibra natural, a celulose é o principal agente de acoplamento na ligação polímero/fibra. Por outro lado, a lignina atua obstruindo o agente de acoplamento, impedindo uma boa adesão (AL-QURESHI, 1999). A pectina e as substâncias cerosas também provocam esse mesmo efeito, cobrindo os grupos funcionais reativos das fibras, atuando como uma barreira, impedindo assim a adesão com a matriz.

Tratar quimicamente a fibra pode ser uma das soluções para aumentar a adesão da interface entre a fibra e a matriz, além de diminuir a absorção de água das fibras naturais. Kabir et al. (2012) apresentam um rol de tratamentos químicos que podem ser utilizados para melhorar a união na interface entre as fibras naturais e os materiais utilizados nas matrizes.

Dentre os diversos tratamentos químicos, o tratamento com hidróxido de sódio (NaOH) é um dos tratamentos que vem sendo bastante utilizado em pesquisas com compósitos reforçados por fibras naturais. A solução alcalina transforma a região cristalina da celulose em regiões amorfas. Nessas regiões amorfas, as microfibras de celulose são separadas e os espaços são preenchidos por moléculas de água. As ligações de hidrogênio (OH) sensíveis aos álcalis presentes entre as moléculas são quebradas, reagindo com as moléculas de água (H–OH), movendo-se para fora da estrutura da fibra. As moléculas reativas restantes formam grupos fibra–célula–O–Na entre as cadeias moleculares de celulose. Devido a isso, grupos hidroxila hidrofílicos são reduzidos e aumentam a resistência à umidade das fibras. A superfície da fibra torna-se mais uniforme devido à eliminação de micro vazios e, assim, a capacidade de transferência de tensão entre as fibras melhora. Além disso, reduz o diâmetro da fibra, aumentando a relação comprimento/diâmetro e a área de superfície da fibra, conseqüentemente permitindo uma melhor adesão com a matriz. A Figura 11 mostra a reação química entre a fibra e o NaOH e uma visão esquemática da estrutura celulósica da fibra, antes e depois do tratamento com hidróxido de sódio. As fibras tratadas apresentam menor teor de lignina, remoção parcial de cera e óleo e distensão da ordem cristalina da celulose (KABIR et al., 2012).

Figura 11 – Reação química entre a fibra e o NaOH (a) e uma visão esquemática da estrutura celulósica da fibra, antes (b) e depois (c) do tratamento com hidróxido de sódio.



Fonte: Adaptado de KABIR et al. (2012)

O tratamento alcalino tem dois efeitos sobre a fibra: (1) aumenta a rugosidade da superfície, resultando em melhor intertravamento mecânico; e (2) aumenta a quantidade de celulose exposta na superfície da fibra, aumentando assim o número de possíveis locais de reação com os elementos da matriz (VALADEZ-GONZALEZ et al., 1999).

O tratamento alcalino da fibra de sisal reduz o teor de hemicelulose, lignina e cera presentes na superfície, além de aumentar a sua rugosidade, o que melhora a adesão das fibras com o material da matriz e, conseqüentemente, melhora as propriedades mecânicas dos compósitos (BEKELE; LEMU; JIRU, 2022a).

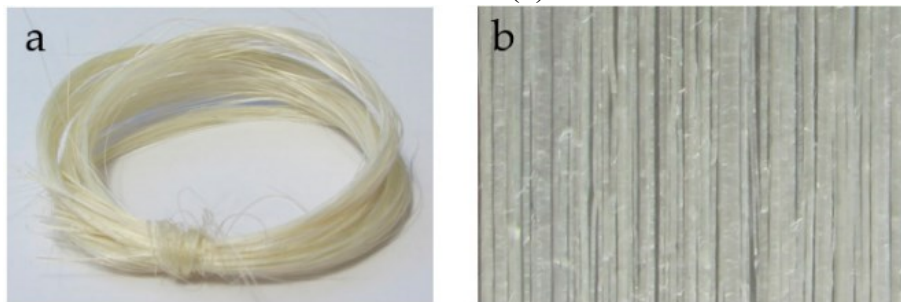
2.5 ESTADO DA ARTE

A quantidade de pesquisas recentes na área de compósitos reforçados com fibras naturais mostra que este ramo tem sua importância e que o interesse nesta área vem crescendo com o passar do tempo. Vários autores vêm trabalhando em pesquisas na área de compósitos reforçados com fibras naturais com o objetivo de encontrar alternativas mais ambientalmente amigáveis aos materiais tradicionalmente utilizados como reforço e matrizes nos compósitos utilizados atualmente pela indústria.

Sinitsky; Trabelsi e Priel (2022) prepararam amostras de compósitos contendo fibras de sisal em matriz de epóxi, sem nenhum tratamento químico superficial nas fibras, através do

método *hand lay-up*. As fibras foram alinhadas e organizadas para formar uma camada com a espessura aproximada do diâmetro de uma fibra, como pode ser observado na Figura 12. As fibras foram impregnadas manualmente com resina e o processo de cura ocorreu em temperatura ambiente. As amostras foram preparadas contendo 20%, 40% e 60% de frações em volume de fibras, calculados com base na densidade aparente de $1,2 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$. Dois tipos de amostras foram preparados: uma contendo as fibras alinhadas na direção do carregamento (carga axial) e a outra com as fibras orientadas em 45° em relação à direção de carregamento. As fibras utilizadas nos experimentos apresentaram um valor do módulo de elasticidade médio de 25 GPa. A resina epóxi sem as fibras obteve um valor para a resistência à tração no ponto de escoamento de 44,6 MPa com deformação de 2,8%, e o módulo de elasticidade foi medido no início da curva, apresentando um comportamento quase linear, com um valor de 2,3 GPa.

Figura 12 – Fibras utilizadas nos experimentos (a), e fibras organizadas antes da impregnação com resina (b).

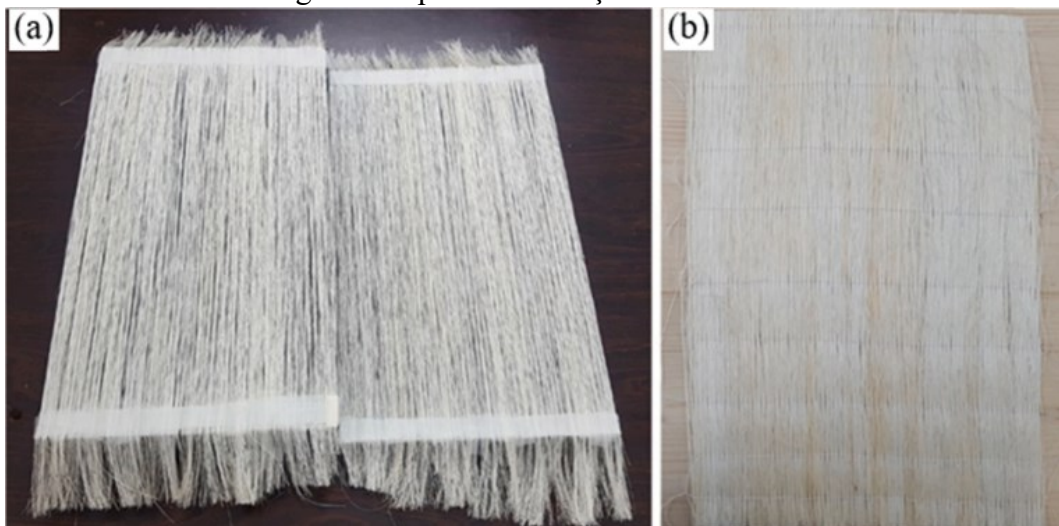


Fonte: SINITSKY; TRABELSI; PRIEL (2022)

Para o teste do compósito contendo fibras de sisal e resina epóxi com as fibras alinhadas no sentido longitudinal em relação ao eixo de tração, os compósitos de fibras de sisal com epóxi contendo 20%, 40% e 60% de fibras em volume obtiveram módulos de elasticidades de $(6,2 \pm 0,55)$ GPa, $(11,2 \pm 0,48)$ GPa e $(13,8 \pm 0,96)$ GPa, e resistência à tração efetiva de $(118,8 \pm 8,69)$ MPa, $(211,4 \pm 11,30)$ MPa e $(251,8 \pm 18,98)$ MPa, respectivamente. Quando avaliados os compósitos com as fibras alinhadas em 45° em relação ao eixo de tração, os valores obtidos foram de $(2,5 \pm 0,29)$ GPa, $(2,3 \pm 0,30)$ GPa e $(2,1 \pm 0,20)$ GPa para o módulo de elasticidade e de $(13,2 \pm 1,5)$ MPa, $(10,8 \pm 1,7)$ MPa e $(7,1 \pm 1,8)$ MPa para a resistência à tração efetiva, respectivamente para as frações de 20%, 40% e 60% de fibras em volume, consideravelmente menores que os obtidos com as fibras orientadas no sentido longitudinal da força de tração (SINITSKY; TRABELSI; PRIEL, 2022).

Zuccarello; Militello e Bongiorno (2021) avaliaram a influência da anisotropia das fibras de sisal nas propriedades mecânicas de compósitos de sisal com matriz epóxi. As amostras foram preparadas de forma que as fibras fossem dispostas em uma única direção (unidirecionais) no laminado. As fibras foram previamente alinhadas e “costuradas” manualmente em intervalos de 50 mm e não passaram por nenhum tratamento superficial prévio, como pode ser observado na Figura 13. Foram produzidas amostras contendo fração de volume de fibra de 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e 70%, utilizando um molde com as dimensões de 340 x 190 mm, onde o compósito foi prensado e curado em temperaturas próximas a 80 °C por cerca de 5 horas. As fibras utilizadas apresentaram um valor de 40,1 GPa e 675 MPa para o módulo de elasticidade médio e a resistência à tração, respectivamente. A resina epóxi usada como matriz também foi avaliada, possuindo um módulo de elasticidade de 2,5 GPa e limite de resistência à tração de aproximadamente 45 MPa.

Figura 13 – Fibras alinhadas (a) e costuradas (b) em intervalos de 50 mm de forma longitudinal para a fabricação das amostras.



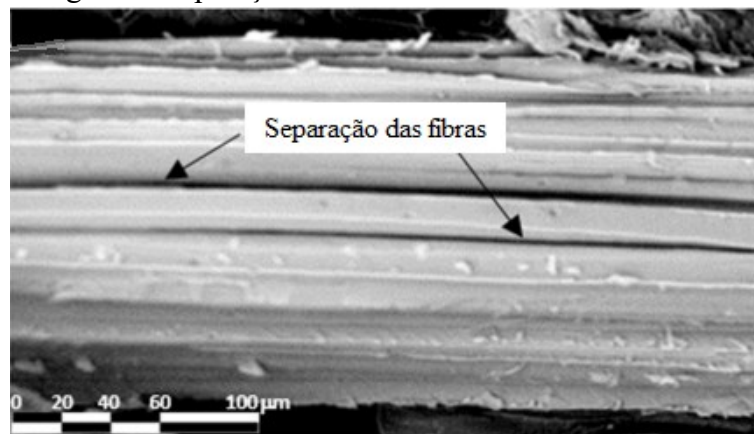
Fonte: ZUCCARELLO; MILITELLO; BONGIORNO (2021)

De acordo com autores, quanto maior a fração de volume de fibras, maior foi a resistência à tração obtida, em uma relação quase linear: para 20%, obteve cerca de 200 MPa, para 70%, obteve cerca de 470 MPa. O módulo de elasticidade obtido para a fração de fibras em volume de 20% foi de cerca de 13 GPa, enquanto que para a fração de 70% foi de aproximadamente 475 GPa, também apresentando uma relação quase linear entre o módulo de elasticidade e a fração de fibras em volume.

Quando avaliadas as amostras com as fibras dispostas na direção transversal em relação ao eixo de tensionamento, Zuccarello; Militello e Bongiorno (2021) obtiveram

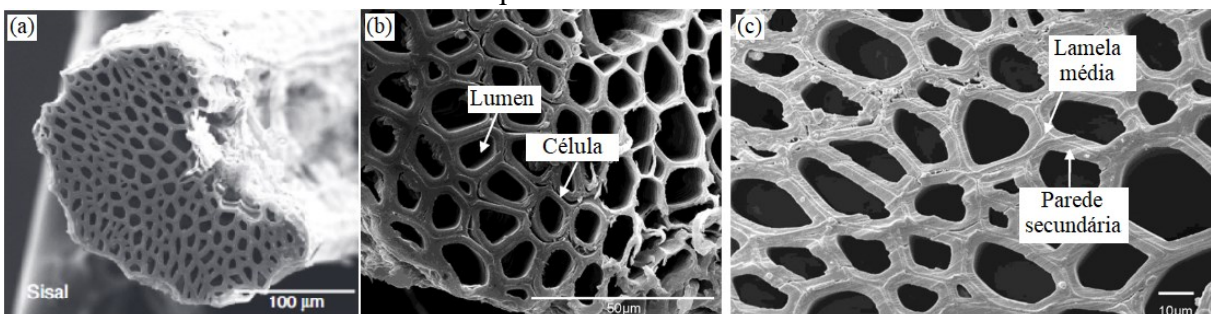
resultados de módulo de elasticidade e de tração muito menores que os obtidos quando as fibras estavam alinhadas ao eixo de tensionamento. Nesta condição, a resistência à tração obtida para a fração de fibras em volume de 20% foi cerca de 18 MPa, enquanto que para 70% foi de cerca de 5 MPa. O módulo de elasticidade também apresentou, de forma similar à resistência à tração, uma queda expressiva, sendo cerca de 2,5 GPa para todas as frações de volume de fibras. Segundo os autores, o principal motivo para a queda nos valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração está relacionado a baixa adesão interna das fibras de sisal, que quando tracionadas na direção perpendicular ao sentido da fibra, acabam por se separar. As fibras se comportam como se fossem vazias e acabam por concentrar as tensões em sua volta, causando a fratura. A Figura 14 apresenta uma micrografia obtida por MEV destacando a separação das fibras, enquanto a Figura 15 apresenta micrografias obtidas por Alves Fidelis et al. (2013) que mostram a microestrutura da fibra do sisal em corte transversal ao sentido da fibra.

Figura 14 – Região de separação das fibras devido à tensão transversal aplicada.



Fonte: Adaptado de ZUCCARELLO; MILITELLO; BONGIORNO (2021)

Figura 15 – Micrografia da microestrutura da fibra do sisal mostrando (a) uma visão geral, (b) ampliação contendo os detalhes dos lumen e das células e (c) indicação das lamelas médias e as paredes das células.



Fonte: Adaptado de ALVES FIDELIS et al. (2013)

Bekele et al. (2022) produziram amostras de compósitos híbridos com fibras de sisal e fibras da planta ensete, uma espécie de bananeira falsa de origem africana, com a utilização de resina poliéster como matriz, através do método *hand lay-up*. As amostras foram preparadas com as fibras dispostas em uma única direção, paralelas ao sentido das forças de tração. As fibras não sofreram nenhum tratamento prévio para melhorar as propriedades superficiais. Foram produzidas cinco amostras diferentes contendo seis camadas cada uma, variando a quantidade de cada tipo de fibra, com proporções de 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 e 0/100 em peso de ensete em relação ao sisal.

De acordo com os resultados dos testes realizados por Bekele et al. (2022), a resistência à tração do compósito contendo apenas fibras de ensete com matriz poliéster apresentou o menor valor entre todas as amostras produzidas, aproximadamente 69,7 MPa. A hibridização com fibra de sisal melhorou a resistência à tração do compósito, resultando em maior resistência à tração. À medida que a quantidade de fibra de sisal aumenta no compósito híbrido, a resistência à tração é melhorada, atingindo um máximo de 150 MPa quando se tem apenas fibras de sisal. Segundo o autor, as fibras de ensete possuem um maior teor de lignina em sua superfície, o que dificulta a adesão com a matriz poliéster, e, conseqüentemente, reduz a resistência à tração do compósito.

Cavalcanti et al. (2019) prepararam amostras híbridas de compósitos contendo fibras de sisal, juta e curauá como materiais de reforço, e resina epóxi como matriz através da técnica de *hand lay-up* com uma fração em volume de fibras de 30%. No trabalho desenvolvido foram avaliados os efeitos dos tratamentos químicos de alcalinização, e uma combinação de alcalinização com posterior silanização, bem como a variação na quantidade de fibras de sisal, juta e curauá. A composição das amostras foi realizada de forma que se utilizou um tecido bidimensional de juta, onde eram costuradas as fibras de sisal e curauá de forma alinhada numa única direção, conforme pode ser observado na Figura 16 para a configuração juta e sisal. Para o tratamento de alcalinização, as fibras e o tecido utilizados foram submersos em uma solução alcalina de NaOH por cerca de uma hora e posteriormente lavados em água corrente. O tratamento misto constituiu na imersão das fibras e o tecido em uma solução de silano (pH 5) por cerca de 1 hora, posterior ao tratamento de alcalinização.

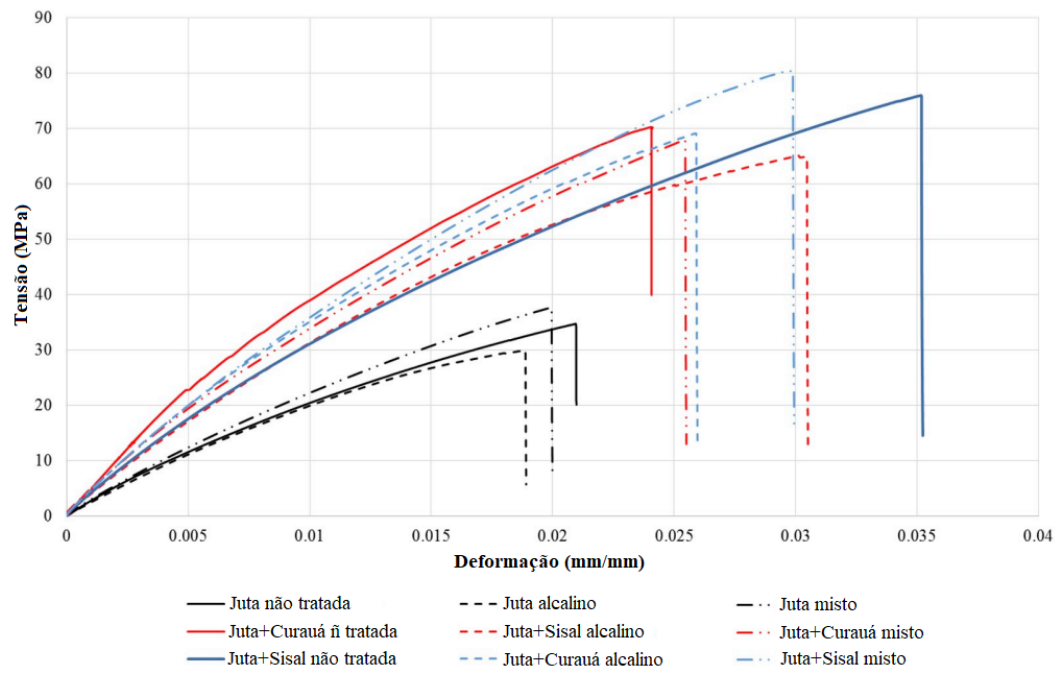
Figura 16 – Tecido de juta contendo fibras de sisal costuradas e alinhadas.



Fonte: CAVALCANTI et al. (2019)

De acordo com os resultados dos testes realizados por Cavalcanti et al. (2019), a hibridização melhorou as propriedades de tensão dos compósitos híbridos quando comparados ao compósito contendo apenas o tecido composto de juta. Enquanto a resistência à tração do compósito contendo apenas o tecido de juta não tratado obteve um valor de 39,75 MPa, a resistência à tração do compósito híbrido de juta com sisal não tratado obteve 66,77 MPa. Os resultados dos tratamentos químicos foram variados, tendo efeito positivo para juta apenas e juta e sisal, e efeito negativo para juta e curauá, conforme pode ser observado na Figura 17 em que estão representadas as curvas de tensão-deformação para as amostras obtidas. Os melhores resultados para a resistência à tração e o módulo de elasticidade foram obtidos pelas amostras híbridas de juta e sisal com tratamento alcalino, tendo um valor de 74,78 MPa e 6,76 GPa, respectivamente. Dentre as conclusões do trabalho de Cavalcanti et al. (2019), cita-se que os compósitos reforçados com fibras naturais têm potencial para substituir os compósitos reforçados com fibra de vidro em aplicações que não exijam altas cargas de trabalho e que os tratamentos químicos estudados nem sempre levam a aumentos significativos no desempenho dos compósitos.

Figura 17 – Curvas tensão-deformação obtidas dos resultados dos ensaios dos compósitos.



Fonte: CAVALCANTI et al. (2019)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho se propôs a fabricar compósitos contendo fibras de sisal em matriz polimérica epoxídica e a posterior caracterização das propriedades mecânicas de limite de resistência à tração, alongamento percentual máximo e módulo de elasticidade.

3.1 MATERIAIS

Nessa sessão são apresentados os materiais que compõem a fase matriz e a fase reforçadora utilizados na realização do presente trabalho.

3.1.1 Resina epóxi

Como fase matriz foi utilizado um polímero termorrígido Epóxi tipo cristal de baixa viscosidade código 2004, obtido da reação da epicloridrina (ECH) com o Bisfenol A (BPA), com endurecedor Epóxi código 3154, à base de poliamina modificado, ambos fornecidos pela empresa Redelease. Os dados da resina são apresentados na Tabela 2. O procedimento de homogeneização entre a resina e o agente de cura foi realizado de forma manual, com o uso de espátulas, conforme recomendado pelo fabricante.

Tabela 2 – Propriedades da resina epóxi 2004 e endurecedor 3154 da fabricante Redelease.

Características dos componentes		
	<i>Resina 2004</i>	<i>Endurecedor 3154</i>
Aparência	Líquido incolor viscoso	Líquido levemente amarelado
Viscosidade, 20°C [cPs]	600 a 900	200 máximo
Peso Específico, 20°C [g cm ⁻³]	1,12 +/- 0,01	1,005 +/- 0,015
Propriedades do sistema não curado		
Proporção de mistura (resina/endurecedor)	100:50 partes em peso	
Temperatura de manipulação [°C]	18–30	
Tempo de utilização da mistura 100 g (gel time) a 20 °C	25–35 minutos	
Tempo de endurecimento da mistura (100 g em película) a 20 °C	4–6 horas	
Cura total a 20 °C	7 dias	
Propriedades do sistema curado		
Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) [°C]	70–80	
Resistência à Compressão [MPa]	27,6	
Resistência à Tração [MPa]	20,6–42,7	
Elongação [%]	4,9	
Impacto Izod [ft lb/in]	0,3–0,6	
Dureza Barcol	10 mínimo	

Fonte: Adaptado de REDELEASE (2017)

3.1.2 Fibra de sisal

Para compor a fase reforçadora foram utilizadas fibras naturais de sisal em formato de fibras longas. As fibras foram gentilmente fornecidas pela empresa Cotesi do Brasil Comércio e Indústria de Fios e Participações Ltda., estando no seu estado natural, conforme mostrado na Figura 18, enquanto a Tabela 3 apresenta as propriedades e a composição química das fibras de sisal de acordo com dados compilados por Vigneshwaran et al. (2020).

Figura 18 – Fibras de sisal utilizadas na produção do compósitos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 3 – Propriedades físicas e composição química do sisal (*Agave sisalana*).

Composição química	
Hemi Celulose [%]	10
Celulose [%]	78
Lignina [%]	8
Cerosos [%]	2
Cinzas [%]	1
Propriedades físicas	
Diâmetro (μm)	50–200
Densidade (g m^{-3})	1,3–1,4
Resistência à tração (MPa)	390–450
Módulo elástico (GPa)	12–41
% Alongamento	2,3–2,5

Fonte: Adaptado de VIGNESHWARAN et al. (2020)

As superfícies das fibras de sisal são constituídas de compostos orgânicos e inorgânicos, além de materiais de natureza hidrofílico como substâncias cerosas. Estes constituintes acabam por dificultar a interação química da fibra com resinas sintéticas, como a resina epóxi, pois impedem o contato direto entre a resina e a fibra (BISANDA, 2000).

Com o objetivo de reduzir a quantidade de lignina e hemicelulose presente na superfície externa da fibra, aumentar a resistência à tração da fibra e tornar a superfície da fibra menos uniforme, foi realizado um tratamento de mercerização com hidróxido de sódio. Com o tratamento de mercerização, Kithiia et al. (2022) obtiveram uma melhora significativa nas propriedades de tenacidade à fratura e módulo de elasticidade das fibras de sisal.

O hidróxido de sódio utilizado para realizar a mercerização das fibras de sisal possui concentração de 98%, armazenado como partículas de geometrias esféricas. A preparação da mistura foi realizada em bateladas. Em um recipiente resistente ao hidróxido de sódio, foram dissolvidos 250 g de Hidróxido de Sódio (NaOH) 98% em cinco litros de água, produzindo uma solução de NaOH 5% (1,5 mol/L), adequada para o tratamento superficial das fibras conforme observado em trabalhos anteriores. As fibras foram imersas no recipiente contendo a solução de NaOH e mantidos em temperatura ambiente por 30 minutos com movimentação manual moderada das fibras (pouca agitação). As fibras foram então removidas e lavadas em água corrente por diversas vezes para remover quaisquer resquícios de NaOH. Posteriormente, as fibras foram secas em temperatura ambiente por um período de cinco dias. A Figura 19 apresenta as fibras imersas na solução de NaOH 5% e a solução resultante após a retirada das fibras. A solução teve sua coloração alterada de incolor, antes da imersão das fibras, para coloração amarelada, após a imersão das fibras.

Figura 19 – Fibras de sisal imersas em solução de NaOH 5% durante o tratamento de mercerização (a), e aparência da solução após remoção das fibras (b).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

3.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

As amostras de compósitos produzidos foram caracterizadas quanto às suas propriedades mecânicas de limite de resistência à tração, alongamento percentual máximo e módulo de elasticidade.

3.2.1 Ensaio mecânico de tração

O ensaio mecânico de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Mede a variação no comprimento como função da carga (GARCIA; ALVARES SPIM, 2000).

O ensaio mecânico de tração dos corpos de prova (CPs) foi realizado em uma máquina universal de ensaios da fabricante Instron, modelo 23-100 (Figura 20), disponível no Laboratório de Materiais da UFSC Campus Joinville, seguindo a norma ASTM D3039/D3039M –17 (2017) – “Tração de Materiais Compósitos com Matriz de Polímeros”. A célula de carga utilizada foi de 10 kN e o ensaio foi realizado com velocidade de 2 mm/min. Os dados foram coletados utilizando software Bluehill Universal, sendo determinados os valores de limite de resistência à tração, alongamento percentual máximo e módulo de elasticidade para todos os 35 CPs ensaiados.

Figura 20 – Máquina de ensaio mecânico de tração Instron 23-100 utilizada nos ensaios.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

3.2.2 Determinação das dimensões dos corpos de prova

As larguras e espessuras dos corpos de prova foram determinadas utilizando um paquímetro da fabricante Vonder, modelo PA 152 e podem ser encontrados na Tabela 4. O comprimento, espessura e largura médios foram obtidos através da medição em três pontos do CP, dentro da tolerância de 1% na dimensão da amostra, conforme procedimento da norma.

Tabela 4 – Comprimento, espessura e largura dos corpos de prova e seus respectivos desvios padrão.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Desvio Padrão
Comprimento (mm)							
Amostra 1	153,20	152,10	151,50	151,60	151,10	151,90	0,81
Amostra 2	152,00	152,10	152,00	151,80	152,00	151,98	0,11
Amostra 3	152,20	152,50	152,70	152,70	152,70	152,56	0,22
Amostra 4	153,00	153,00	153,30	153,20	153,10	153,12	0,13
Amostra 5	153,00	153,00	153,00	153,20	153,10	153,06	0,09
Amostra 6	151,30	151,80	151,60	151,40	151,30	151,48	0,22
Amostra 7	151,70	152,30	153,00	152,50	153,00	152,50	0,54
Espessura (mm)							
Amostra 1	4,10	4,20	4,20	4,20	4,10	4,16	0,05
Amostra 2	1,70	1,60	1,70	1,70	1,60	1,66	0,05
Amostra 3	3,40	3,50	3,40	3,50	3,50	3,46	0,05
Amostra 4	1,80	1,70	1,70	1,80	1,60	1,72	0,08
Amostra 5	4,40	4,40	4,20	4,20	4,10	4,26	0,13
Amostra 6	1,90	1,90	1,80	1,80	1,90	1,86	0,05
Amostra 7	3,90	3,70	3,50	3,50	3,30	3,58	0,23
Largura (mm)							
Amostra 1	16,70	15,00	16,00	16,20	14,90	15,76	0,78
Amostra 2	14,70	15,60	14,60	16,00	15,30	15,24	0,59
Amostra 3	15,10	15,60	15,20	14,90	15,70	15,30	0,34
Amostra 4	15,60	15,30	15,30	15,50	14,90	15,32	0,27
Amostra 5	16,20	15,00	16,20	15,90	15,30	15,72	0,54
Amostra 6	16,40	15,20	15,20	16,60	15,20	15,72	0,72
Amostra 7	14,90	16,90	15,20	16,20	15,60	15,76	0,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a discussão dos resultados dos procedimentos experimentais realizados neste trabalho. O capítulo foi dividido em duas seções: a seção 4.1 apresenta os resultados e discussões a respeito da preparação e fabricação das amostras, e a seção 4.2 trata da caracterização das amostras através do ensaio mecânico de tração.

4.1 PREPARAÇÃO E LAMINAÇÃO DAS AMOSTRAS

A preparação das amostras foi realizada em duas etapas. Primeiramente foi necessário fabricar o molde para prensagem/cura em que as amostras foram produzidas. O molde é o responsável por conter as fibras e a resina e permitir a prensagem do compósito. Posteriormente, com o molde pronto, este foi utilizado para a produção dos compósitos.

4.1.1 Confeção do molde para prensagem/cura dos compósitos

A técnica *hand lay-up* é uma das técnicas mais simples aplicadas na fabricação de materiais compósitos. Nesta técnica, as fibras são dispostas em um molde e a resina contendo endurecedor é aplicada com pincel sobre as fibras. Posteriormente, as camadas depositadas são compactadas com o uso de rolos para que a resina preencha todos os espaços entre as fibras e retire o máximo de vazios do material. A cura pode ser feita à temperatura ambiente ou em temperaturas mais elevadas com o uso de fornos (CHAWLA, 2012). São consideradas vantagens deste processo a sua simplicidade, o baixo custo de processamento e a capacidade de fabricar projetos complexos, no entanto, como desvantagem, o processo também é conhecido por ter um longo tempo de processamento, ser trabalhoso e permitir a presença de bolhas no compósito (ASHRAF et al., 2019).

As amostras foram confeccionadas utilizando o método *hand lay-up* modificado, em que as fibras de sisal e o polímero termorrígido foram dispostos em um molde e a cura foi realizada sob pressão.

Para realizar a cura sob pressão, a confecção das amostras requereu a fabricação de um molde, capaz de conter as fibras e a resina e que permitisse o uso de uma prensa hidráulica para realizar pressão durante o processo de cura. O molde é composto por três peças metálicas, sendo uma chapa base, um quadro e uma placa para prensagem.

A placa base foi fabricada em aço SAE 1020 com dimensões de 300 x 300 mm por 5 mm de espessura, retirada de uma chapa de aço utilizando uma esmerilhadeira angular de 4½” com disco fino de corte para aço nas dimensões de 115 x 1,0 x 22,23 mm, conforme apresentado na Figura 21, em que foram soldados quatro tarugos de barra roscada galvanizada para servirem como trava.

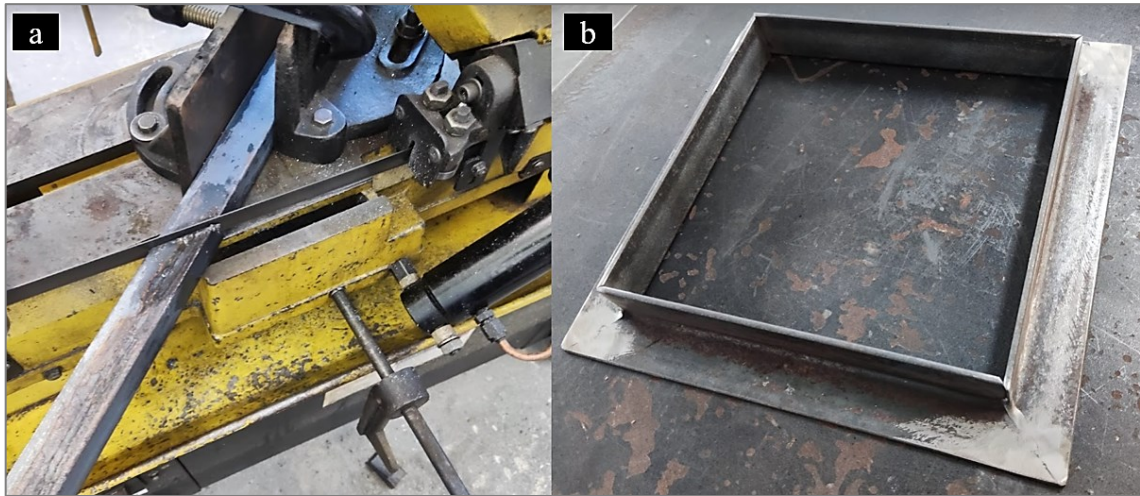
Figura 21 – Esmerilhadeira angular e o disco utilizado para o corte da placa base (a) e a placa base durante o processo de corte (b).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O quadro foi fabricado em cantoneira tipo L de abas iguais com dimensões de 25 x 25 mm por 3 mm de espessura, também de aço SAE 1020, em 4 barras cortadas em ângulo de 45 graus em uma serra-fita, posteriormente unidos utilizando o processo de soldagem MIG/MAG com arame e gás de proteção e, finalmente, furados utilizando uma broca de diâmetro 10 mm em uma furadeira de bancada, conforme mostrado na Figura 22.

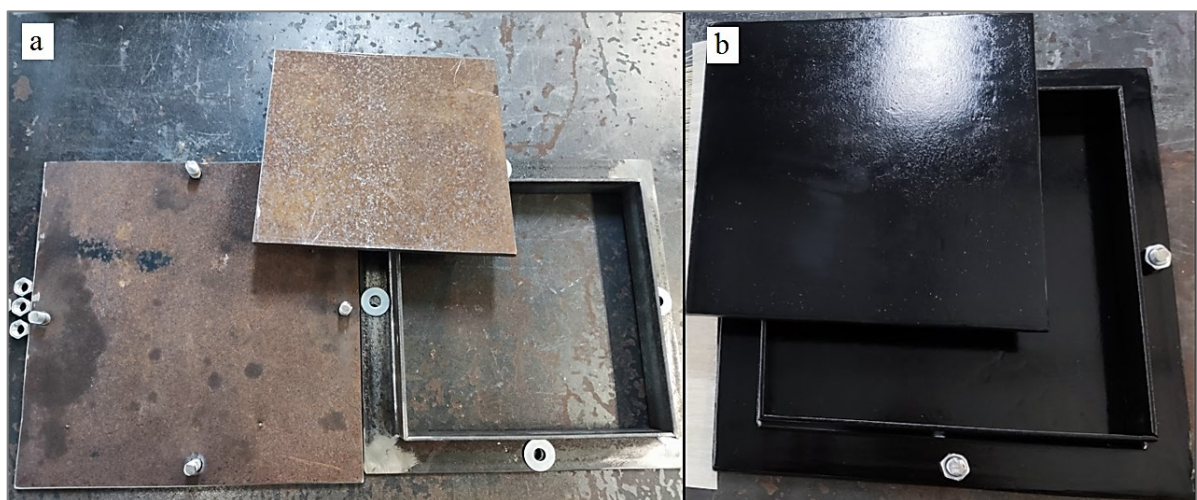
Figura 22 – Corte da cantoneira L em 45 graus para fabricação do molde (a) e o quadro soldado antes da furação para passagem dos tarugos de barra rosçada (b).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A placa para prensagem tem a função de comprimir as fibras e a resina e distribuir a carga aplicada por uma prensa mecânica. A placa foi fabricada nas dimensões de 200 x 200 mm por 5 mm de espessura, também em aço SAE 1020. Após a fabricação de todas as peças do molde, foi realizado um trabalho de limpeza para remoção da oxidação e pintura dos materiais para proteção contra a corrosão. A Figura 23 apresenta o molde para fabricação das amostras pronto.

Figura 23 – Chapa base, quadro e placa para prensagem (a) antes do acabamento e (b) após o acabamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4.1.2 Preparação dos compósitos

É de conhecimento que as fibras mostram uma maior resistência à tração quando a direção da força aplicada é paralela a sua direção longitudinal, como mostram os trabalhos de Cavalcanti et al. (2019) e Zuccarello; Militello; Bongiorno (2021). No entanto, na maioria das aplicações práticas de compósitos reforçados com fibras, as forças e tensões observadas não ocorrem apenas em uma única direção. As forças e tensões, mesmo que por curtos espaços de tempo, podem ocorrer em direções diferentes da direção das fibras. Neste trabalho, os compósitos foram desenvolvidos com o objetivo de analisar como diferentes configurações de camadas de fibras contínuas organizadas e fibras curtas aleatórias podem afetar o desempenho mecânico da amostra produzida. Para isto, sete amostras foram confeccionadas conforme o planejamento proposto na Tabela 5, que apresenta a configuração de cada amostra.

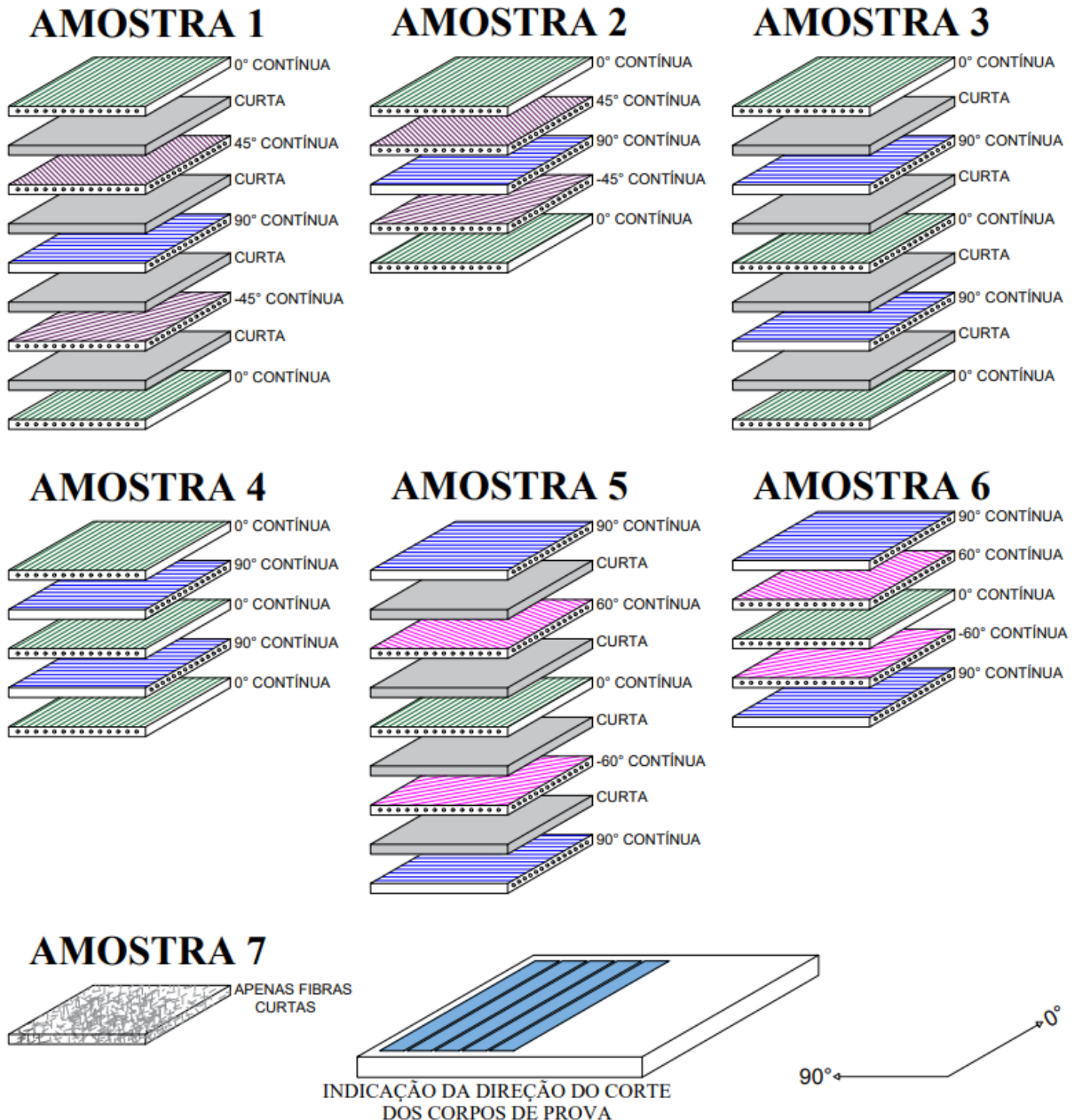
Tabela 5 – Relação de amostras confeccionadas e suas configurações de camadas e presença de fibras curtas.

Amostra	Ângulo entre as camadas de fibras de sisal	Adição de fibra curta
1	0°/45°/90°/-45°/0°	Com adição
2	0°/45°/90°/-45°/0°	Sem adição
3	0°/90°/0°/90°/0°	Com adição
4	0°/90°/0°/90°/0°	Sem adição
5	90°/60°/0°/-60°/90°	Com adição
6	90°/60°/0°/-60°/90°	Sem adição
7	N/A	Apenas fibras curtas

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A Figura 24 apresenta desenho esquemático dos ângulos que foram utilizados para a formação das amostras, mostrando como as camadas foram empilhadas conforme as configurações descritas na Tabela 5.

Figura 24 – Desenho esquemático da configuração das camadas de fibras contínuas/curtas de sisal nas amostras produzidas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Para a confecção das amostras, as fibras de sisal foram cortadas e organizadas em feixes de 30 x 30 cm conforme mostrado na Figura 25, com massa total de fibras de aproximadamente 10 g em cada camada. As fibras foram alinhadas todas na mesma direção. Além das fibras contínuas, em algumas amostras também foi aplicada uma camada de fibras curtas de sisal, de massa aproximada de 10 g por camada, com comprimento médio das fibras de 7 mm, de forma aleatória, obtidas dos feixes de fibras já tratados pelo processo de alcalinização.

Figura 25 – Organização das fibras de sisal para composição das camadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Após a organização e confecção dos feixes com as fibras de sisal, estes foram dispostos no molde, contendo cinco feixes por amostra e organizados de acordo com o planejamento dos experimentos. A Figura 26 apresenta os feixes dispostos no molde, antes da impregnação com resina epóxi.

Figura 26 – Feixes contendo as fibras de sisal organizadas sobre o molde antes da impregnação com resina epóxi.

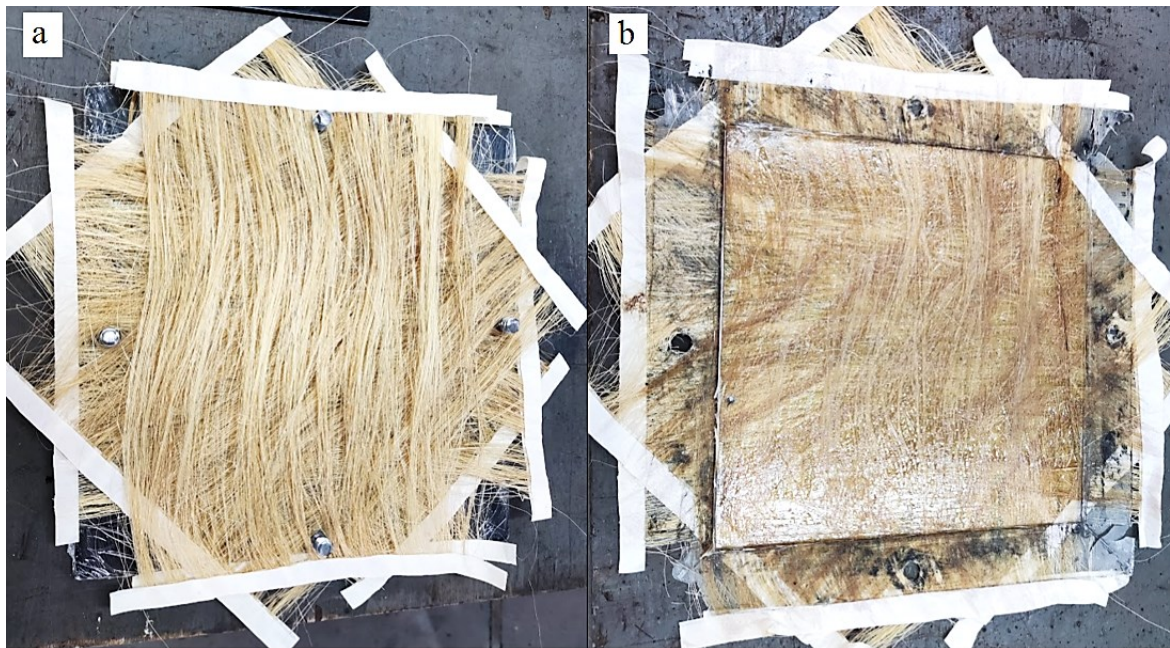


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A próxima etapa do processo de confecção das amostras foi a preparação da matriz na proporção de 50 g de resina epóxi Redelease 2004 para 25 g de endurecedor epóxi Redelease 3154. Após colocados em um recipiente adequado, a resina e o endurecedor foram manualmente misturados com espátulas até se obter a uniformidade entre os componentes.

A mistura contendo resina e endurecedor foi depositada no molde sobre os feixes de fibras de sisal e prensadas sob a placa de prensagem em uma prensa hidráulica manual de 30 toneladas da fabricante Bovenau com uma carga aproximada de 4 toneladas (cerca de 10 kgf cm⁻²) aferida no manômetro acoplado ao equipamento. A pressão aplicada foi suficiente para impregnar todo o material com a resina epóxi, conforme observado quando da remoção das amostras após a cura parcial. A Figura 27 mostra o antes e o depois da impregnação dos feixes de sisal com resina epóxi.

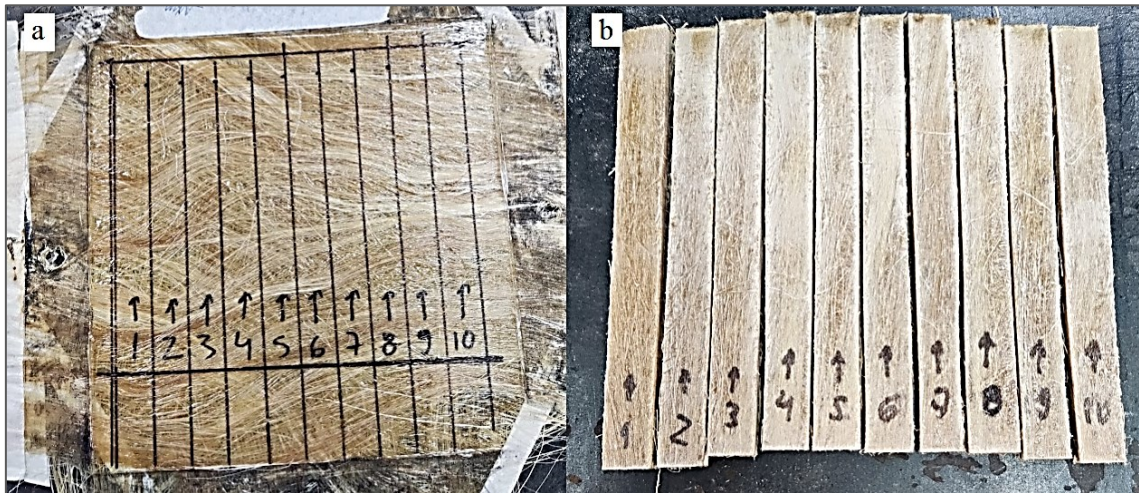
Figura 27 – Feixes de fibras de sisal (a) antes da adição da resina epóxi e (b) após a prensagem com a resina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Posteriormente foram cortados dez corpos de prova de cada amostra, totalizando 70 corpos de prova. O corte foi realizado através da marcação prévia de cada amostra com o perímetro de cada corpo de prova, alinhados a 0°, na direção longitudinal (a Figura 24 apresenta a direção do corte em relação ao alinhamento das camadas de fibras contínuas), com a utilização de uma esmerilhadeira angular com disco de corte fino, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Amostras marcadas em (a) e corpos de prova cortados em (b).



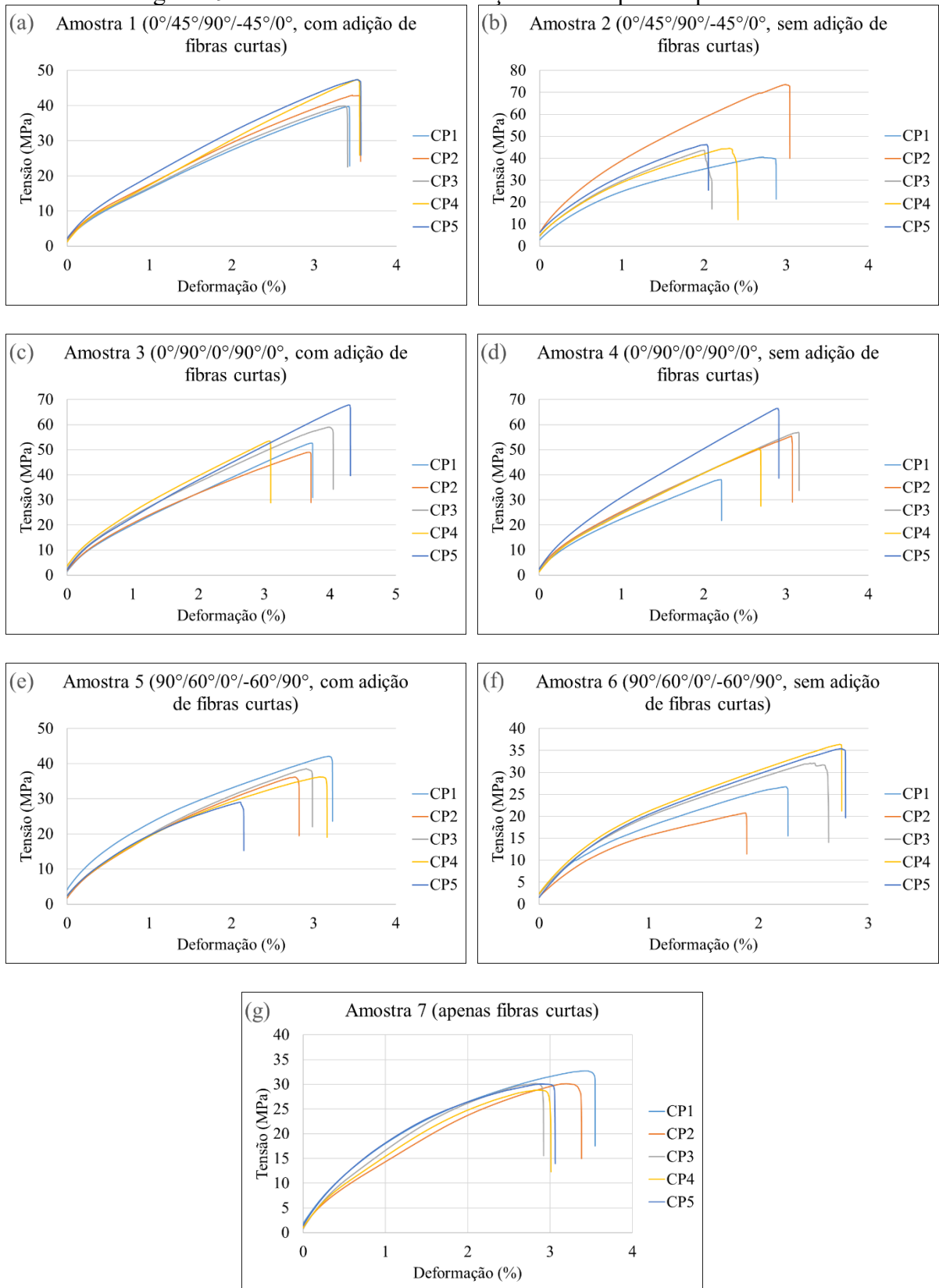
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O ensaio mecânico de resistência à tração foi realizado seguindo a norma ASTM D3039 utilizando uma célula de carga de 10 kN e uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min. Seu objetivo foi determinar os valores de limite de resistência à tração, alongamento percentual máximo e módulo de elasticidade das amostras de material compósito produzidos.

A Figura 29 apresenta as curvas tensão-deformação obtidas a partir dos ensaios mecânicos de tração realizados nas sete variações propostas, resultando em um total de 35 CPs ensaiados.

Figura 29 – Curvas tensão-deformação dos compósitos produzidos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Os corpos de prova suportaram a carga crescente aplicada pela máquina de ensaios apresentando uma deformação uniforme, sem apresentar qualquer alteração estrutural notável até o momento em que a tensão se aproxima do limite de resistência à tração, quando então ocorre a emissão de um som similar a estalos, indicando que as fibras começaram a romper. No período subsequente, os corpos de prova romperam de forma abrupta conforme a tensão aplicada atingiu o limite de resistência à tração.

Em geral, os corpos de prova romperam na região esperada, ou seja, na região próxima ao centro entre as garras da máquina de ensaios, conforme pode ser observado na Figura 30. Alguns corpos de prova romperam mais próximos da região de fixação, na região subsequente às garras da máquina de ensaios, porém após a análise da curva tensão-deformação não foi notado nenhum indicativo de problema no ensaio. Um corpo de prova fraturou sob uma das garras e a máquina de ensaios não identificou a quebra, continuando o ensaio, o que provocou uma leitura incorreta, sendo necessário descartar este corpo de prova e a consequente repetição do ensaio com um novo corpo de prova.

Figura 30 – Corpo de prova fraturado na região central entre as garras da máquina de ensaios (indicado pela seta).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A geometria das fraturas dos CPs 2 e 3 da Amostra 1 se mostraram não-uniformes, sem uma angulação bem definida, no entanto, os CPs 1, 4 e 5 indicaram uma fratura na direção diagonal, típico de materiais não homogêneos, conforme pode ser observado na Figura 31. Este comportamento de fratura na direção diagonal se repetiu nos CPs das Amostras 5 e 6, porém em uma inclinação menor, mais próxima dos 30° , o que pode ser um indicativo que as camadas de fibras orientadas a 30° podem ter originado a fratura no corpo de prova devido ao efeito de rompimento interno das fibras no sentido longitudinal.

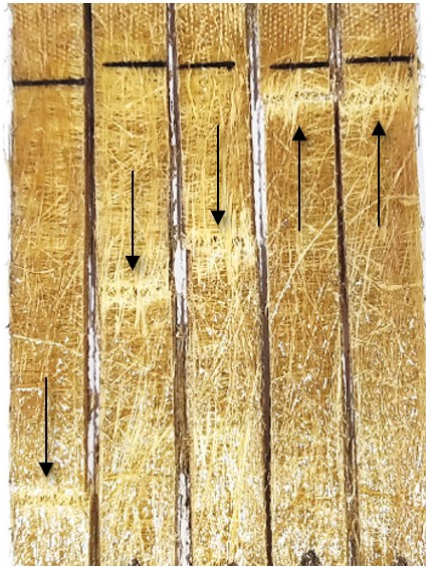
Figura 31 – Região das fraturas dos CPs da Amostra 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

As fraturas das Amostras 2, 3, 4 e 7 apresentaram uma semelhança com as fraturas de materiais homogêneos – uma linha reta perpendicular à direção da tração. A Figura 32, referente à Amostra 3, exemplifica este comportamento com a direção da fratura perpendicular à direção de carregamento.

Figura 32 – Fratura dos CPs da Amostra 3 ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$) predominantemente na direção perpendicular a força aplicada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O APÊNDICE A contém as figuras de todos os CPs fraturados durante o ensaio mecânico de tração.

4.2.1 Limite de resistência à tração

O limite de resistência à tração representa a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação do ensaio mecânico de tração. O seu valor significa a máxima tensão que pode ser sustentada por uma dada estrutura que se encontra sob tração (GARCIA; ALVARES SPIM, 2000).

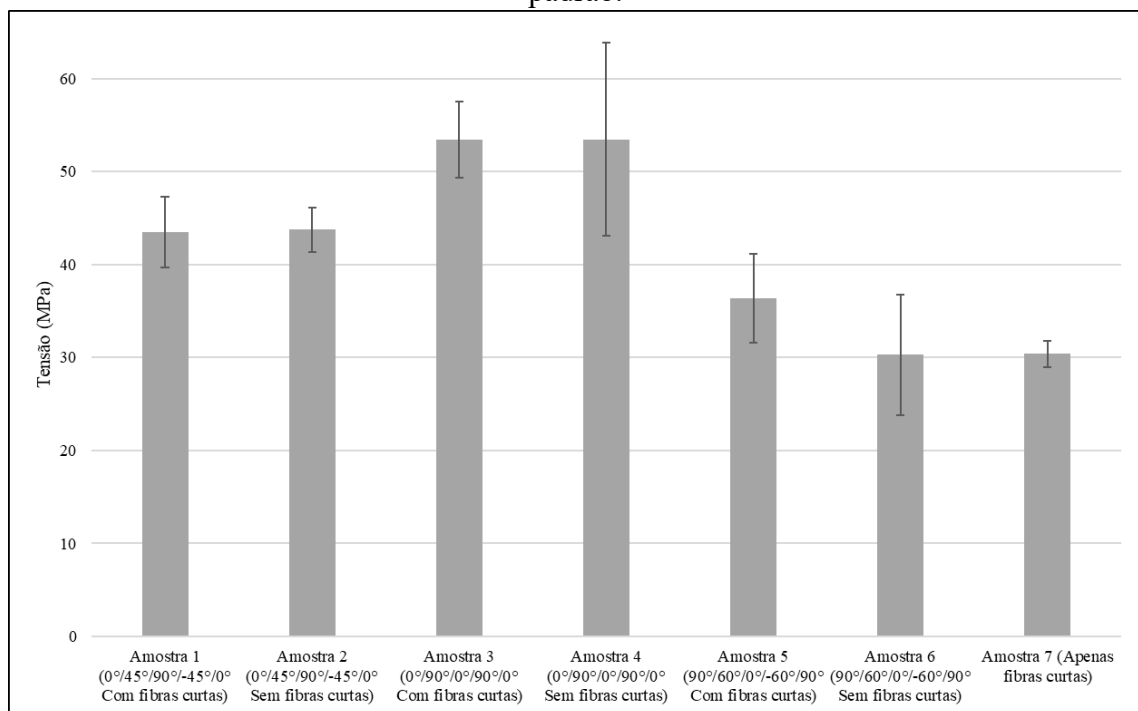
Os valores dos limites de resistência à tração dos CPs foram obtidos ao encontrar os valores máximos da tensão durante todo o intervalo do teste. A Tabela 6 e a Figura 33 apresentam os valores médios do limite de resistência à tração encontrados para as sete configurações e seus respectivos desvios padrão. Os valores do resultado do ensaio mecânico de tração do corpo de prova 2 da Amostra 2 ($0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ$, sem adição de fibras curtas) foi suprimido pois seu ensaio apresentou uma grande variação (superior a 50% da média dos demais corpos de prova).

Tabela 6 – Média das tensões máximas (MPa) dos compósitos produzidos.

Amostra	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Nº de Corpos de Prova	Limite Superior (MPa)	Limite Inferior (MPa)
Amostra 1	43,47	3,79	5	47,39	39,75
Amostra 2	43,73	2,40	4	46,25	40,52
Amostra 3	53,44	4,08	5	58,86	48,11
Amostra 4	53,47	10,39	5	66,48	38,06
Amostra 5	36,41	4,79	5	42,12	29,03
Amostra 6	30,29	6,51	5	36,41	20,80
Amostra 7	30,38	1,42	5	32,72	28,83

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 33 – Limite de resistência à tração (MPa) das amostras e seus respectivos desvios padrão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A análise da Figura 33 mostra que a adição de fibra curta teve pouco impacto na resistência máxima dos compósitos produzidos, com exceção da Amostra 5, que apresentou um valor de 36,41 MPa com a adição de fibras curtas quando comparado a Amostra 6 (30,29 MPa), um aumento de cerca de 20% no limite de resistência à tração. O incremento no limite de resistência à tração apresentado na Amostra 5 com a adição de fibras curtas difere dos resultados apresentados nas demais amostras, pois o esperado era um valor mais próximo

entre as Amostras 5 e 6. Dentre os fatores que podem explicar essa disparidade, pode-se citar a variabilidade natural das propriedades das fibras e, conseqüentemente, dos corpos de prova. Também é importante observar que quando avaliados os valores obtidos com seus respectivos desvios padrão, os resultados se sobrepõem.

Quando analisado o desvio-padrão das amostras, com exceção da Amostra 2, tem-se que a adição de fibras curtas diminuiu a variação dos valores de resistência à tração, fato este explicado pela melhor distribuição das tensões e forças internas com a presença das fibras curtas. Os resultados mostram que as fibras contínuas, presentes nas Amostras 1 a 6 atuaram aumentando o limite de resistência à tração quando comparadas a Amostra 7, que continha apenas fibras curtas. As Amostras 3 e 4 apresentaram a maior resistência à tração dentre todas as amostras, 53,44 e 53,47 MPa, respectivamente, cerca de 76% maior que o apresentado pela Amostra 7, que obteve um valor de 30,38 MPa.

Os resultados obtidos para o limite de resistência à tração dos compósitos produzidos são condizentes com o esperado, uma vez que as fibras possuem maior resistência à tração na direção longitudinal. As Amostras 3 e 4 possuem três camadas de fibras alinhadas com a direção de tração uniaxial do teste, enquanto que as Amostras 1 e 2 possuem duas camadas e as Amostras 5 e 6 apenas uma camada. Zuccarello; Militello e Bongiorno (2021) obtiveram resultados similares quando as fibras não estavam alinhadas com o eixo de tração, sendo que o valor do limite de resistência à tração diminuiu de 200 MPa para 20% de volume de fibra para apenas 18 MPa quando o sentido de tração do ensaio mudou de longitudinal para transversal à direção das fibras, enquanto que de 470 MPa para 70% de volume de fibra no sentido longitudinal para apenas 5 MPa no sentido transversal.

Da mesma forma que ocorreu no trabalho de Zuccarello; Militello e Bongiorno (2021), as fibras não alinhadas com o sentido longitudinal de tração acabaram prejudicando a capacidade do compósito suportar a carga. Segundo os autores, isso se justifica pelo fato das fibras não alinhadas se comportarem como vazios, pois as fibras não possuem resistência à tração no sentido transversal, e acabam por se romper na presença de uma força na direção perpendicular ou diagonal ao sentido longitudinal.

Nesse sentido, quando analisado o comportamento da Amostra 7, contendo apenas fibras curtas, o efeito das fibras curtas presentes nas direções transversal e diagonal acaba por anular a possível vantagem que as fibras curtas alinhadas no sentido longitudinal produzem, resultando em um valor do limite de resistência à tração próximo ao valor da resina epóxi sem fibras (entre 20,6 e 42,7 MPa, de acordo com os dados do fabricante). Mortazavian e Fatemi

(2015) chegaram à conclusão de que as fibras curtas não alinhadas com a direção longitudinal de tração reduzem os valores do limite de resistência à tração suportada pelos corpos de prova. Assim, as fibras curtas acabam por apresentar um comportamento de material de preenchimento e não de reforço.

4.2.2 Alongamento percentual máximo

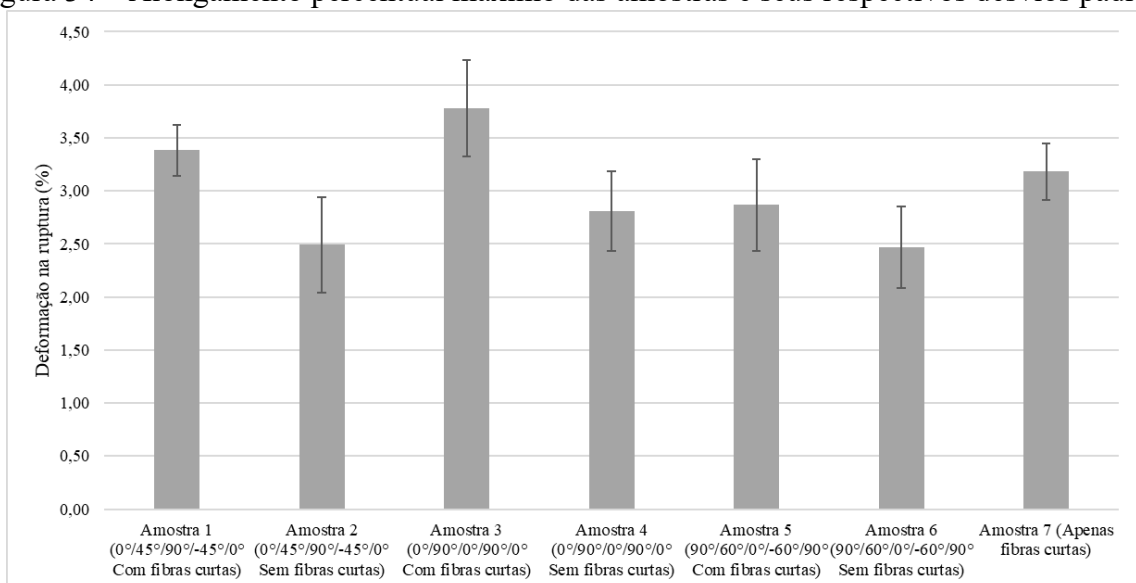
O alongamento percentual máximo fornece o alongamento da amostra no ponto de ruptura, ou seja, qual foi o valor máximo do alongamento percentual que a amostra suportou antes de romper (GARCIA; ALVARES SPIM, 2000). A Tabela 7 e a Figura 34 apresentam os valores encontrados para o alongamento percentual máximo para as sete amostras.

Tabela 7 – Média das deformações máximas (%) dos compósitos produzidos.

Amostra	Alongamento percentual máximo (%)	Desvio Padrão (%)	Nº de Corpos de Prova	Limite Superior (%)	Limite Inferior (%)
Amostra 1	3,38	0,24	5	3,56	2,97
Amostra 2	2,49	0,45	4	3,04	2,05
Amostra 3	3,78	0,45	5	4,30	3,10
Amostra 4	2,81	0,38	5	3,16	2,21
Amostra 5	2,87	0,43	5	3,23	2,15
Amostra 6	2,47	0,39	5	2,79	1,89
Amostra 7	3,18	0,26	5	3,55	2,92

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 34 – Alongamento percentual máximo das amostras e seus respectivos desvios padrão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A análise dos dados apresentados mostra um aumento na deformação de ruptura com a adição de fibras curtas, para todos os casos. A Amostra 1 obteve um alongamento percentual máximo de 3,4% enquanto que a Amostra 2, 2,5%, um incremento no alongamento percentual máximo de cerca de 35,7%. Já a Amostra 3 obteve um alongamento percentual máximo de 3,8% enquanto que a Amostra 4 2,8%, um incremento de 34,5% e a Amostra 5 obteve um alongamento percentual máximo de 2,9% enquanto que a Amostra 6, 2,5%, um incremento de 16,2%, com a inclusão das fibras curtas. As fibras curtas agiram permitindo maiores deslocamentos dos corpos de prova antes de virem a fraturar. Também é possível observar que a Amostra 3, contendo três camadas de fibras contínuas alinhadas no sentido de tração uniaxial, foi a que mais se deformou antes de vir a fraturar (3,8%), cerca de 53% maior que a Amostra 6 que apresentou a menor deformação (2,5%). Mortazavian; Fatemi (2015) mostraram que à medida que uma maior quantidade de fibras não alinhadas à direção de carregamento aumenta, a fratura é dominada pela matriz e pelas propriedades interfaciais, portanto a deformação da matriz acaba por ser mais dominante nestes casos. Quando as fibras estão alinhadas à direção do carregamento, as propriedades mecânicas são ditadas pelas propriedades das fibras, enquanto que quando as fibras não estão alinhadas com a direção de carregamento, as propriedades mecânicas do compósito são dependentes das propriedades da matriz, principalmente em relação a sua rigidez e resistência à tração, que dependem fortemente da sua porosidade (BAGHAEI et al., 2014).

A presença de fibras curtas aleatórias nas Amostras 1, 3, 5 e 7 provoca efeito semelhante, justificando seus valores maiores que quando comparado as amostras sem as fibras curtas.

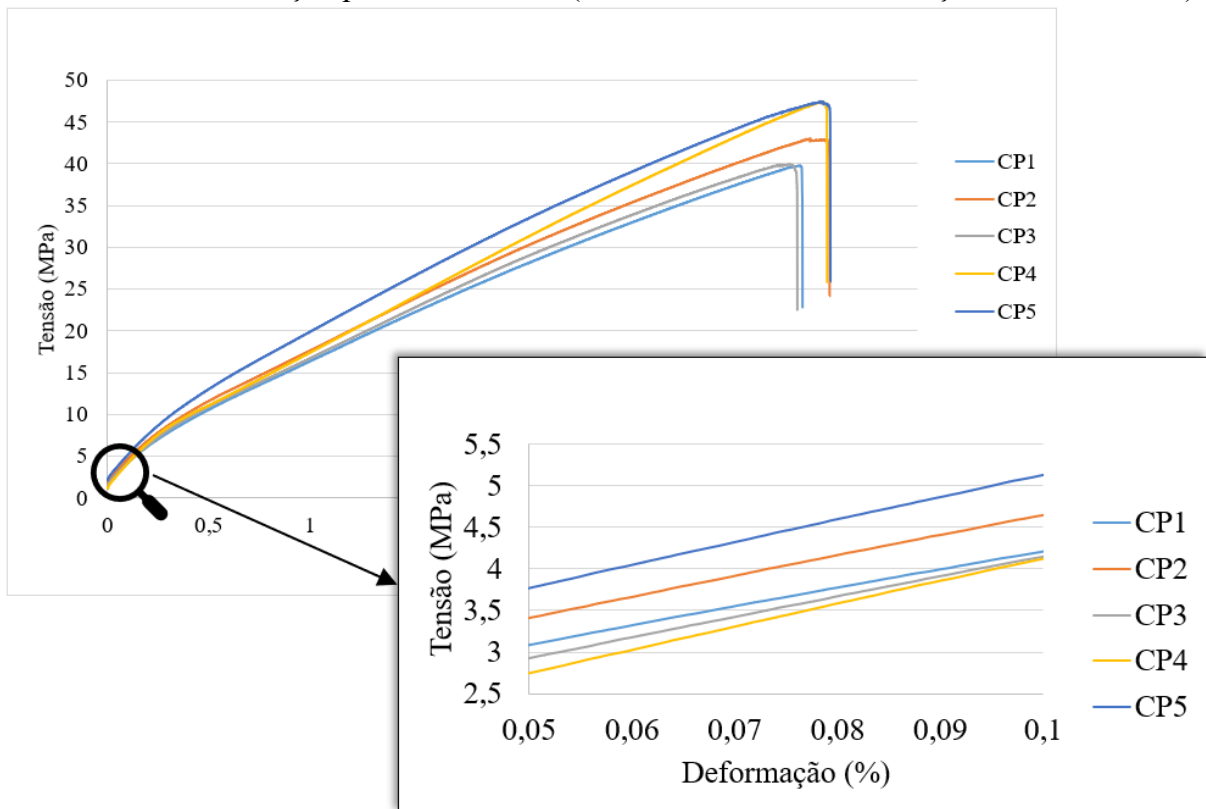
4.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade fornece uma indicação da rigidez do material e depende principalmente das forças internas dos materiais. O módulo de elasticidade (também conhecido como módulo de Young), define a relação entre a tensão e a deformação em um material quando este se encontra no regime elástico (GARCIA; ALVARES SPIM, 2000).

O módulo de elasticidade foi calculado para todos os corpos de prova através dos valores obtidos no ensaio mecânico de tração. Os valores foram obtidos dividindo a diferença das tensões entre os intervalos de 0,05% e 0,10% da deformação, região linear da curva tensão-deformação, como pode ser observado na Figura 35 para a condição da Amostra 1

($90^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ$, com adição de fibras curtas). A máquina de ensaios não possuía um extensômetro acoplado as amostras, logo, os valores obtidos possuem um erro associado devido a rigidez dos elementos estruturais da máquina, no entanto, por possuírem uma rigidez muito maior quando comparado a rigidez dos materiais ensaiados, o erro acaba por ser de pequena grandeza.

Figura 35 – Região de cálculo do módulo de elasticidade entre 0,05% e 0,10% a partir da curva tensão-deformação para a Amostra 1 ($0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ$, com adição de fibras curtas).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

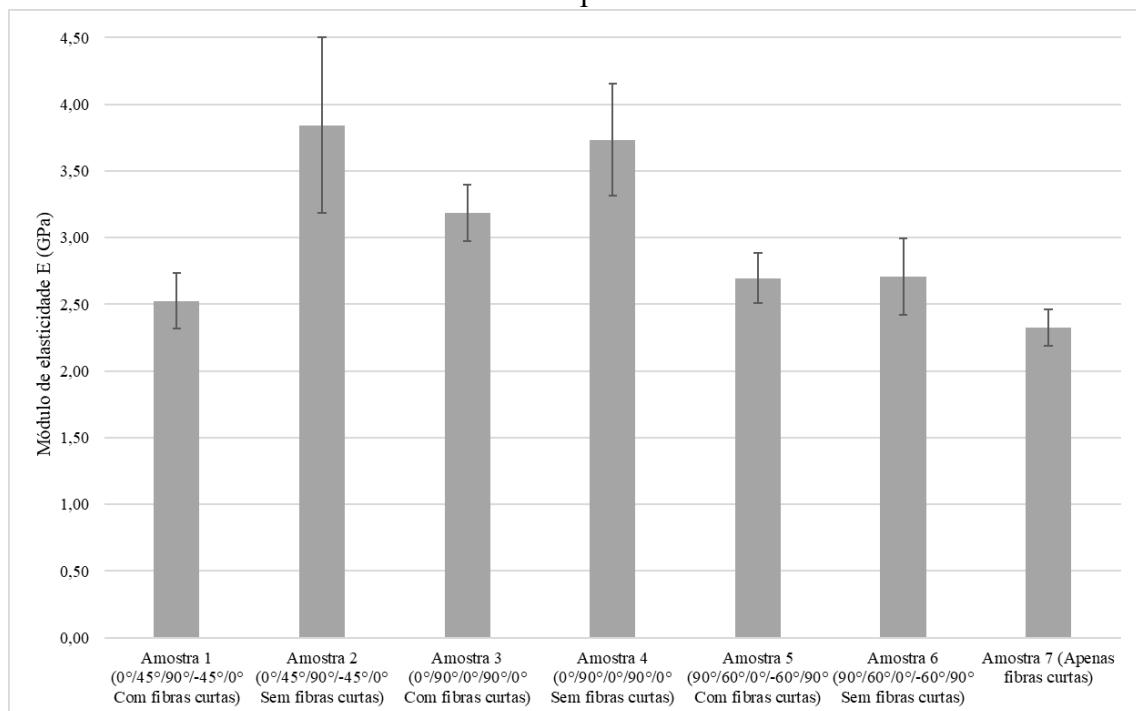
A Tabela 8 e a Figura 36 apresentam os valores dos módulos de elasticidade calculados para as sete amostras, bem como os valores dos desvios padrão.

Tabela 8 – Média dos módulos de elasticidade (GPa) dos compósitos produzidos.

Amostra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Nº de Corpos de Prova	Limite Superior (GPa)	Limite Inferior (GPa)
Amostra 1	2,52	0,21	5	2,75	2,25
Amostra 2	3,84	0,66	5	4,98	3,29
Amostra 3	3,19	0,21	5	3,42	2,93
Amostra 4	3,73	0,42	5	4,37	3,21
Amostra 5	2,70	0,19	5	2,99	2,53
Amostra 6	2,71	0,29	5	2,96	2,26
Amostra 7	2,32	0,14	5	2,46	2,11

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 36 – Valores dos módulos de elasticidade (GPa) das amostras e seus respectivos desvios padrão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A análise dos dados apresentados mostra que, em geral, os valores dos módulos de elasticidade diminuíram com a adição das fibras curtas, tendo a Amostra 7 apresentado o menor valor entre todas as amostras (2,32 GPa), justamente a que possuía apenas fibras curtas.

A Amostra 2 apresentou o maior módulo de elasticidade (3,84 GPa), cerca de 65,5% maior que a Amostra 7, que apresentou o menor módulo de elasticidade (2,32 GPa). A adição de fibras curtas reduziu o módulo de elasticidade da Amostra 1 (2,52 GPa) quando comparado à Amostra 2 (3,84 GPa) em cerca de 34,4%, enquanto para a Amostra 3 (3,19 GPa) em relação à Amostra 4 (3,73 GPa), a redução foi de cerca de 14,5%, e, para a Amostra 5 em relação a Amostra 6, a redução foi praticamente nula, cerca de 0,4%, o que pode ser explicado pelo fato destas terem a maior quantidade de camadas de fibras contínuas não alinhadas à direção de carregamento, ou seja, as propriedades das Amostras 5 e 6 já eram ditadas pelas propriedades da matriz e não das fibras contínuas, com a adição das fibras curtas não orientadas, não houve mudança nessa configuração.

De uma forma geral, a adição de fibra curta tornou os compósitos menos rígidos devido à maior dependência das propriedades da matriz, que ocorre quando as fibras não estão alinhadas ao sentido de aplicação da carga.

Analisando os resultados dos testes chega-se à conclusão de que as Amostras 3 e 4 apresentaram os melhores resultados quanto ao limite de resistência à tração suportado, cerca de 53 MPa e as Amostras 6 e 7 os piores resultados, cerca de 30 MPa.

Alves (2019) produziu compósitos de fibra de vidro contínuas em resina poliéster e estudou o comportamento das amostras ao variar o ângulo das fibras em relação a direção de aplicação de carga. Os maiores valores para o limite de resistência à tração encontrados foram justamente com as fibras alinhadas à direção de carregamento, porém nas direções de 30° e 45°, obtendo valores de 51,2 MPa e 31,42 MPa, respectivamente, valores estes menores que os encontrados no presente trabalho com a utilização somente de fibras naturais de sisal para as Amostras 3 e 4.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi a produção de compósitos de epóxi reforçados com fibra de sisal e sua posterior caracterização mecânica das propriedades mecânicas de limite de resistência à tração, alongamento percentual máximo e módulo de elasticidade.

Para permitir a confecção das amostras de compósito foi necessário o projeto e fabricação de um molde capaz de conter as fibras e a resina com posterior prensagem. O molde foi fabricado em aço com a aplicação de técnicas de soldagem MIG/MAG, bem como técnicas de fabricação mecânica.

Foram avaliadas a configuração das camadas de fibras alinhadas e contínuas e com ou sem adição de fibras curtas. A adição de fibras curtas às amostras aumentou o alongamento percentual máximo suportado pelos corpos de prova, porém, conseqüentemente, reduziu o módulo de elasticidade. As fibras curtas adicionadas agiram distribuindo as tensões internas, fazendo com que as propriedades mecânicas fossem determinadas pelo material da matriz e não das fibras contínuas, permitindo um maior alongamento dos corpos de prova antes da fratura.

O alinhamento das camadas de fibras contínuas mostrou-se de grande importância para os resultados dos testes, principalmente quanto ao limite de resistência à tração suportado pelos corpos de prova. As fibras de sisal possuem sua maior resistência à tração no sentido longitudinal, logo, os corpos de prova contendo maiores quantidades de camadas de fibras contínuas alinhadas à direção de tração uniaxial foram os que suportaram as maiores cargas durante o ensaio.

As amostras contendo as camadas nas direções $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ apresentaram os maiores valores de limite de resistência à tração, 53,4 MPa, resultado esperado uma vez que estas amostras possuem a maior quantidade de camadas compostas de fibras contínuas alinhadas ao sentido longitudinal de carregamento. A maior deformação ocorreu com as contendo as camadas nas direções $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$ e $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ$, com valores de 3,78% e 3,38% respectivamente, ambas com a presença de fibras curtas. Em relação ao módulo de elasticidade, as amostras contendo as camadas nas direções $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ$ e $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$, apresentaram os maiores valores, 3,84 e 3,73 GPa, respectivamente, ambas sem adição de fibras curtas e com maiores quantidades de camadas de fibras contínuas alinhadas à direção longitudinal de carregamento, resultado esse explicado pelo fato de que

nessa condição as propriedades mecânicas do compósito são ditadas pelas propriedades das fibras.

Pode-se concluir que os compósitos obtidos com a utilização de fibras naturais de sisal possuem uma resistência mecânica considerável quando aplicados em uma condição em que o carregamento principal está alinhado com a direção longitudinal das fibras. Porém, quando a carga aplicada acontece de forma transversal, essa resistência é bastante reduzida, como pôde ser visto nas amostras ensaiadas com menor quantidade de camadas alinhadas com a direção longitudinal de tração.

Logo, pode-se chegar à conclusão de que as fibras naturais de sisal podem ser uma alternativa às fibras de vidro em situações em que os valores das cargas aplicadas não sejam elevados e não exista uma direção de carga predominante.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de materiais compósitos contendo fibras naturais está permitindo sua utilização em uma grande variedade de aplicações. Assim, mais estudos devem ser realizados utilizando fibras naturais. Assim, os tópicos seguintes apresentam sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Investigar a região de fratura com a utilização de Microscopia Eletrônica de Varredura;
- Investigar a resistência mecânica de compósitos híbridos com fibra de sisal e outros tipos de fibras, naturais ou sintéticas;
- Estudar a degradação dos materiais da matriz e das fibras quando expostos às intempéries.
- Avaliar a influência de um pré-tensionamento das fibras antes da imersão na resina quanto às propriedades mecânicas dos compósitos produzidos.

REFERÊNCIAS

- AKCELRUD, L. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. 1ª ed. Barueri: Manole, 2007.
- AL-QURESHI, H. A. **Materiais compostos: análises e fabricação**. **Centro de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville**, 2010.
- ALVES, F. L. **Análise da influência da orientação do ângulo de fibra na resistência à tração do compósito laminado de fibra de vidro e resina poliéster**. Russas: Universidade Federal do Ceará, 2019.
- ALVES FIDELIS, M. E. et al. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, n. 2, p. 149–157, 2013.
- ASHBY, M. F. **Materials selection in mechanical design.: Kidlington**. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, cop, , 2011.
- ASHRAF, M. A. et al. Jute based bio and hybrid composites and their applications. **Fibers**, v. 7, n. 9, p. 77, 2019.
- BASF. **Plant-based weight loss tips for interior composite panels**. Disponível em: <<https://insights.basf.com/home/article/read/plant-based-weight-loss-tips-for-interior-composite-panels>>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- BEKELE, A. E.; LEMU, H. G.; JIRU, M. G. Experimental study of physical, chemical and mechanical properties of enset and sisal fibers. **Polymer Testing**, v. 106, 1 fev. 2022a.
- BEKELE, A. E.; LEMU, H. G.; JIRU, M. G. Exploration of Mechanical Properties of Enset–Sisal Hybrid Polymer Composite. **Fibers**, v. 10, n. 2, 1 fev. 2022b.
- BISANDA, E. T. N. **The Effect of Alkali Treatment on the Adhesion Characteristics of Sisal Fibres Applied Composite Materials**. [s.l: s.n.].
- BROWN, I.; ASKELAND, D. R. **The Science and Engineering of Materials 2nd Edition**. [s.l: s.n.].
- BRUNDTLAND, G. H.; COMUM, N. F. Relatório Brundtland. **Our Common Future: United Nations**, 1987.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 10º ed. Hoboken, NJ: Wiley New York, 2018. v. 9
- CAMPILHO, R. D. S. G. **Natural fiber composites**. [s.l.] CRC Press, 2015.
- CAVALCANTI, D. K. K. et al. Mechanical characterization of intralaminar natural fibre-reinforced hybrid composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 175, 15 out. 2019.

CHAWLA, K. K. **Composite materials: science and engineering**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2012.

CLYNE, T. W.; HULL, D. **An Introduction to Composite Materials**. 3° ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2019.

DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 43, n. 8, p. 1419–1429, 2012.

EMBRAPA. Cultivo do Sisal no Nordeste Brasileiro. **Circular Técnica**, v. 123, p. 1–24, 2008.

FARUK, O. et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

GARCIA, AMAURI.; ALVARES SPIM, JAIME. **Ensaio dos materiais (2a. ed.)**. [s.l.] Grupo Gen - LTC, 2000.

GIBSON, R. F. **Principles of composite material mechanics**. [s.l.] CRC press, 2016.

H.A.AL-QURESHI. **The use of banana fibre reinforced composites for the development of a truck body**. 2nd International Wood and Natural Fibre Composites Symposium Kassel, 28 jun. 1999.

JOSEPH, K. et al. a Review on Sisal Fiber Reinforced Polymer Composites. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 367–379, 1999.

KABIR, M. M. et al. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 7, p. 2883–2892, out. 2012.

KITHIA, M. W.; MUNYASI, M. D.; MUTULI, M. S. Strength Properties of Surface Modified Kenyan Sisal Fibres. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 6, p. 2277–2287, 2022.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design**. [s.l.] CRC press, 2007.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites : materials, manufacturing, and design**. p. 619, 2008.

MORTAZAVIAN, S.; FATEMI, A. Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 72, p. 116–129, 2015.

NABI SAHEB, D.; JOG, J. P. Natural fiber polymer composites: A review. **Advances in Polymer Technology**, v. 18, n. 4, p. 351–363, 1999.

NAVEEN, J. et al. **Mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiber-reinforced polymer composites**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2018.

OYEN, L. P. A. **Agave sisalana**. Disponível em: <<https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?h=M27&t=Agave,sisalanae,perrine&p=Agave+sisalana#OtherReferences>>. Acesso em: 27 jul. 2020.

PARAMESWARANPILLAI, J. et al. Bio-based epoxy polymers, blends and composites : synthesis, properties, characterization and applications. p. 378, 2021.

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. **A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** Elsevier Ltd, , 1 abr. 2016.

RANGAPPA, S. et al. Handbook of Epoxy/Fiber Composites. **Handbook of Epoxy/Fiber Composites**, 2022.

ROBLEDO-ORTÍZ, J. R. et al. Improving the Compatibility and Mechanical Properties of Natural Fibers/Green Polyethylene Biocomposites Produced by Rotational Molding. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 3, p. 1040–1049, 2020.

ROMÃO, C. M. N. Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais. **FEUP**, 2003.

SANJAY, M. R. et al. Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. **Natural Resources**, v. 07, n. 03, p. 108–114, 2016.

SENTHILKUMAR, K. et al. Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 713–729, 2018.

SHALWAN, A.; YOUSIF, B. F. In state of art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres. **Materials and Design**, v. 48, p. 14–24, 2013.

SINITSKY, O.; TRABELSI, N.; PRIEL, E. The Mechanical Response of Epoxy–Sisal Composites Considering Fiber Anisotropy: A Computational and Experimental Study. **Fibers**, v. 10, n. 5, p. 43, 15 maio 2022.

SOUZANDEH, H.; NETRAVALI, A. N. Study and Characterization of Sisal Fiber/Zein Resin Interface. **Reviews of Adhesion and Adhesives**, p. 1–19, 2018.

TESINOVA, P. **Advances in Composite Materials: Analysis of Natural and Man-Made Materials**. [s.l.] BoD–Books on Demand, 2011.

TORRES, F. G.; RODRIGUEZ, S.; SAAVEDRA, A. C. Green Composite Materials from Biopolymers Reinforced with Agroforestry Waste. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, n. 12, p. 2651–2673, 2019.

VALADEZ-GONZALEZ, A. et al. Effect of fiber surface treatment on the fiber–matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 30, n. 3, p. 309–320, abr. 1999.

VIGNESHWARAN, S. et al. **Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review**. **Journal of Cleaner Production** Elsevier Ltd, , 20 dez. 2020.

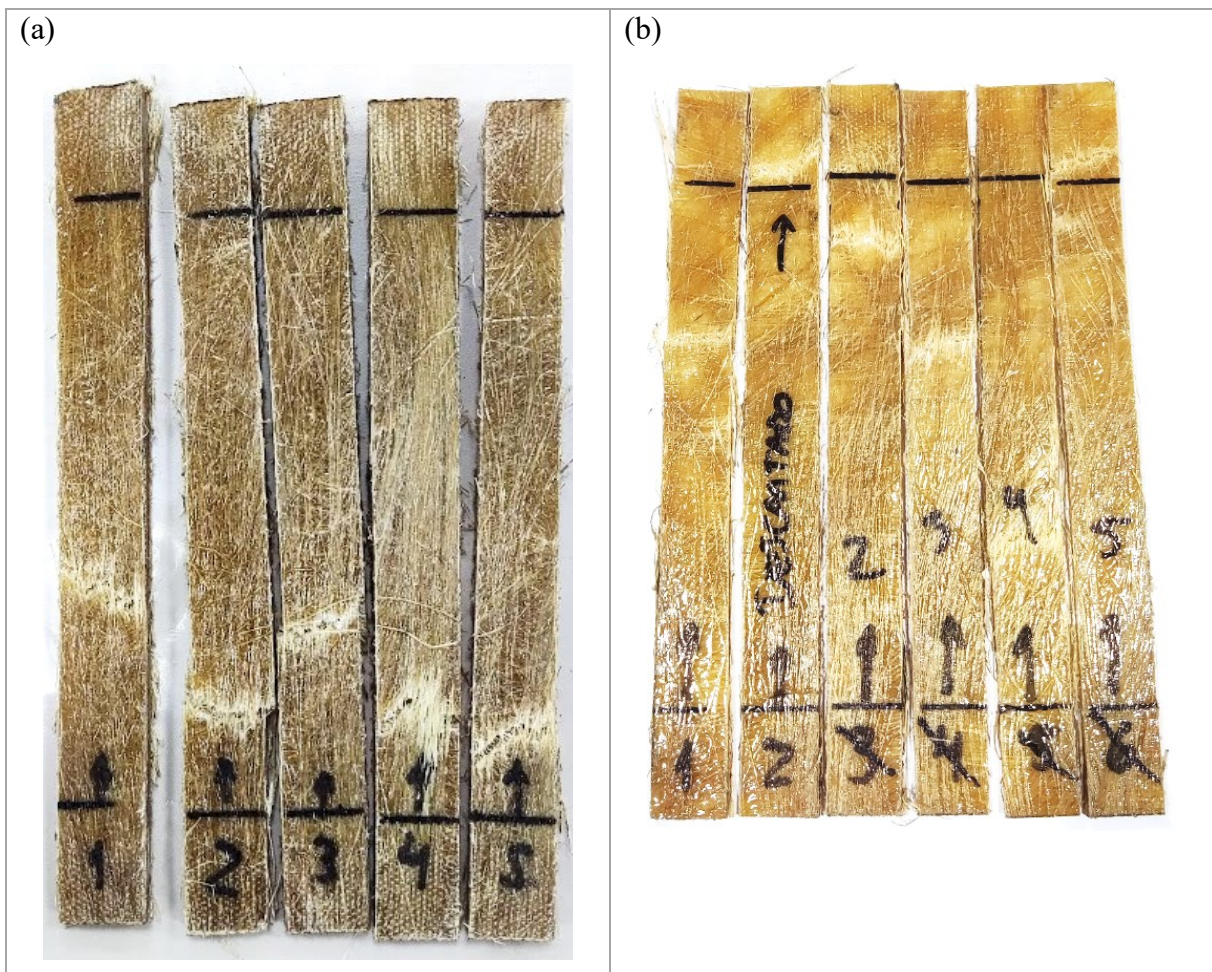
WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 9, p. 1259–1264, 2003.

ZUCCARELLO, B.; MILITELLO, C.; BONGIORNO, F. Influence of the anisotropy of sisal fibers on the mechanical properties of high performance unidirectional biocomposite lamina and micromechanical models. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 143, 1 abr. 2021.

APÊNDICE A – CORPOS DE PROVA FRATURADOS

As imagens das figuras do Apêndice A mostram os corpos de prova após o teste de tração, em que é possível verificar o local da fratura no corpo de prova.

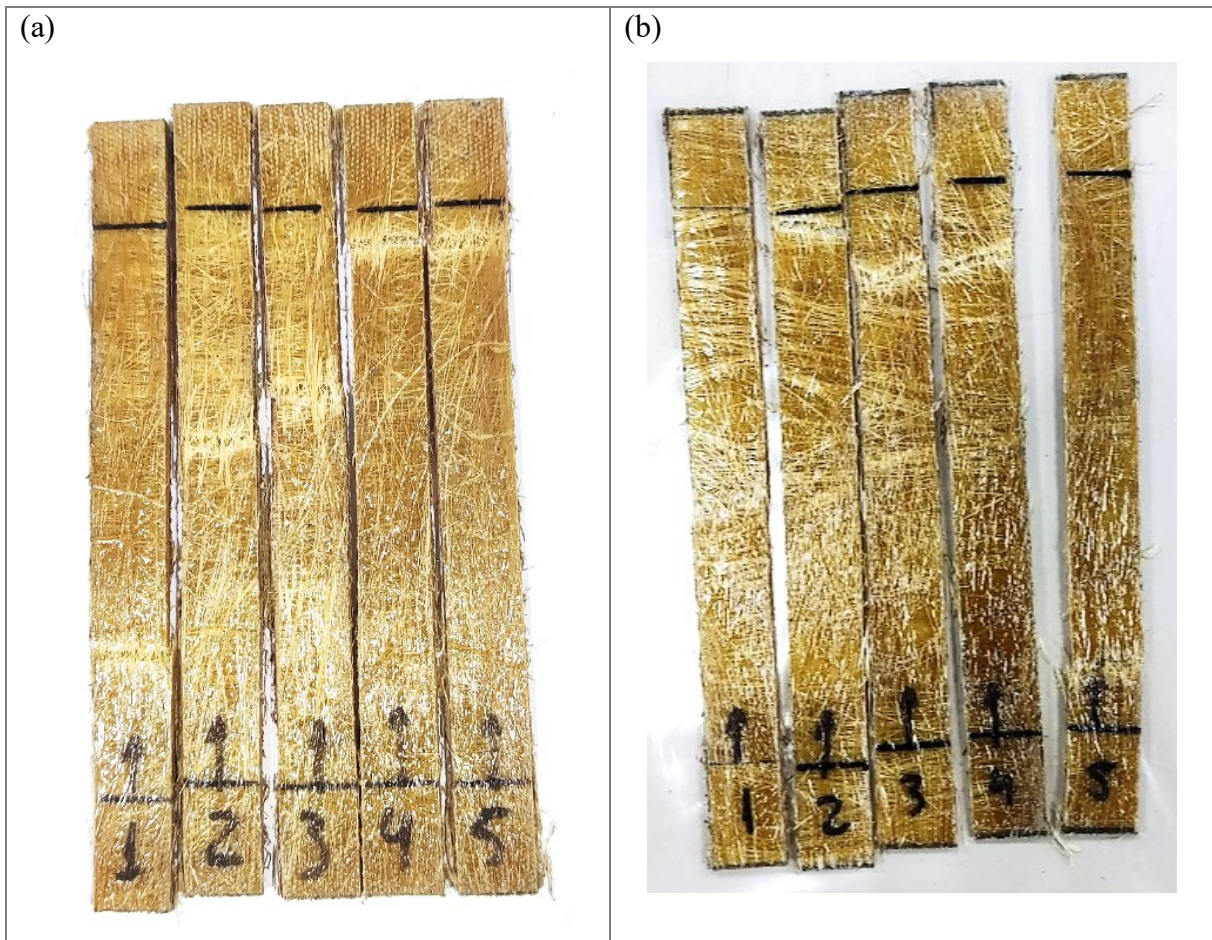
Figura A-1 – Corpos de prova fraturados (a) Amostra 1 ($0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}$, com adição de fibras curtas) e (b) Amostra 2 ($0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}$, sem adição de fibras curtas).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

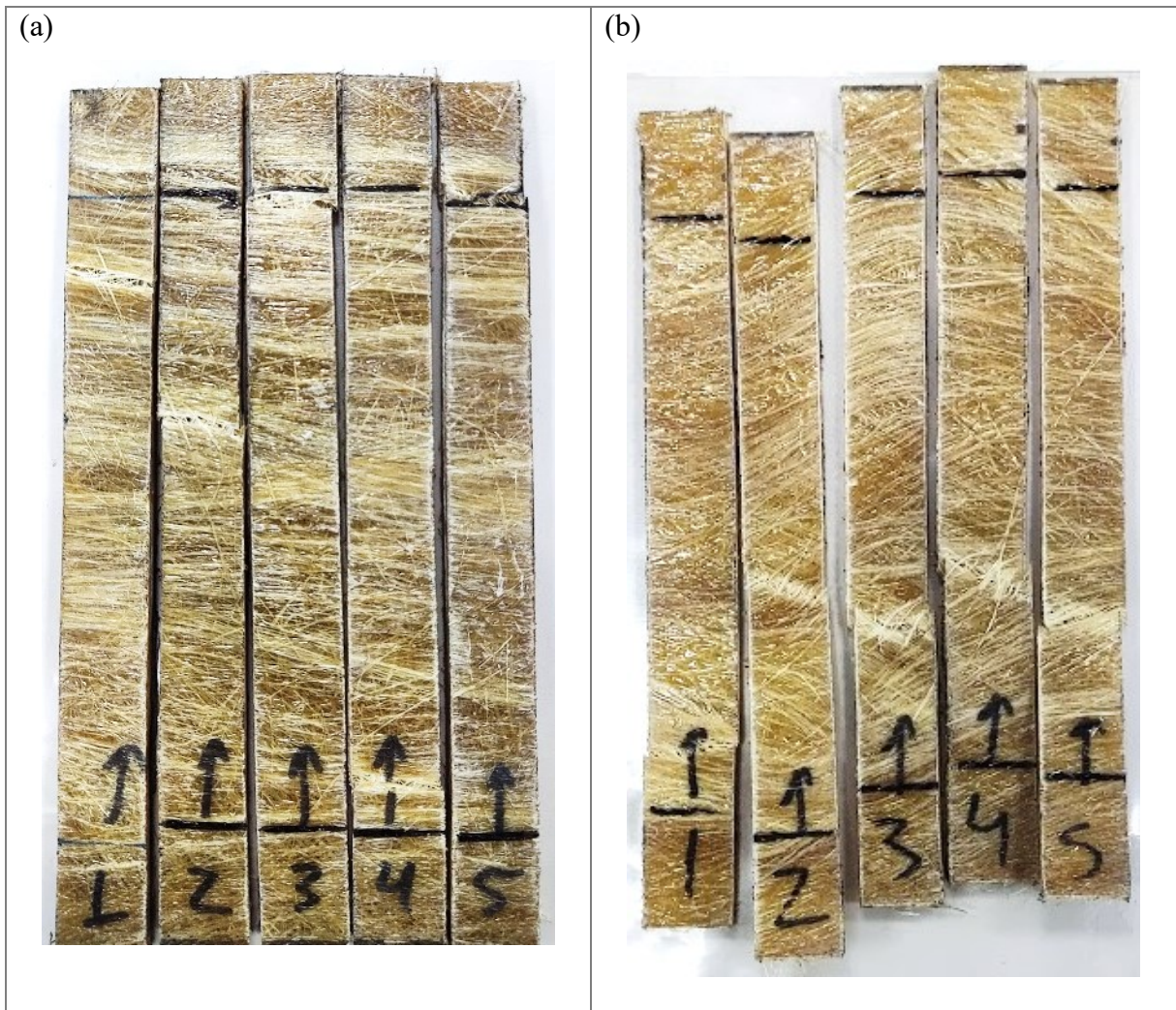
O segundo corpo de prova de testes da Amostra 2 foi descartado, pois apresentou um comportamento anormal durante o teste devido a fratura ter ocorrido sob a garra superior da máquina de ensaios. O corpo de prova 5, apesar de também ter sofrido a fratura na região da garra superior, não apresentou comportamento anormal e por isso não foi descartado.

Figura A-2 – Corpos de prova fraturados (a) Amostra 3 ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$, com adição de fibras curtas) e (b) Amostra 4 ($0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$, sem adição de fibras curtas).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura A-3 – Corpos de prova fraturados (a) Amostra 5 ($90^\circ/60^\circ/0^\circ/-60^\circ/90^\circ$, com adição de fibras curtas) e (b) Amostra 6 ($90^\circ/60^\circ/0^\circ/-60^\circ/90^\circ$, sem adição de fibras curtas).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura A-4 – Corpos de prova fraturados da Amostra 7 (apenas fibras curtas).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)