

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

DAYSIANE DA SILVA MOREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR
FIBRAS DE LINHO PRODUZIDOS VIA MANUFATURA ADITIVA.**

**RIO DE JANEIRO
2024**

DAYSIANE DA SILVA MOREIRA

CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS
POR FIBRAS DE LINHO PRODUZIDOS VIA MANUFATURA ADITIVA.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Ciência dos materiais do Instituto Militar de Engenharia,
como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre
em Ciências em Ciência dos materiais.

Orientador(es): Lucio Fabio Cassiano Nascimento, D.C.

Rio de Janeiro

2024

©2024

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

da Silva Moreira, Daysiane.

Caracterização de compósitos poliméricos reforçados por fibras de linho produzidos via manufatura aditiva. / Daysiane da Silva Moreira. – Rio de Janeiro, 2024.

76 f.

Orientador(es): Lucio Fabio Cassiano Nascimento.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Ciência dos materiais, 2024.

1. Manufatura aditiva. 2. Fibra de linho. 3. DLP. i. Cassiano Nascimento, Lucio Fabio (orient.) ii. Título

DAYSIANE DA SILVA MOREIRA

**Caracterização de compósitos poliméricos reforçados por
fibras de linho produzidos via manufatura aditiva.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Ciência dos materiais.

Orientador(es): Lucio Fabio Cassiano Nascimento.

Aprovada em 20 de fevereiro de 2024, pela seguinte banca examinadora:

Prof. **Lucio Fabio Cassiano Nascimento** - D.Sc.do IME - Presidente

Prof. **Sergio Neves Monteiro** - Ph.D. do IME

Prof^ª. **Talita Gama de Sousa** - D.Sc. do IME

Prof. **Fábio da Costa Garcia Filho** - D.Sc. do Centro Federal de Educação
Tecnológica (CEFET/RJ)

Prof^ª. **Daniele Cruz Bastos** - D.Sc. da Universidade do Estado do Rio de
Janeiro (UERJ)

Rio de Janeiro

2024

*Este trabalho é dedicado à todos que participaram deste processo
e que contribuíram com meu crescimento.*

*“O Senhor é meu pastor,
nada me faltará.”’
(Bíblia Sagrada, Salmos 23,)*

RESUMO

A MA (manufatura aditiva) é uma tecnologia em ascensão com grande potencial de se tornar uma das principais metodologias de fabricação no futuro. Existem diferentes tecnologias, materiais e áreas de aplicação, cada uma com seus próprios requisitos específicos. A MA por DLP (digital light processing), processamento digital de luz, tem se destacado pela facilidade de operação, rapidez na impressão e qualidade de acabamento refinado. A MA é capaz de revolucionar processos produtivos e alterar as estratégias de produção atuais, possibilitando sua utilização em várias áreas da indústria, médica, odontológica, automobilística e na fabricação de acessórios para proteção balística. As tecnologias de manufatura aditiva estão cada vez mais presentes na fabricação de peças com formas complexas e precisão milimétrica. É uma classe de processos de produção em constante crescimento, com aplicações em diversas áreas e cadeias produtivas. Sua flexibilidade para produzir em baixos lotes e sua capacidade de trabalhar com materiais e geometrias complexas a tornam uma tecnologia capaz de revolucionar processos produtivos e alterar as estratégias de produção atuais. Na área de proteção balística, se almeja que a MA possa favorecer a fabricação de acessórios capazes de conferir proteção para automóveis e usuários como, por exemplo, coletes e capacetes personalizados. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de um compósito polimérico reforçado com fibras de linho fabricado por manufatura aditiva para verificar a viabilidade do desenvolvimento desses materiais para blindagem balística.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Fibra de linho. DLP.

ABSTRACT

AM (additive manufacturing) is a rising technology with great potential to become one of the key manufacturing methodologies in the future. There are different technologies, materials and application areas, each with their own specific requirements. AM by DLP (digital light processing stereolithography) has stood out for its ease of operation, speed of printing and refined finish quality. AM is capable of revolutionizing production processes and changing current production strategies, enabling its use in various areas of industry, medical, dental, automotive and in the manufacture of accessories for ballistic protection. Additive manufacturing technologies are increasingly present in the manufacture of parts with complex shapes and millimeter precision. It is a constantly growing class of production processes, with applications in various areas and production chains. Its flexibility to produce in low batches and its ability to work with complex materials and geometries make it a technology capable of revolutionizing production processes and changing current production strategies. In the area of ballistic protection, it is hoped that MAM can favor the manufacture of accessories capable of providing protection for cars and users, such as personalized vests and helmets. The objective of this work is to analyze the behavior of a polymer composite reinforced with flax fibers manufactured by additive manufacturing to verify the feasibility of developing these materials for ballistic armor.

Keywords: Additive manufacturing. Fiber flax. DLP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Representação das principais etapas do processo de AM ou impressão 3D | 19 |
| Figura 2 – Volume gerado com superfícies não conectadas e conectadas. | 20 |
| Figura 3 – Modelagem de sólido não conectado e sólido único | 20 |
| Figura 4 – Exemplo da imagem na tela de um computador de um modelo STL. . . | 21 |
| Figura 5 – Regra da mão direita para a orientação do vetor normal. | 22 |
| Figura 6 – Configuração de triângulos em STL válida e inválida. | 22 |
| Figura 7 – Exemplo de imagem de um modelo fatiado. | 23 |
| Figura 8 – Principais processos de MA por Fotopolimerização em cuba. | 25 |
| Figura 9 – Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policloreto de vinila (PVC) | 27 |
| Figura 10 – Aquecimento de polímeros termoplásticos e termorrígidos | 28 |
| Figura 11 – Classificação das fibras Naturais | 29 |
| Figura 12 – Estrutura química de (a) celulose (b) hemiceluloses e (c) lignina. | 30 |
| Figura 13 – Estrutura de fibra natural. | 31 |
| Figura 14 – Fragmento de bandagem de mumia feito de linho e decoradas com um capítulo do livro livro dos mortos. | 34 |
| Figura 15 – Rótulo da Figura, descrevendo a figura | 34 |
| Figura 16 – Linho no processo de maceração | 35 |
| Figura 17 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos | 37 |
| Figura 18 – Gráfico Tensão-deformação de um compósito | 39 |
| Figura 19 – Tecido de linho como recebido, em processo de desfiamento e linhas desfiadas. | 41 |
| Figura 20 – Processo de preparo das fibras de linho | 42 |
| Figura 21 – Fibras no processo de moagem e as fibras algumas horas após a moagem. | 42 |
| Figura 22 – Fibras no processo de peneiração | 43 |
| Figura 23 – Encorporação da Fibra à resina | 44 |
| Figura 24 – Fotopolímero utilizado na MA | 45 |
| Figura 25 – Modelos digitais das amostras obtidas através do software AutoCAD®. Corpo de prova de tração | 46 |
| Figura 26 – Modelos digitais para conversão no software Fusion 360®. Corpo de prova de tração | 46 |
| Figura 27 – Utilização do Software LycheeSilicer® para realizar o fatiamento dos projetos das amostras. Corpos de prova de tração. | 47 |
| Figura 28 – Impressora 3D utilizada para fabricação das amostras. | 48 |
| Figura 29 – Geometria adotada para produção dos corpos de prova. | 49 |
| Figura 30 – Impressão recém finalizada (A) e (B), amostras em banho de luz UV (C). | 49 |
| Figura 31 – Geometria adotada para produção dos corpos de prova impacto. | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 32 – Corpos de prova para ensaio de impacto compósito 2% de fibra de linho. | 52 |
| Figura 33 – Geometria adotada para produção dos corpos de prova Flexão. | 52 |
| Figura 34 – Amostras para ensaio de flexão. | 53 |
| Figura 35 – Amostras dos compósitos cominuídas para TGA e DSC. | 53 |
| Figura 36 – Amostra do compósito 0,5% cominuída para TGA. | 54 |
| Figura 37 – (A) Amostras para DMA recém impressa. (B) Amostras dos compósitos para DMA. | 55 |
| Figura 38 – Placa compósita presa na estativa. | 56 |
| Figura 39 – Amostra para ensaio de velocidade residual produzidas por MA. | 56 |
| Figura 40 – Corpos de prova rompidos após ensaio de tração. | 58 |
| Figura 41 – Resistência à tração máxima em função da fração mássica da fibra de linho (A), deformação máxima em função da fração mássica da fibra de linho (B), módulo de elasticidade máxima em função da fração mássica da fibra de linho (C). | 59 |
| Figura 42 – Micrografias da superfície da fratura do corpo de prova (2%) em volume de fibras ensaiado por tração. (a)50x (b)100x. | 60 |
| Figura 43 – Energia de impacto charpy em função das frações mássicas de fibras de linho dispostas nos compósitos. | 61 |
| Figura 44 – Comparação das energias de fratura dos compósitos, obtidas nos ensaios de impacto Charpy. | 62 |
| Figura 45 – Comparação das energias de fratura dos compósitos, obtidas nos ensaios de impacto Charpy. | 63 |
| Figura 46 – Corpos de prova após ensaio de flexão. | 64 |
| Figura 47 – Comparação das resistências à flexão dos compósitos, obtidas nos ensaios de flexão 3-pontos. | 64 |
| Figura 48 – Comparação dos módulos de flexão dos compósitos, obtidos nos ensaios de flexão 3-pontos. | 66 |
| Figura 49 – Curvas do módulo de armazenamento para as amostras de resina e compósitos de fibras de linho. | 67 |
| Figura 50 – Curvas do módulo de perda para as amostras de resina e compósitos de fibras de linho. | 68 |
| Figura 51 – Curvas da Tan Delta para as amostras de resina e compósitos de fibras de linho. | 69 |
| Figura 52 – Curva de pontos experimentais do compósito com 1% em fração de fibras de linho. | 70 |
| Figura 53 – Energia de absorção média para os compósitos nas frações de 0,5%, 1%, 1,5% e 2% de volume de fibras de linho. | 71 |

Figura 54 – Micrografias da superfície da fratura do corpo de prova de compósito após ensaio de velocidade residual. (a)100x de 1% (b)50x de 2% e (c)100x de 2%. 71

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Processo de MA | 19 |
| Tabela 2 – Classificação de acordo com o princípio de processamento das camadas. | 24 |
| Tabela 3 – Classificação dos polímeros | 26 |
| Tabela 4 – Composições estruturais de fibras naturais | 31 |
| Tabela 5 – Propriedades comparativas de fibras naturais com fibras sintéticas convencionais | 32 |
| Tabela 6 – Compósitos unidirecionais reforçados por tricomas de algodão ou fibras de linho. Propriedades longitudinais de compressão e tração | 40 |
| Tabela 7 – Informações técnicas da resina fotopolimerizável 3D fila. | 45 |
| Tabela 8 – Parâmetros utilizados para impressão das amostras. | 47 |
| Tabela 9 – Planejamento dos ensaios a serem realizados | 48 |
| Tabela 10 – Dimensões das amostras para ensaio de tração (mm) | 49 |
| Tabela 11 – Parâmetros utilizados para impressão das amostras de tração. | 50 |
| Tabela 12 – Parâmetros utilizados para impressão das amostras. | 51 |
| Tabela 13 – Parâmetros para análise de variância (ANOVA). | 57 |
| Tabela 14 – Propriedades de flexão dos compósitos. | 60 |
| Tabela 15 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as resistências à tração dos compósitos obtidas nos ensaios de Tração . . . | 60 |
| Tabela 16 – Energia média absorvida e desvio padrão obtidos nos ensaios de impacto Charpy dos compósitos. | 61 |
| Tabela 17 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as resistências ao impacto dos compósitos obtidas nos ensaios de impacto Charpy | 62 |
| Tabela 18 – Propriedades de flexão dos compósitos. | 63 |
| Tabela 19 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as resistências à flexão dos compósitos, obtidas nos ensaios de flexão 3- pontos. | 65 |
| Tabela 20 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para os módulos de flexão dos compósitos, obtidas nos ensaios de flexão 3-pontos. | 66 |
| Tabela 21 – Parâmetros obtidos no ensaio de velocidade residual e velocidade limite. | 69 |
| Tabela 22 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para energia de absorção para amostras com 0,5, 1, 1,5 e 2 % fração de fibras de linho. | 71 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| CAD | computer-aided design |
| STL | Stereolithography Tessellation Language |
| Lf | Comprimento da fibra. |
| MA | Manufatura aditiva |
| DLP | (digital light processing) Processamento digital de luz |
| 2D | Bidimensional |
| SLA | Análise dinâmico-mecânica |
| IME | Instituto Militar de Engenharia |
| CM | Ciência dos Materiais |
| IPqM | Instituto de Pesquisas da Marinha |
| DSC | Calorimetria diferencial de varredura |
| TGA | Análise termogravimétrica |
| MEV | Microscopia Eletrônica De Varredura |
| DMA | Análise dinâmico-mecânica |
| MA | MANufatura aditiva |

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ Sigma

τ Tau

Δ Delta

∞ Infinito

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | OBJETIVOS DO TRABALHO | 17 |
| 1.1.1 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 17 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 2.1 | MANUFATURA ADITIVA | 18 |
| 2.2 | PROCESSOS | 18 |
| 2.2.1 | MODELAGEM 3D DA PEÇA EM UM SISTEMA CAD | 18 |
| 2.2.2 | FORMATO STL | 21 |
| 2.2.3 | FATIAMENTO | 22 |
| 2.2.4 | FABRICAÇÃO DA PEÇA NO EQUIPAMENTO DE MA | 23 |
| 2.3 | CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MA | 24 |
| 2.3.1 | FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA | 24 |
| 2.4 | MATERIAIS POLIMÉRICOS | 25 |
| 2.4.1 | POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS | 27 |
| 2.4.2 | POLÍMEROS TERMORRÍGIDOS | 27 |
| 2.4.3 | POLÍMEROS FOTOPOLIMERIZÁVEIS | 28 |
| 2.5 | FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS | 29 |
| 2.5.1 | FIBRA DE LINHO | 33 |
| 2.6 | MATERIAIS COMPÓSITOS | 36 |
| 2.6.1 | COMPÓSITOS DE POLIMÉRICOS COM FIBRAS DE LINHO | 39 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 41 |
| 3.1 | APECTOS GERAIS | 41 |
| 3.2 | FIBRA DE LINHO | 41 |
| 3.3 | RESINA FOTOPOLIMERIZÁVEL | 43 |
| 3.4 | METODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVA | 44 |
| 3.5 | ENSAIOS MECÂNICOS | 48 |
| 3.5.1 | ENSAIO DE TRAÇÃO | 48 |
| 3.5.2 | ENSAIO DE IMPACTO CHARPY | 50 |
| 3.5.3 | ENSAIO DE FLEXÃO | 51 |
| 3.6 | MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) | 52 |
| 3.7 | ANÁLISES TÉRMICAS | 52 |
| 3.7.1 | ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) | 52 |
| 3.7.2 | CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC) | 53 |
| 3.7.3 | ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICA (DMA) | 54 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.8 | ENSAIO BALÍSTICO DE VELOCIDADE RESIDUAL | 55 |
| 3.9 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) | 55 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 58 |
| 4.1 | ENSAIO DE TRAÇÃO | 58 |
| 4.2 | ENSAIO DE IMPACTO | 60 |
| 4.3 | ENSAIO DE FLEXÃO | 63 |
| 4.4 | CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA | 67 |
| 4.5 | ENSAIOS DE VELOCIDADE RESIDUAL | 68 |
| 5 | CONCLUSÃO | 72 |
| | REFERÊNCIAS | 73 |

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é, sem dúvida, uma tecnologia em ascensão, com forte potencial para se tornar uma das principais metodologias de fabricação no futuro. Apesar de já existir há mais de três décadas, ela ainda apresenta um grande espaço para crescimento e a sua principal característica é a capacidade de sobrepor camadas, utilizando diversos mecanismos de união, o que permite a criação de geometrias impossíveis ou muito difíceis de se obter por outros meios de fabricação(1).

No âmbito da manufatura aditiva, existem diferentes tecnologias, materiais e áreas de aplicação, cada uma com seus próprios requisitos específicos(2). Nos últimos dez anos, tem se observado um avanço significativo na precisão dos equipamentos, bem como na redução dos custos e na ampliação da variedade de materiais aplicáveis e possíveis aplicações(1).

As tecnologias de manufatura aditiva estão cada vez mais presentes na fabricação de peças com formas complexas e precisão milimétrica. Entre as técnicas mais requisitadas, destacam-se a modelagem de deposição fundida (FDM), laser seletivo de sinterização (LSS), fusão seletiva a laser (SLM), estereolitografia (SLA) e processamento digital de luz (DLP). Nesse cenário, a MA por DLP tem se destacado pela facilidade de operação, rapidez na impressão e qualidade de acabamento refinado(3).

A manufatura aditiva é uma classe de processos de produção em constante crescimento, com aplicações em diversas áreas e cadeias produtivas. Sua flexibilidade para produzir em baixos lotes e sua capacidade de trabalhar com materiais e geometrias complexas a tornam uma tecnologia capaz de revolucionar processos produtivos e alterar as estratégias de produção atuais. Essa sua capacidade possibilita a sua utilização em várias áreas da indústria, médica, odontológica, automobilística e proporciona os usuários a expandirem suas fabricações. Na área de proteção balística, se almeja que a manufatura aditiva possa proporcionar a fabricação de acessórios capazes de proporcionar proteção para automóveis e usuários como, por exemplo, coletes e capacetes sob medida.

Assim, esse trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento de um compósito polimérico reforçado com fibras de linho fabricado por manufatura aditiva. Visando o desenvolvimento, produção e caracterização de materiais poliméricos reforçado com fibras de linho fabricados pelo processo de fotopolimerização em cuba através da tecnologia de processamento digital de luz. A fim de levantar informações a respeito das propriedades apresentadas por esses materiais para verificar a viabilidade do desenvolvimento desses materiais para blindagem balística.

1.1 Objetivos do Trabalho

O presente trabalho tem como finalidade produzir, analisar e caracterizar os resultados obtidos pelos compósitos fabricados por manufatura aditiva, efetuando ensaios mecânicos, balísticos e também análises térmicas. Os ensaios a serem realizados são: ensaio de tração, ensaio de flexão, ensaio de impacto Charpy, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaio de velocidade residual (VR).

1.1.1 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a viabilidade de produção de compósitos com matriz polimérica e reforço de fibra de linho por manufatura aditiva pelo processo de fotopolimerização em cuba;
- b) Avaliar as propriedades mecânicas apresentadas pelo compósito através de ensaios de tração, flexão e impacto;
- c) Observar características microestruturais da superfície das amostras através da microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- d) Identificar mecanismos de fratura atuantes através da avaliação da superfície dos corpos de prova de tração com a utilização da microscopia eletrônica de varredura;
- e) Avaliar o comportamento balístico das amostras produzidas através do ensaio de velocidade residual;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manufatura aditiva

A Manufatura aditiva (MA), conhecida também como impressão tridimensional (3D), é um processo revolucionário na fabricação, que utiliza a tecnologia de camadas de material adicionadas de forma sucessiva, com base em informações oriundas de uma representação geométrica computacional 3D (4), (5). A partir de um sistema como o CAD, é possível obter o modelo digital da peça, que é eletronicamente fatiado, gerando "curvas de nível 2D" para orientar a adição de material em cada camada (6),(7).

No início, as tecnologias de MA nos permitiam apenas criar protótipos com menor exigência em termos de materiais e precisão, limitando sua função real. Mas, com a evolução dessas tecnologias, novos processos foram criados para produzir diversos tipos de ferramentais, como modelos-mestre e moldes-protótipos (6).

À medida que a aplicação de MA se aprofundou no projeto, essa tecnologia se expandiu para engenharia, análise, planejamento e muitas outras etapas de manufatura e ferramental. A partir disso, podemos utilizar as tecnologias de MA para criar soluções de qualidade profissional a partir do zero (8). De forma profissional, a utilização desses recursos tecnológicos tem transformado a produção industrial, permitindo maior precisão e eficiência no processo produtivo(4).

A MA também possui um grande potencial para fabricar geometrias complexas, uma vez que transforma uma geometria 3D em uma sequência de geometria 2D (camadas) mais simples(7).

2.2 Processos

O processo geralmente envolve as seguintes etapas:

2.2.1 Modelagem 3D da peça em um sistema CAD

A criação de formas geométricas ocorre amplamente pela modelagem em sistemas CAD 3D, no entanto, há outras maneiras de alcançá-las, por exemplo, tomografia computadorizada, microtomografia, ressonância magnética, ultrassonografia 3D, fotogrametria entre outras. Normalmente, nesses casos de modelos 3D resultante, é crucial que sejam retrabalhados no sistema CAD, aprimorando as imperfeições em superfícies para viabilizar o emprego da tecnologia de Manufatura Aditiva(9),(10). Contudo, a dedicação excessiva

Tabela 1 – Processo de MA





| Processo | | | |
|---|---|--|---|
| 1. Modelagem 3D da peça em um sistema CAD 2. Obtenção de um modelo 3D específico para MA; 3. Fatiamento e definição de estruturas de suporte e deposição de material; 4. Fabricação da peça no equipamento de MA; 5. Pós processamento, que varia de acordo com a tecnologia; | | | |
| Fonte: (6) | | | |
|  |  |  |  |
| Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD) | Planejamento de processo (fatiamento) | Processamento por adição das camadas | Peça fabricada |
| Modelo eletrônico 3D | | Modelo físico | |

Figura 1 – Representação das principais etapas do processo de AM ou impressão 3D (6).

em reparar arquivos no formato .stl tem sido um empecilho, uma vez que alguns sistemas CAD 3D precisam de ferramentas apropriadas para agilizar tal processo. Por este motivo, faz-se necessário contar com ferramentas computacionais especializadas para a tarefa (6).

A adequação criteriosa da modelagem CAD é crucial para sua usabilidade em programas que interagem com tecnologias de MA. Infelizmente, problemas geométricos depreciam a formação de uma estrutura sólida e, por sua vez, comprometem a geração de uma malha apropriada para execução adequada na MA(6).

Ao modelar um objeto com múltiplas superfícies próximas, é essencial garantir que essas superfícies estejam adequadamente conectadas para formar um volume fechado. Coerentemente com as precisões numéricas envolvidas, a interpretação errônea dessa conexão pode levar a uma representação falha do objeto modelado, exemplificado na figura 2.

Para evitar esse problema, é fundamental utilizar superfícies que gerem volumes completamente fechados e com todas as suas superfícies em perfeita conexão.

Na fase de modelagem, pode surgir uma situação em que dois ou mais sólidos aparentam estar conectados, mas, na verdade, não estão. Essa falha pode ser ocasionada pelo

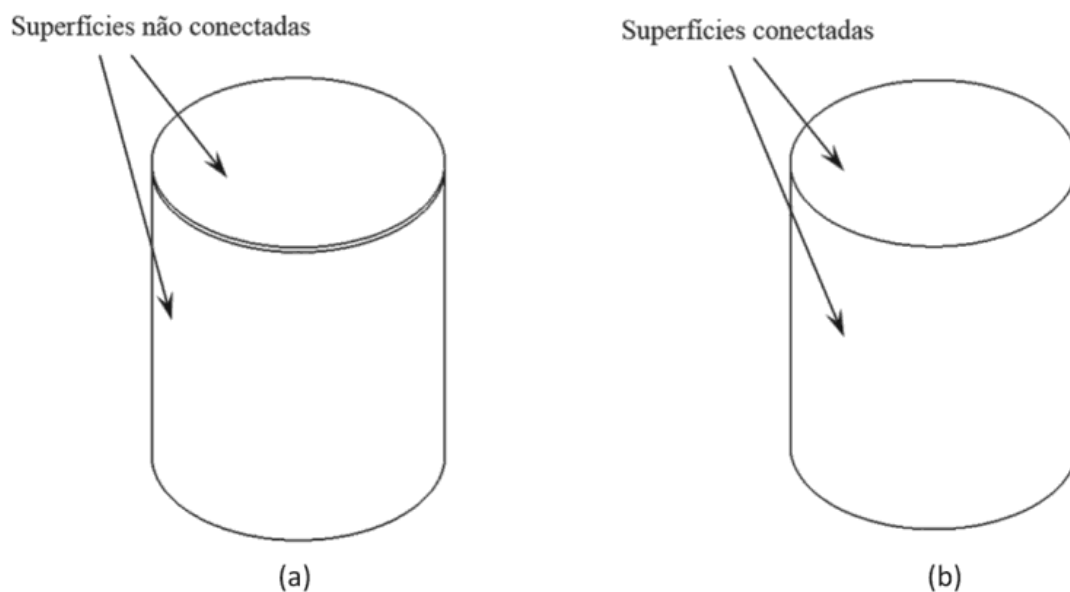


Figura 2 – Volume gerado com superfícies não conectadas (a) e conectadas(b) (6).

usuário ou pelo próprio sistema CAD, resultando em superfícies que parecem coincidentes, porém com uma distância mínima entre elas. Ao converter o modelo para uso na máquina, o algoritmo de geração de malha reconhece esses sólidos como independentes, criando duas malhas distintas. Tal circunstância pode comprometer a integridade do protótipo, enfraquecendo sua resistência e até mesmo causando deslocamentos.

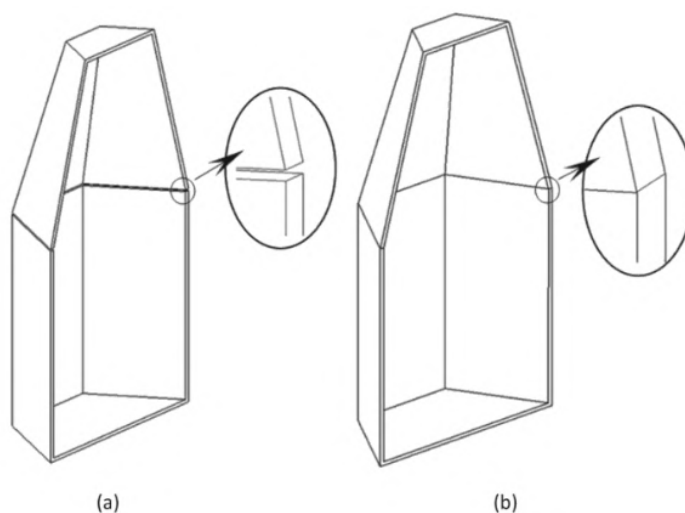


Figura 3 – Modelagem de sólido não conectado (a) e sólido único(b) (6).

É fundamental atentar-se a esse problema na fase de modelagem, a fim de assegurar um produto final de qualidade e estar vigilantes e dispostos a corrigir falhas antes que elas se tornem problemas maiores.

2.2.2 Formato STL

O formato STL produz triângulos finitos que correspondem toda a superfície do modelo 3D, sendo essencial para que o software de fatiamento perceba todas as nuances da superfície, permitindo que cada camada seja gerada com precisão e espessura uniforme (7).

A técnica de representação de modelos tridimensionais por meio de uma malha triangular, conhecida como STL, é uma solução simples e robusta elaborado em 1988 por Albert Consulting Group. Cada elemento triangular da malha é independente, composto por três vértices e contém um vetor normal unitário que indica a ausência de material em determinadas partes externas da peça. Os vetores normais são ferramentas cruciais para delimitar as áreas onde o material deve ser aplicado (6). O processo de coleta e processamento de dados para MA é alicerçado nos dados tridimensionais do modelo obtido a partir de arquivo CAD, que por sua vez, exporta as informações no formato STL.

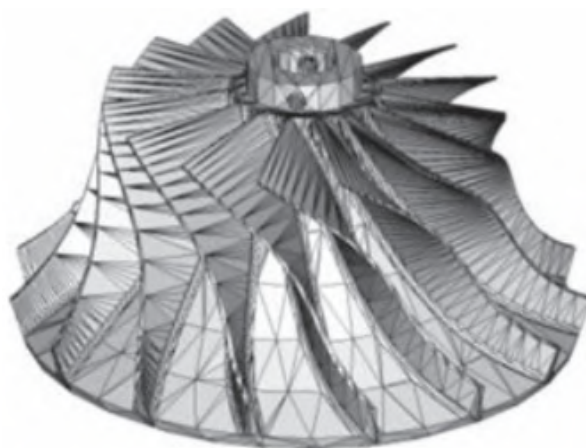


Figura 4 – Exemplo da imagem na tela de um computador de um modelo STL (7).

O formato STL é considerado um padrão de referência na indústria de equipamentos de MA e é amplamente utilizado em todos os sistemas CAD 3D. Basicamente, a elaboração dessa representação visa garantir que ela possa ser interpretada por qualquer sistema MA, apesar dos recursos computacionais ou do sistema operacional utilizado. Isso confere uma portabilidade desejável e um caráter de interoperabilidade útil para os equipamentos e programas utilizados nessa área (6). No processo de tecelagem em malha de triângulo sobre uma superfície, é importante seguir as regras básicas. Uma dessas regras é a Regra da Mão Direita, que estabelece que a sequência dos vértices 1, 2 e 3 de cada triângulo, juntamente com suas coordenadas cartesianas, deve permitir a definição clara do interior e exterior da superfície. Além disso, é necessário listar a sequência dos vértices de cada triângulo no sentido anti horário.

Outra regra é que dois triângulos adjacentes compartilham precisamente dois vértices. Se houver a partilha de três ou mais vértices ou dois ou mais triângulos em

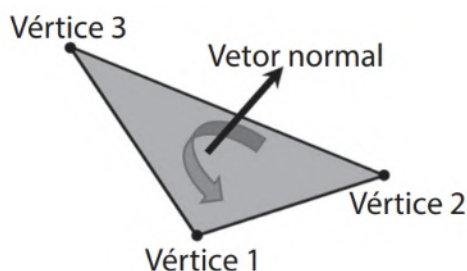


Figura 5 – Regra da mão direita para a orientação do vetor normal (6).

comum com um vértice, isso indica uma degeneração da malha e, conseqüentemente, sua invalidação.

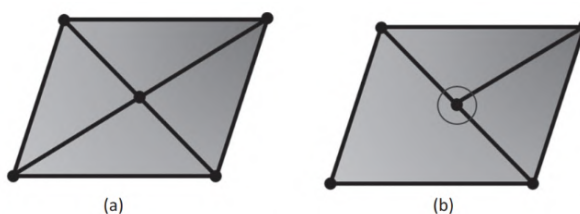


Figura 6 – Configuração de triângulos em STL válida (a) e inválida (b) (6).

Embora aparentemente simples, o formato STL apresenta algumas limitações. Eles não incluem informações topológicas que garantam a conectividade e consistência da malha, a direção do vetor normal nem sempre é confiável e a redundância de dados resulta em arquivos excessivamente grandes. É importante ressaltar que estes arquivos não trazem informação sobre a unidade de medida utilizada, o que pode causar erros de conversão entre medidas em milímetros e polegadas. Por isso, durante a importação, é essencial que o usuário esteja atento à unidade de medida correta. Durante a conversão de um modelo sólido ou de superfícies fechadas para a malha STL, há uma adaptação das superfícies do modelo CAD 3D através da criação de uma malha composta por triângulos. A quantidade de triângulos que formam essa malha é crucial para garantir a precisão do modelo STL obtido. Apesar da impossibilidade de uma representação perfeita sem o uso de um número infinito de triângulos, é crucial adotar parâmetros de controle da malha para se obter a melhor precisão com o menor tamanho de arquivo. Múltiplos parâmetros podem ser utilizados para controlar a malha gerada, porém, os sistemas de CAD frequentemente utilizam o comprimento da corda ou flecha e o ângulo de controle como principais parâmetros (6).

2.2.3 Fatiamento

O processo de fatiamento pode ser realizado de maneira direta ou indireta. Na abordagem direta, o fatiamento é aplicado diretamente às superfícies matemáticas CAD.

A alternativa indireta efetua o mesmo procedimento através de uma malha de triângulos que espelha o modelo tridimensional (6).

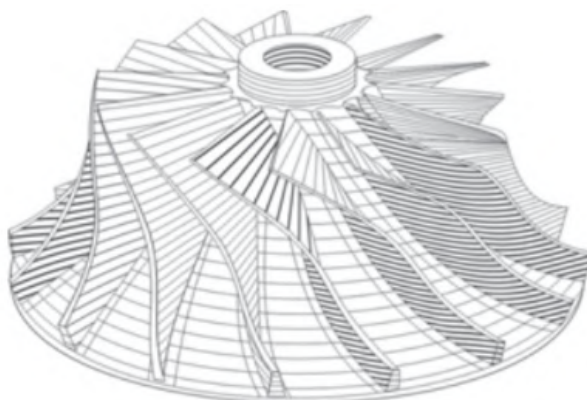


Figura 7 – Exemplo de imagem de um modelo fatiado (7).

Nesta etapa, pode ocorrer problemas de vedação da superfície, desencadeado pela falta de união entre os vértices de um ou mais triângulos vizinhos. É possível utilizar ferramentas que viabilizam a detecção e solução de eventuais falhas, além de permitir a otimização dos parâmetros tecnológicos que precisam ser ajustados durante a fabricação do modelo em 3D (7). Especialmente durante a comunicação entre o software e a máquina de PF3D, é fundamental que esses ajustes sejam feitos com precisão. Isso permitirá que muitos problemas de qualidade, que frequentemente surgem na fase de desenvolvimento do modelo em 3D no sistema CAD, sejam solucionados de maneira eficaz.

2.2.4 Fabricação da peça no equipamento de MA

Após as etapas de elaboração do modelo digital, conversão, fatiamento e correção de erros, o projeto proposto poderá ser impresso. Uma característica importante da MA é sua facilidade de automatização, minimizando consideravelmente a intervenção do operador durante o processo. Na prática, a presença do operador é fundamental na preparação do equipamento, ajustando a alimentação dos materiais e os parâmetros da máquina. Como as informações geométricas da peça são obtidas por um sistema de planejamento computacional em 3D, é possível que as próximas etapas sejam executadas sem assistência do operador. Essa tecnologia é resultado da integração de processos tradicionais de manufatura (incluindo a metalurgia do pó, extrusão, usinagem CNC e etc), combinada com outras tecnologias (como sistemas de impressão a jato de tinta, tecnologias laser, feixes de elétrons, etc) e o desenvolvimento de materiais adequados para cada processo (6).

2.3 Classificação dos processos de MA

Geralmente, a MA altera o estado físico dos materiais (sólido \rightarrow líquido ou líquido \rightarrow sólido) por meio de processos como fusão a laser, resistência elétrica ou polimerização para produzir as peças (7). Uma maneira simplista de classificar os processos de produção por MA é através do estado ou forma inicial da matéria-prima utilizada, classificando em líquido, sólido ou pó.

A norma ISO ASTM 52900 propõe a categorização em sete grupos distintos, baseados nos diferentes princípios de processamento utilizados nas tecnologias de produção. Esta nova abordagem de classificação de processos de fabricação fornece informações relevantes que podem ser utilizadas para melhorias contínuas de produção e sua eficácia, tornando-se um recurso útil para a produção.

Tabela 2 – Classificação de acordo com o princípio de processamento das camadas.

| Classificação das tecnologias MA | Descrição dos princípios |
|----------------------------------|--|
| Fotopolimerização em cuba | O fotopolímero líquido numa cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz. |
| Jateamento de aglutinante | Um agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó. |
| Deposição de energia direcionada | É utilizada energia térmica focalizada para fundir materiais por fusão à medida que estes são depositados. |
| Extrusão de materiais | O material é distribuído seletivamente através de um bocal ou orifício. |
| Jateamento de material | São depositadas seletivamente gotículas de material de base. |
| Fusão em leito de pó | A energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó. |
| Laminação de folhas | Folhas de material são ligadas para formar uma peça. |

Fonte: Adaptado de ASTM 52900 (2021).

2.3.1 Fotopolimerização em cuba

Os processos por Fotopolimerização em cuba, chamadas também como estereolitografia, é a primeira tecnologia 3D desenvolvida e baseam-se a partir de resinas poliméricas líquidas curados por irradiação com uma fonte de luz ultravioleta (UV) ou visível (8). A energia da luz é o que desencadeia a reação química na resina fotopolimérica líquida, que é desencadeada pelos agentes químicos presentes na composição da resina fotossensível, levando-a a se solidificar na cuba ou bandeja (6). Existem dois tipos principais de dispositivos de manufatura aditiva que usam fotopolímeros líquidos ou resinas fotopolimerizáveis, conforme ilustrado na figura 8.



Figura 8 – Principais processos de MA por Fotopolimerização em cuba.

Os equipamentos de MA por Fotopolimerização em cuba podem construir as sobreposições das camadas no eixo Z movimentando a plataforma de construção “de cima para baixo”, e outros o fazem “de baixo para cima”(7). O escaneamento vetorial é realizado principalmente por uma fonte de energia a laser. Outras fontes, como feixe de elétrons ou plasma, também podem ser usadas.

Nesse processo, a resina fotocurável é inserida na cuba ou recipiente que contém a plataforma de impregnação, que desce à medida que as camadas são construídas. O feixe do laser, que é movimentado por um par de espelhos, se desloca mediante a um agrupamento óptico correspondente a geometria 2D (direções X e Y) adquirida no fatiamento da representação do modelo 3D (11)(6). Quando o laser incide a resina fotocurável, ela se solidifica. Após a varredura ser concluída na camada correspondente, o feixe se desloca na direção z na distância programada para iniciar a nova camada. O processo se repete até a conclusão e a peça pronta é levada a um forno para que ocorra a cura completa da resina.

Na tecnologia de impressão DLP, a área da seção transversal de cada camada do modelo é criada simultaneamente. Isso é alcançado por meio da projeção de luz UV em um conjunto de microespelhos que se ajustam para criar o padrão correspondente à seção transversal a ser impressa (8), (11).

2.4 Materiais Poliméricos

A indústria de polímeros basicamente iniciou com o domínio da tecnologia de vulcanização da borracha natural, patenteada em 1844 e a nitretação da celulose, que tornaria a celulose em um material aplicável a produtos presentes no cotidiano (12).

O termo polímero foi criado em 1832 por Berzelius com a intenção de diferenciar moléculas orgânicas com mesmos elementos químicos mas que poderiam não apresentar as mesmas propriedades químicas, como os gases etileno e buteno. O termo tem origem grega, onde, poli em significa muitos e meros partes (12). Através da reação entre fenol e formaldeído, Leo Baekeland produziu em 1912, o primeiro polímero sintético, gerando um produto sólido (resina fenólica), hoje conhecido por baquelite (13). Em 1920, Hermann Staudinger, cientista alemão, propôs a teoria da macromolécula, e só então, o termo só passou a ser utilizado como é conhecido hoje.

Os polímeros eram apresentados como compostos formados por moléculas de grande tamanho. E esta idéia foi fortemente combatida na época, levando algumas décadas para que fosse definitivamente aceita (12), (13). Através da reação entre fenol e formaldeído, Leo Baekeland produziu em 1912, o primeiro polímero sintético, gerando um produto sólido (resina fenólica), hoje conhecido por baquelite (13).

Por apresentarem baixo preço, facilidade de fabricação, resistência à água e versatilidade, os polímeros são utilizados em diversas aplicações dos setores domésticos e industriais (14), (15).

O polímero pode ser definido como o material orgânico ou inorgânico, com alta massa molar obtida pela repetição dos meros, que são unidades que se repetem constituindo uma macromolécula formada por ligações covalentes. Os meros são resultado da reação química entre os monômeros, que são a matéria-prima dos polímeros (12), (13).

Os polímeros costumam ser classificados quanto à estrutura química, ao seu método de preparação, às suas características tecnológicas, e quanto ao seu comportamento mecânico, conforme a tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos polímeros

| | |
|---|---|
| Quanto à estrutura química | -Polímeros de cadeia carbônica -Polímeros de cadeia heterogênea. |
| Quanto ao método de preparação | -Polímeros de adição -Polímeros de condensação. |
| Quanto ao comportamento mecânico | -Plásticos: Termoplásticos Termorrígidos, Baroplásticos. -Elastômeros -Fibras |
| Quanto ao desempenho mecânico | - Termoplásticos convencionais -Termoplásticos especiais. Termoplásticos de engenharia (TE) Termoplásticos de engenharia especiais |

Fonte: (13)

A estrutura do polímero influencia direta sobre a sua densidade e suas propriedades

mecânicas. Ramificações longas aumentam a resistência ao impacto, diminuem a densidade e facilitam o processamento, e as ramificações curtas aumentam a cristalinidade e a resistência à tração(16).

2.4.1 Polímeros termoplásticos

São os polímeros capazes de fluir, fundir e amolecer quando expostos a temperatura e pressão mais elevada, quando estas condições são retiradas, o polímero se solidifica na forma do molde em que foi colocado. Caso seja exposto novamente a temperatura e pressão mais alta, novamente são capazes de amolecer, podendo então, ser reciclados. Apresentam cadeia linear ou ramificada, são solúveis e fusíveis, exemplos desse tipo de polímero são polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC), polipropileno (PP), e outros (12), (13).

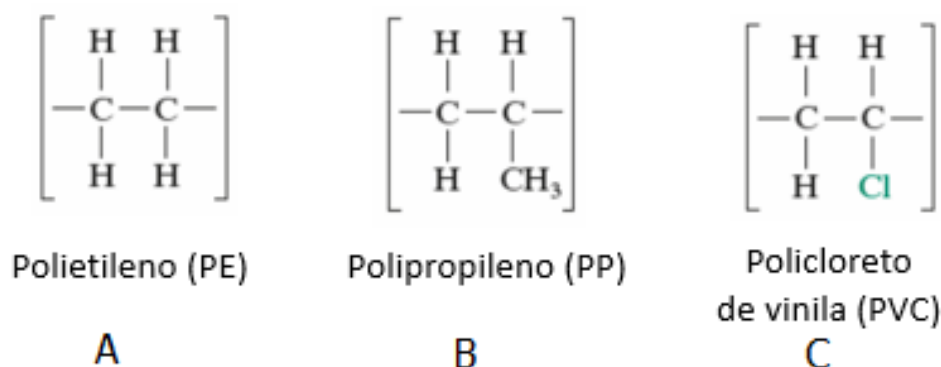


Figura 9 – (A) Polietileno (PE), (B) Polipropileno (PP), (C) Policloreto de vinila (PVC) (17).

Os materiais termoplásticos estão se tornando a escolha preferencial em substituição a outros materiais, tais como o aço, o vidro e a madeira. A razão para isso são as propriedades desses materiais incluem baixo peso, baixo custo, elevada resistência mecânica e química, facilidade de aditivação, além de serem 100% recicláveis. Em outras palavras, os termoplásticos são uma opção inteligente e sustentável para qualquer projeto(3).

2.4.2 Polímeros Termorrígidos

Os termorrígidos quando são expostos a temperaturas e pressões mais altas, amolecem e fluem, apresentando a capacidade de serem moldados. Os polímeros termorrígidos, também chamados de termofixos, são moldados quando ainda estão na forma de pré-polímero, pois, durante o processo de cura, reações químicas formam ligações cruzadas entre cadeias e se solidificam e se tornam materiais insolúveis, infusíveis. Se forem aquecidos após a cura não alteram mais o seu estado físico, desta forma, não é possível reciclá-los.

Os polímeros termorrígidos se destacam por sua rigidez e resistência superiores aos termoplásticos, além de apresentarem boa estabilidade dimensional devido à quantidade



Figura 10 – Aquecimento de polímeros termoplásticos e termorrígidos (18).

de ligações cruzadas presentes. A categoria dos termorrígidos engloba uma vasta gama de materiais, como borrachas vulcanizadas, podemos citar a baquelite, resina epóxi e outros (17), (13), (16).

2.4.3 Polímeros fotopolimerizáveis

Considerando o mecanismo da fotoformação do polímeros, a luz atua na etapa inicial da polimerização, o que torna a fotoiniciação a parte central do processo de fotopolimerização. Quando comparada com outras técnicas de polimerização, apresenta obtenção de altas massas molares a altas velocidades de conversão. Nos sistemas fotopolimerizáveis ocorrem transformações das fórmulas usadas para produzir o material. Componentes básicos das formulações são sistema fotoiniciador, oligômeros, monômeros e aditivos(19).

Pelo fato dos monômeros apresentarem, de forma geral, baixo coeficiente de extinção molar, é preciso inserir à formulação um sistema fotoiniciador capaz de absorver a luz e produzir as espécies reativas, radicais ou íons, responsáveis por desencadear a polimerização. Os oligômeros possuem a capacidade de incorporar propriedades ao substrato a que são adicionado, sendo possível ampliar variedade de resinas que podem ser desenvolvidas para diferentes aplicações. Os monômeros são selecionados de acordo com: o controle de viscosidade, efeito na velocidade de fotopolimerização e nas propriedades do material final, volatilidade, odor e toxicidade (20). As resinas fotocuráveis padrão para os sistemas SLA e DLP são as resinas de epóxi e acrilato, sendo sua gama de módulo elástico, limitada e dependente dos monómeros e oligômeros que levam em sua composição (8)

2.5 Fibras Naturais Lignocelulósicas

As fibras podem ser classificadas, principalmente em fibras naturais ou químicas. As fibras naturais geralmente são subdivididas como vegetal, animal ou mineral. As fibras naturais lignocelulósicas são obtidas em vegetais e constituem bons exemplos de materiais ecologicamente corretos. As diversas formas de classificações para as fibras podem ser observadas na figura 11.

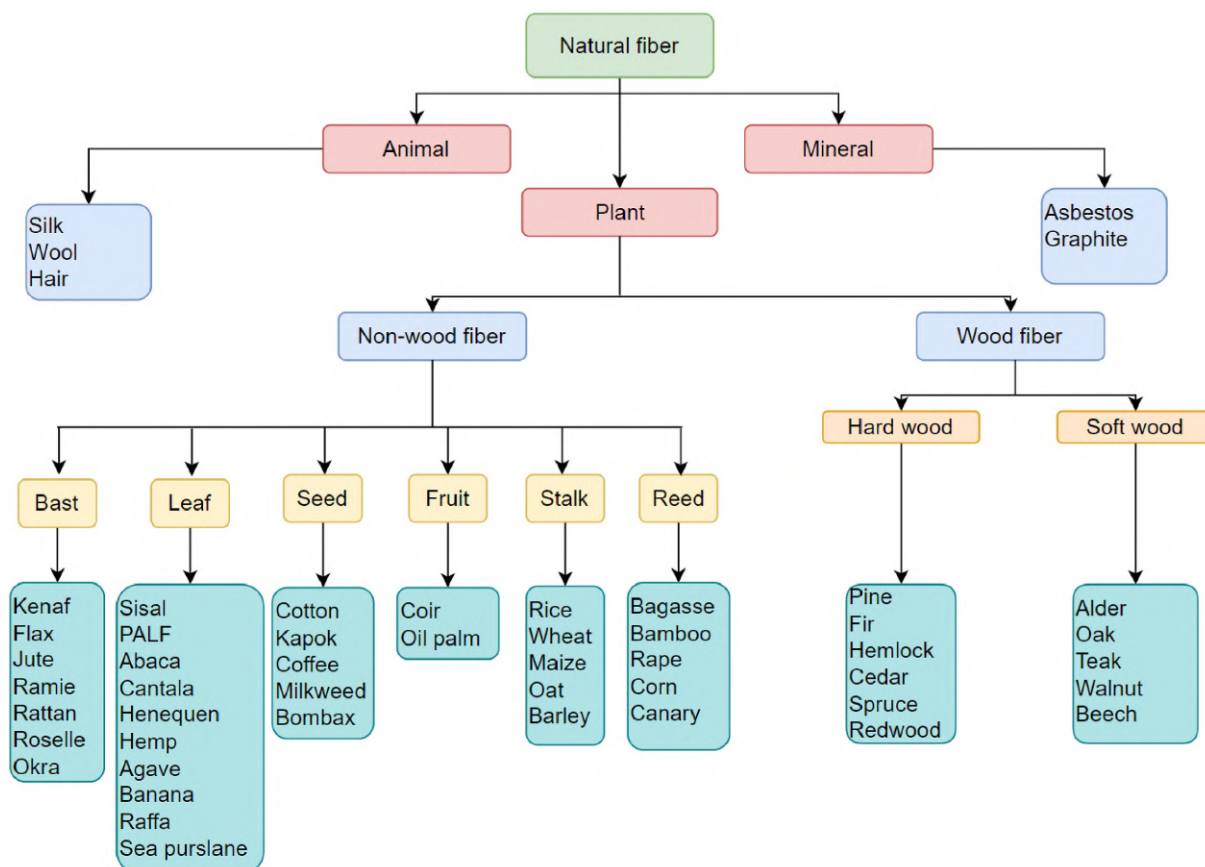


Figura 11 – Classificação das fibras. (21)

O crescente interesse na preservação do meio ambiente tem impulsionado a engenharia e o design de materiais para a utilização de recursos naturais. As fibras sintéticas, como vidro, carbono e aramida, são amplamente utilizadas em compósitos de polímeros devido às suas propriedades de alta resistência e rigidez.

No entanto, essas fibras apresentam desvantagens em relação à biodegradabilidade, reciclabilidade e impactos ambientais adversos. Para superar esses desafios, as fibras naturais renováveis estão ganhando espaço como reforços em matrizes poliméricas. Além de serem mais sustentáveis, essas fibras podem oferecer propriedades estruturais e mecânicas bem definidas (21).

Embora as fibras naturais sejam uma opção atraente, suas limitações não devem ser ignoradas. As complexas composições estruturais, formadas por celulose, hemiceluloses,

lignina, pectina e substâncias cerosas, tornam esses materiais propensos a absorver umidade do ambiente, que pode resultar em uma ligação inadequada com os materiais da matriz, o que pode ser problemático em certas aplicações (22, 21). A falta de uniformidade, dimensões limitadas e a heterogeneidade microestrutural também são fatores que apresentam desafios significativos para a implementação bem-sucedida das FNLs.

A celulose é o principal constituinte estrutural das fibras, conferindo-lhes resistência, rigidez e estabilidade. Sua estrutura química é composta por três grupos hidroxila (OH), sendo que dois desses grupos formam pontes de hidrogênio intramoleculares, enquanto o terceiro estabelece ligações intermoleculares(23).

A hemicelulose, por sua vez, é encontrada principalmente na parede celular primária e é composta por polímeros ramificados de açúcares de cinco e seis carbonos, com estruturas químicas variadas. A lignina é amorfa, é um polímero que possui uma estrutura aromática(24), enquanto a pectina é composta por polissacarídeos complexos com cadeias laterais reticuladas com íons de cálcio e açúcares arabinose.

Além disso, a estrutura da fibra contém pequenas quantidades de componentes orgânicos (extrativos) e inorgânicos (cinzas), sendo que os extrativos orgânicos são responsáveis pela cor, odor e resistência à decomposição, enquanto os componentes inorgânicos aumentam a natureza abrasiva da fibra(25).

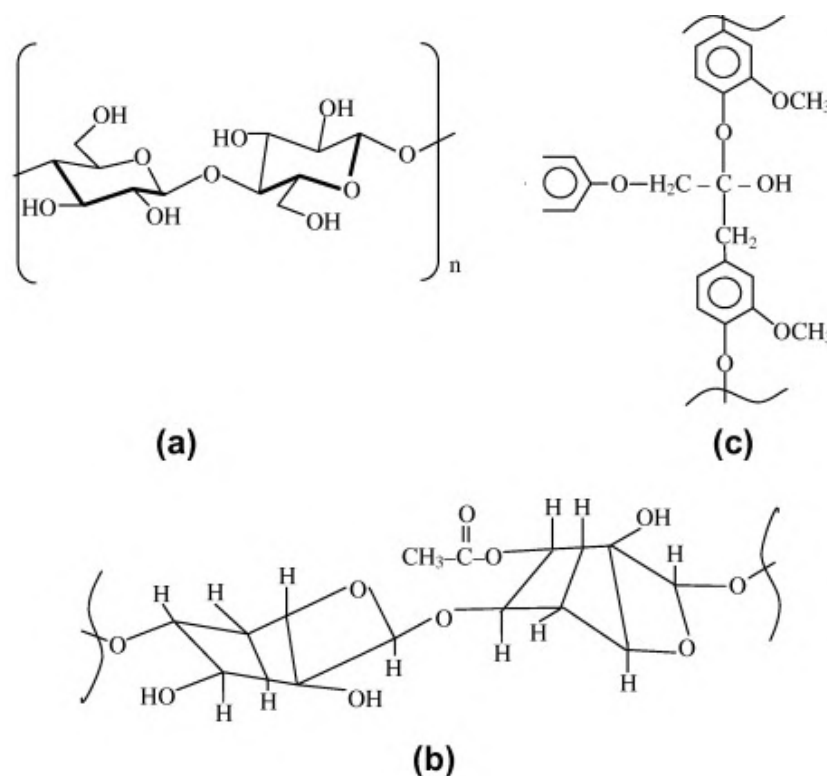


Figura 12 – Estrutura química de (a) celulose (b) hemiceluloses e (c) lignina.(25)

Cada fibra apresenta uma estrutura complexa em camadas, composta por uma

Tabela 4 – Composições estruturais de fibras naturais

| Nome das fibras | Celulose (% em peso) | Lignina (% em peso) | Hemicelulose (% em peso) | Ângulo microfibrilar (°) | Teor de umidade (% em peso) |
|-----------------|----------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Juta | 61–71,5 | 12–13 | 13.6–20.4 | 8,0 | 12.6 |
| Linho | 71 | 2.2 | 18,6–20,6 | 10,0 | 10,0 |
| Cânhamo | 70,2–74,4 | 3,7–5,7 | 17.9–22.4 | 6.2 | 10.8 |
| Sisal | 67–78 | 8,0–11,0 | 10,0–14,2 | 20,0 | 11,0 |

Fonte: Adaptado(25)

fina parede primária, depositada durante o crescimento celular, e uma parede secundária, formada por três camadas. A espessa camada intermediária, responsável pelas propriedades mecânicas da fibra, é constituída por microfibrilas celulares enroladas helicoidalmente, formadas a partir de moléculas de celulose de cadeia longa. O ângulo microfibrilar, definido como o ângulo entre o eixo da fibra e as microfibrilas, apresenta valores característicos que variam entre diferentes tipos de fibras(24).

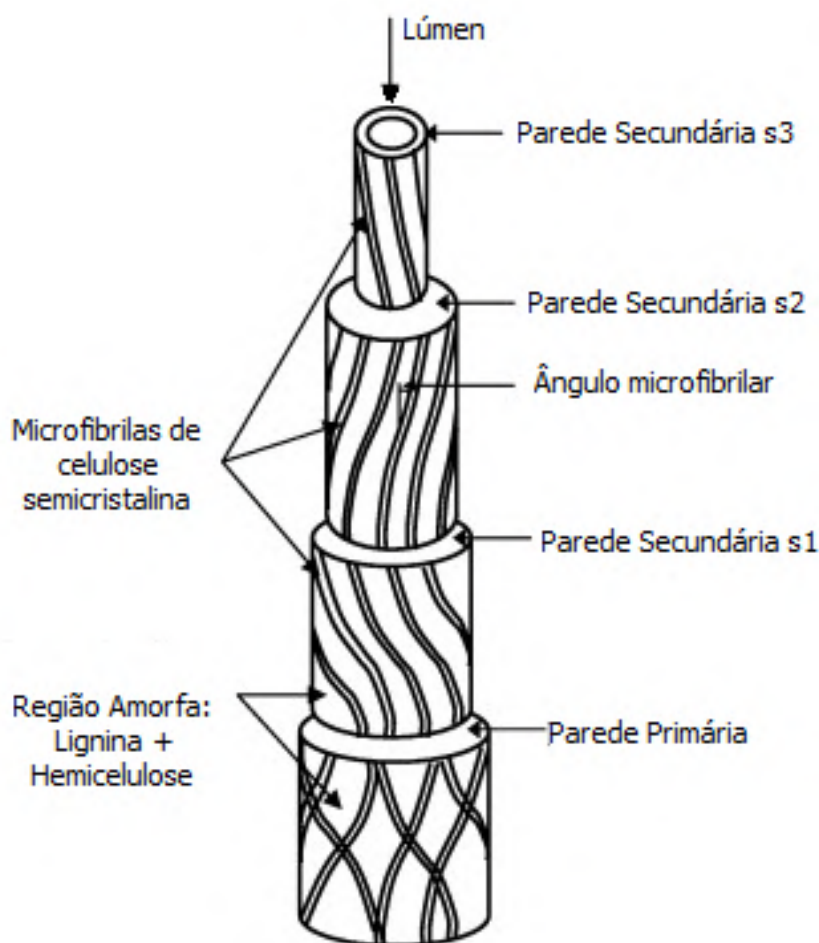


Figura 13 – Estrutura de fibra natural.(25)

À medida que se avança das camadas primárias para as secundárias, o teor de celulose aumenta, enquanto o teor de lignina diminui. As moléculas de hemicelulose são essenciais para a estrutura da fibra, ligando-se por meio de pontes de hidrogênio às fibrilas de celulose e formando materiais de cimentação. A lignina e a pectina, por sua vez, fornecem uma qualidade adesiva que mantém as moléculas unidas, conferindo à fibra suas propriedades de resistência e rigidez. Finalmente, a camada espessa secundária (s2) é responsável pelas propriedades mecânicas da fibra(25).

De forma geral, a geometria celular única das microfibrilas de celulose é um fator crucial para as propriedades da fibra, com a estrutura da parede celular e a composição química das camadas primárias e secundárias desempenhando um papel fundamental na determinação das propriedades mecânicas da fibra.

A quantidade de celulose presente nas fibras está diretamente relacionada à sua resistência à tração e módulo de Young. Porém, a rigidez das fibras é determinada pelo ângulo microfibrilar. Quando as microfibrilas possuem uma orientação espiral em relação ao eixo da fibra, as fibras vegetais se tornam mais dúcteis. Por outro lado, quando as microfibrilas estão orientadas paralelamente ao eixo da fibra, as fibras se tornam rígidas, inflexíveis e com alta resistência à tração(24).

Tabela 5 – Propriedades comparativas de fibras naturais com fibras sintéticas convencionais

| Nome das fibras | Densidade (g/cm ³) | Resistência à tração (MPa) | Módulo de Young (GPa) | Alongamento na ruptura (%) |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Juta | 1.3–1.4 | 393–773 | 13–26,5 | 1.16–1.5 |
| Linho | 1,50 | 345–1100 | 27.6 | 2.7–3.2 |
| Cânhamo | 1.14 | 690 | 30–60 | 1.6 |
| Sisal | 1,45 | 468–640 | 9,4–22,0 | 3–7 |
| Aramida | 1.4 | 3000–3150 | 63–67 | 3.3–3.7 |
| E-vidro | 2.5 | 2000–3500 | 70 | 2.5 |

Fonte: Adaptado(25)

Ao analisar as diferenças entre fibras naturais e sintéticas, é importante destacar a interação com a umidade. As fibras naturais são hidrofílicas, o que pode dificultar sua aplicação em matrizes poliméricas hidrofóbicas. A presença de água nas fibras pode prejudicar a interação entre a fibra e a matriz polimérica, criando vazios na estrutura dos compósitos. Esses vazios podem se tornar concentradores de tensão e reduzir a resistência dos compósitos, comprometendo sua eficácia(26).

A degradação da fibra lignocelulósica é um processo sensível à temperatura, com início em torno de 240°C. Os componentes estruturais da fibra, como celulose, hemiceluloses e lignina, apresentam diferentes faixas de sensibilidade térmica. A lignina, por exemplo, começa a se degradar a partir de 200°C, enquanto as hemiceluloses e constituintes

celulósicos exigem temperaturas ainda mais elevadas para sua degradação (23). Portanto, é fundamental considerar esses fatores ao escolher as fibras ideais para compósitos de alta qualidade.

As suas propriedades são dependentes de fatores como a origem, condições climáticas, idade das plantas e métodos de extração utilizados, esses parâmetros são determinantes para o fator de caracterização das fibras(25). O uso bem-sucedido dessas fibras requer um fator de caracterização preciso, garantindo a qualidade e eficiência do material .

As fibras lignocelulósicas são uma opção sustentável que requer baixo consumo energético em sua produção. Além disso, são neutras em relação ao dióxido de carbono, o que significa que não contribuem para o aumento do gás na atmosfera quando compostadas ou queimadas. O ambiente de processamento é amigável, proporcionando melhores condições de trabalho e reduzindo a irritação dérmica e respiratória. E sua disponibilidade mundial é um fator adicional(24).

2.5.1 Fibra de linho

O linho, uma planta herbácea que pertence à família das lináceas, pode atingir até um metro de altura e é composto por uma substância fibrosa e uma lenhosa. Suas sementes oleaginosas possuem propriedades medicinais e suas fibras longas, extraídas do caule das plantas da família das Lináceas - *Linum usitatissimum*, são muito utilizadas para confecção de tecido. Alguns relatos históricos indicam que a fibra de linho, possivelmente, foi a primeira fibra lignocelulósica a ser fiada entre entre 4000 e 3100 a.C. no Antigo Egito e estima-se que teve sua origem nas regiões do Cáucaso e do Mar Morto (27).

É considerada a fibra mais antiga do mundo com indícios de sua utilização há cerca de 8000 a.C. E evidências encontradas em tumbas egípcias indicam que o linho é conhecido em tempos mais longínquos. O linho foi encontrado em diversas regiões da Europa com o passar dos séculos, sendo a primeira planta têxtil cultivada na Europa graças a comerciantes que exportavam o linho do Egito para a Irlanda, a Inglaterra e a Bretanha. E inserida e cultivada no norte da Europa pelos Romanos (28).

A produção de linho da Rússia junto com a da Lituânia, Letônia e Estônia é responsável por quase metade da produção em todo mundo. A área determinada para a cultura do linho na Europa equivale a mais de 20% da área mundial. A França e Bélgica são responsáveis por 86% de toda fibra de linho produzida na União Européia, sendo a fibra produzida na Bélgica considerada com a melhor qualidade. O mercado predominante para as fibras de linho é a indústria têxtil, destinando cerca de 50% do linho adquirido para vestuário e os demais para decoração de casa e produção de cordas (28).

Seu cultivo é preferencialmente em climas temperados e solos férteis e abundantes de água(27). Com cerca de 60 dias de sementeação as flores começam a aparecer e ficando



Figura 14 – Fragmento de bandagem de mumia feito de linho e decoradas com um capítulo do livro dos mortos (28).

abertas por poucas horas, apresentando um ciclo de vida curto. Depois de três semanas após o surgimento das flores, a planta medirá de 80 a 120 cm e estará pronta para ser arrancada pela raiz, a fim de se aproveitar ao máximo o comprimento da fibra. Após a colheita do linho é ripado onde as sementes são separadas e parte delas é utilizada para sementeira. Então, as fibras dos caules são agrupadas em feixes e colocadas para secar e depois, mergulhadas em água (28).

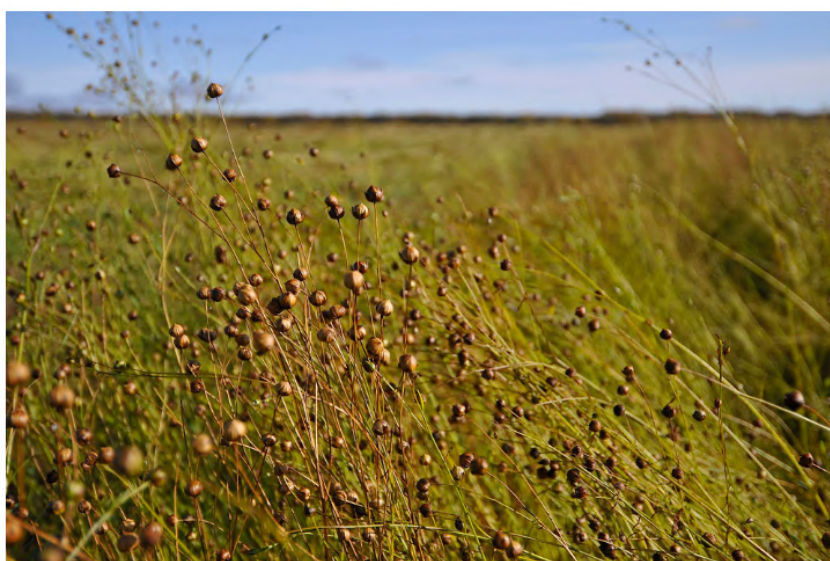


Figura 15 – Plantação de linho (29).

Nesta etapa a cola natural que une as fibras da planta precisa ser retirada. Contudo, este não pode ser um processo muito intrusivo, caso contrário as fibras são danificadas e o linho perde sua qualidade. Esse processo é chamado de maceração por fermentação, é empregado para eliminar a pectose existente entre o caule lenhoso e a casca filamentososa. Esta etapa facilita o processo de separação das fibras do caule (27). Existem algumas técnicas disponíveis para o processo de retificação de plantas. Uma delas é a imersão em água parada, na qual os feixes de plantas são colocados em tanques ou valas com água fria por um período que varia de 6 a 15 dias, dependendo da temperatura da água. ocorre A imersão em água corrente é realizada em um rio ou córrego, e é praticada em muitos lugares produtores, a maceração é efetuada em campos durando várias semanas. Os feixes são colocados em águas de riacho, chuva ou irrigados e esse processo é intercalado com secagens(28). mas essa prática foi proibida devido aos impactos negativos na qualidade da água, como a morte de peixes e o surgimento de odores desagradáveis(30).

Outra técnica utilizada é a maceração com água quente, criada no final do século XVIII. Nesse método, as plantas são imersas em água a 32°C por cerca de 60 horas. No entanto, a moagem ou orvalhamento gradualmente substituiu todas essas técnicas à base de água e ainda é amplamente utilizada na Europa.



Figura 16 – Linho no processo de maceração (31).

A maceração tradicional pode ser um processo imprevisível, dependente de fatores como clima e região, além de ser notoriamente demorado. Mas pode ser uma solução a maceração enzimática. Com sua especificidade e alta controlabilidade, as enzimas são capazes de superar essas desvantagens e trazer mais eficiência ao processo(32).

Após estarem secos, os caules passam pelo processo de separação das fibras, um processo bruto e vigoroso chamado trilhamento, onde a fibra é extraída através de esmagamentos. Então, as fibras são penteadas e separadas de acordo com o seu comprimento, as fibras curtas são chamadas de estopas e utilizadas para cordas, em papelaria e resíduos para aglomerados de madeira, por exemplo. Já as fibras longas, que caracteriza cerca de 20% da palha inicial segue para a indústria têxtil(28).

O linho proporciona de 15 a 40 feixes de fibras por caule e é possível extrair de 12 a 40 fibras de cada feixe, sendo equivalente a aproximadamente 25% do peso do caule. O comprimento de feixe varia entre 15 a 100 cm e o comprimento de fibra entre 2 a 12 cm. A fibra apresenta um diâmetro aproximado de 0,02 mm (27).

O linho tem se destacado cada vez mais em aplicações técnicas industriais, como na indústria automotiva e em materiais compósitos para fins específicos. Isso se deve às suas propriedades intrínsecas que se alinham com os objetivos propostos, como seu preço relativamente baixo, boas propriedades mecânicas com resistência à tração duas vezes maior que a do algodão, capacidade de absorção sonora, baixa densidade e a possibilidade de ser reciclado. O linho se apresenta como uma escolha inteligente e eficiente para diversas aplicações. As tabelas 4 e 5 demonstram a composição e valores de algumas propriedades mecânicas do linho.

2.6 Materiais Compósitos

Os compósitos são amplamente empregados em diversos setores industriais, incluindo transporte e construção, devido às suas propriedades mecânicas e peso leve. No entanto, a escolha do polímero e do reforço pode resultar em um impacto ambiental significativo. As fibras de vidro e carbono são as mais comuns, mas é importante considerar alternativas mais sustentáveis para minimizar o impacto ambiental(33). Além disso, muitas aplicações solicitam materiais com propriedades elevadas e ao mesmo tempo mais leves e baixo custo.

Em linhas gerais, um compósito é fruto da combinação de dois ou mais materiais com características distintas, sejam eles sintéticos ou naturais, pertencente a classe de materiais heterogêneos. Conforme o princípio da ação combinada a seleção criteriosa de dois ou mais materiais distintos pode gerar combinações de propriedades superiores(23). Essa abordagem também permite alcançar um equilíbrio ideal entre as diferentes propriedades em diversos materiais compósitos.

O primeiro componente, conhecido como carga ou agente de reforço (fase descontínua), é responsável por conferir resistência e rigidez ao compósito, enquanto o segundo componente, a matriz (fase contínua), é responsável por manter os componentes unidos e garantir a compatibilidade entre eles(17).

Os compósitos são desenvolvidos, geralmente de forma artificial, com o objetivo de aprimorar características mecânicas, como rigidez, tenacidade e resistência a altas temperaturas, elevando o patamar de qualidade desses materiais(17). Essa combinação é feita com o objetivo de obter propriedades específicas, e para isso, diferentes tipos de fibras naturais, matrizes e técnicas de processamento são utilizados na fabricação dos compósitos(25).

Para um compósito bifásico, foram desenvolvidas expressões matemáticas que representam a relação entre o módulo de elasticidade e a fração volumétrica das fases constituintes. A equação 2.1, baseadas na regra das misturas, estabelecem um limite superior para o módulo de elasticidade (17).

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \quad (2.1)$$

Onde:

E_c : Módulo de elasticidade do compósito;

E_m : Módulo de elasticidade da matriz;

E_p : Módulo de elasticidade da fibra;

V_m : Fração volumétrica da matriz;

V_p : Fração volumétrica da fibra.

Os materiais compósitos podem ser classificados em quatro divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras, os compósitos estruturais e os nanocompósitos, conforme ilustrado na figura 17.

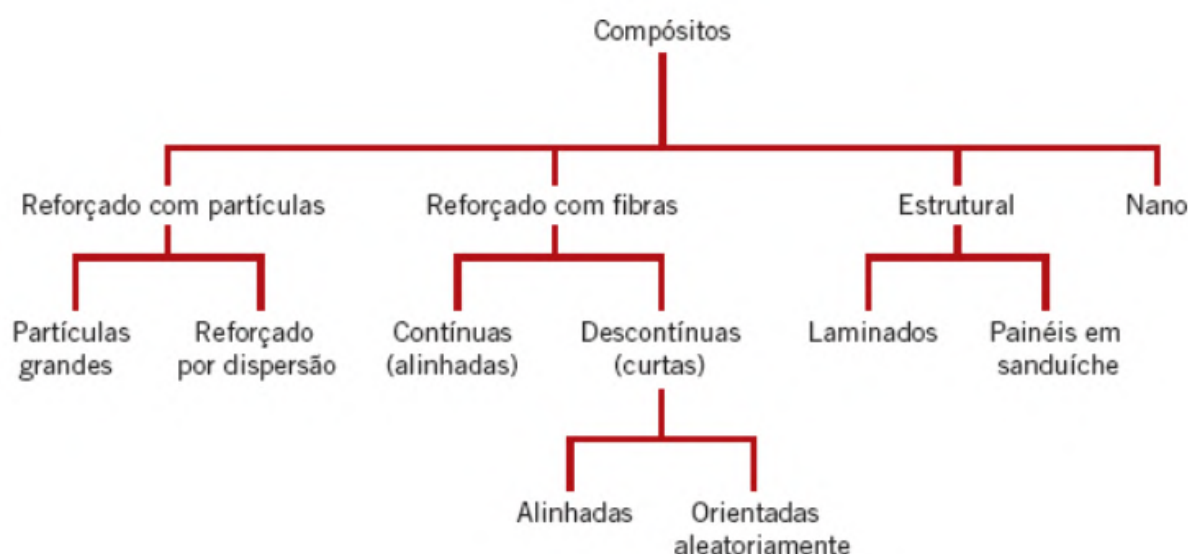


Figura 17 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos (17).

Os materiais compósitos reforçados com fibras podem ser considerados os compósitos tecnologicamente mais relevantes. A fase dispersa é caracterizada pela geometria alongada de uma fibra, apresentando uma relação expressiva entre o comprimento e o diâmetro (17). É possível produzir compósitos reforçados com fibras de alta resistência e módulos específicos através da utilização de materiais leves tanto para a fibra quanto para a matriz. Resultando em um produto eficiente e de alta qualidade(17).

No entanto, devido às características estruturais, a fibra vegetal possui um alto nível de absorção de umidade e baixa molhabilidade, o que pode resultar em adesão insuficiente entre fibras e matrizes poliméricas, levando à descolagem durante o uso e envelhecimento. É importante considerar esses fatores ao utilizar a fibra lignocelulósica em compósitos e materiais poliméricos (34).

Um dos parâmetros cruciais é o comprimento crítico da fibra, que é altamente dependente da ligação interfacial entre uma matriz e uma fibra. Após a seleção da fibra, a interface fibra-matriz é um critério de seleção essencial para a matriz sustentável desenvolver um alto desempenho (23). A resistência ao cisalhamento interfacial é uma medida da ligação, adesão ou interação entre uma fibra e um material de matriz .

Para um reforço eficiente em compósitos reforçados com fibras curtas ou descontínuas , os filamentos devem ter comprimentos que excedam o comprimento crítico da fibra . Isso então maximiza a transferência de tensão entre os constituintes, e a falha do material compósito provavelmente será iniciada pelas fibras, em vez da descolagem fibra-matriz (35) .

As fibras contínuas apresentam $l > l_c$ (normalmente $l > 15l_c$) e as fibras descontínuas ou curtas possuem comprimentos menores que este. Para as fibras de comprimento menores em relação ao l_c , a deformação da matriz ocorre em torno da fibra, o que resulta em uma transferência de tensão quase insignificante. Nesse caso, o reforço proporcionado pela fibra é mínimo(17). O comprimento crítico da fibra pode ser calculado usando a Equação 2.2.

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (2.2)$$

Onde:

l_c : Comprimento crítico da fibra;

σ_f : Limite de resistência à tração da fibra;

d – Diâmetro da fibra;

τ – Tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz.

Conforme ilustrado na figura 17, os compósitos reforçados por fibra natural também podem ser classificados de acordo com o comprimento da fibra. as fibras contínuas estão alinhadas e as fibras descontínuas podem estar alinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. Uma distribuição uniforme das fibras proporciona melhores propriedades gerais dos compósitos (17)(36).

A previsão das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas, como o módulo de elasticidade, pode ser realizada com base na regra das misturas(23). A falha do compósito se inicia conforme as fibras começam a fraturar, o

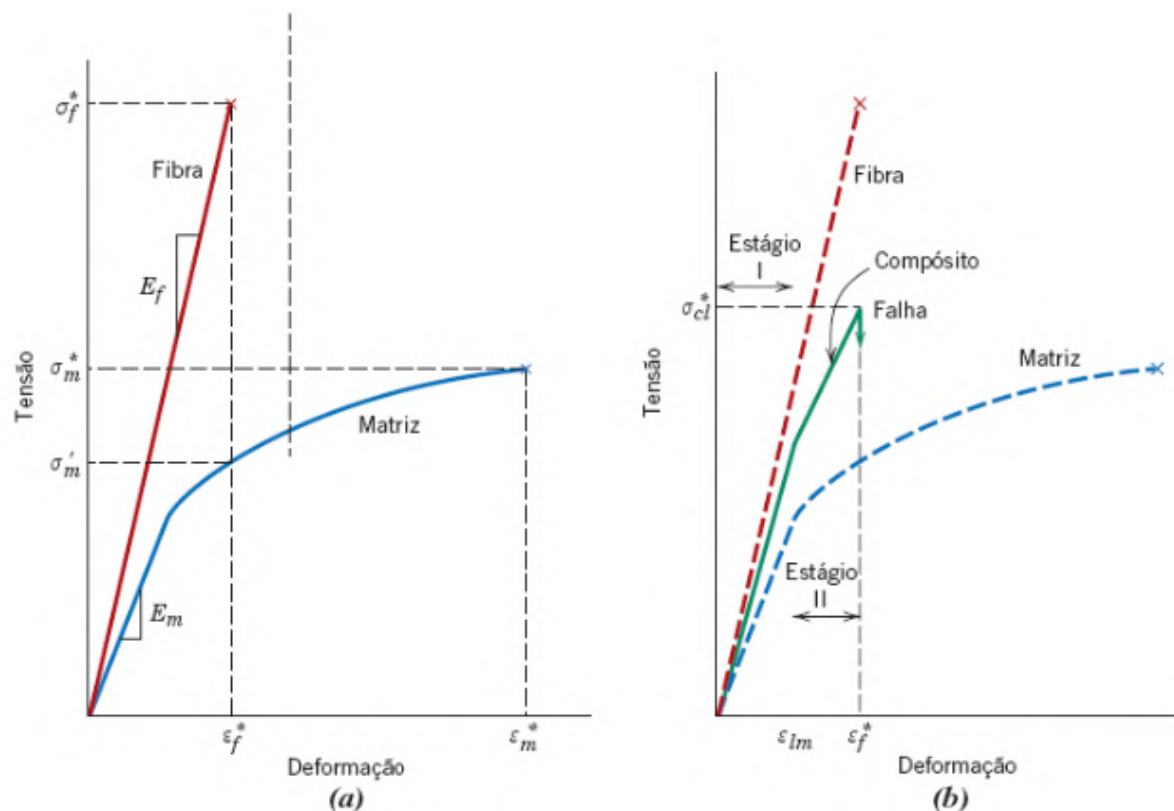


Figura 18 – (a) Curvas tensão-deformação esquemáticas para materiais com uma fibra frágil e uma matriz dúctil.(b) Curva tensão-deformação esquemática para um compósito reforçado com fibras alinhadas (17).

que corresponde a uma deformação de aproximadamente ε_f^* , ilustrada na figura 18.

Um compósito geralmente não apresenta uma falha catastrófica pelo fato de nem todas as fibras fraturarem juntas e mesmo após a falha da fibra a matriz permanece inteira, as fibras mais curtas, ainda envolvidas na matriz, são capazes de suportar a carga, mais reduzida, enquanto a matriz se deforma plasticamente (17).

2.6.1 Compósitos de poliméricos com fibras de linho

Em 1939, Norman De Bruyne publicou resultados inovadores em compósitos de linho/fenólicos, referidos como Gordon Aerolite. Inicialmente, um dos objetivos era desenvolver hélices aeronáuticas moldadas de passo variável para Haviland. De Bruyne, foi um pioneiro na área de compósitos de fibras vegetais e materiais compósitos para aplicações estruturais. Ele fundou a Cambridge Airplane Company em 1931, que se tornou Aero Research Limited em 1934 (30).

As fibras de linho foi utilizada para substituir as fibras de algodão por apresentarem melhor desempenho, mesmo seus comprimentos e diâmetros sendo semelhantes. As fibras de linho têm um ângulo de microfibrilas menor, 20–30° para o algodão e apenas 10° para o

Tabela 6 – Compósitos unidirecionais reforçados por tricomas de algodão ou fibras de linho. Propriedades longitudinais de compressão e tração

| Matriz | Reforço | Ano de publicação | volume de fibra (%) | Resistência à tração (MPa) | Resistência ao Cisalhamento (MPa) |
|-------------------|---------|-------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| fenol formaldeído | Algodão | 1937 | - | 172 | 40 |
| fenol formaldeído | Linho | 1939 | ~70 | 310 | 35 |

Fonte: Adaptado(30)

linho. É válido ressaltar que, infelizmente, não houve avanços significativos no desempenho dos compósitos unidirecionais de linho desde o ano de 1939. As propriedades apresentadas ainda se encontram na mesma ordem de grandeza(30).

As fibras extraídas das plantas de linho, destinadas a serem empregadas como reforço apresentam duas peculiaridades distintas: são descontínuas e organizadas em feixes. O linho se destaca entre as fibras vegetais pelo seu comprimento ($L_f > 20$ mm) . Além disso, do ponto de vista mecânico, as fibras de linho são anisotrópicas, ou seja, suas propriedades mecânicas longitudinais são consideravelmente superiores às suas propriedades transversais(30).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Aspectos gerais

Este estudo se dispõe-se a avaliar propriedades mecânicas, físicas e balísticas de um compósito constituído de resina fotopolimerizável utilizada para manufatura aditiva e reforçado com fibras de linho, produzido através do método de MA por polimerização em cuba com o processo de DLP, averiguando a viabilidade de produção e o comportamento dos materiais nestas condições.

3.2 Fibra de linho

As fibras de linho utilizadas nesse trabalho foram adquiridas de forma comercial e disponibilizadas na forma de tecido comercializado pela empresa Linhos Gold. O tecido foi desfiado a fim de serem separadas as linhas de fibra de linho, a figura 19 ilustra o tecido adquirido e seu desfiamento:



Figura 19 – (A) Tecido de linho como recebido, (C) em processo de desfiamento e linhas desfiadas.

fonte: Autor

O processo de preparação das fibras antes de ser incorporada a resina fotossensível para a impressão, ocorre basicamente as etapas de separação dos fios, corte, desidratação e peneiração conforme o esquema ilustrado na figura 20.

As fibras foram moídas no laboratório do IMA - UFRJ, utilizando as facas para que a fibra ficasse no menor tamanho disponível, a fim de conseguir incorporá-la da forma mais homogênea possível à resina. As fibras descontínuas e orientadas aleatoriamente

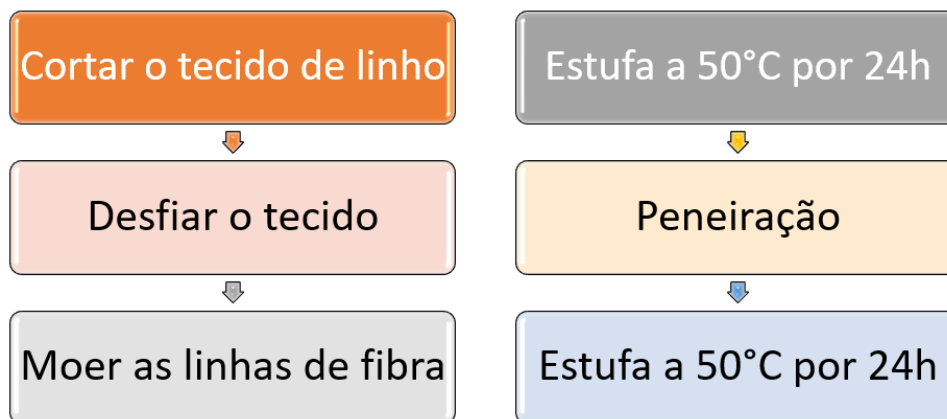


Figura 20 – Processo de preparo das fibras de linho

fonte: Autor



Figura 21 – Fibras no processo de moagem e as fibras algumas horas após a moagem.

fonte: Autor

podem ter sua eficiência de reforço limitada, mas apresentam uma vantagem significativa: são isotrópicas, ou seja, independentes da direção em que a tensão é aplicada. Isso torna possível o uso desses compósitos em aplicações que envolvam tensões aplicadas de forma multidirecional.

Além disso, esses materiais apresentam vantagens no processo de fabricação, permitindo a conformação de formas mais complexas e com custos menores do que as fibras contínuas e alinhadas. Os compósitos com um reforço descontínuo e aleatório podem apresentar versatilidade, baixo custo, e atenuar a demanda por material polimérico de



Figura 22 – Fibras no processo de peneiração

fonte: Autor

origem não renovável(37).

Devido às características hidrofílicas, comum nas fibras lignocelulósicas, as fibras de linho apresentaram uma absorção de umidade que estava impossibilitando a peneiração para que fosse realizada a impressão.

Desta forma, as fibras foram expostas à temperatura de 50°C a fim de desidratar a fibra para facilitar a peneiração sem que ocorresse a degradação da mesma. As fibras são peneiradas e retorna a exposição de 50°C por 24h, para que ocorra uma padronização no processo, e então são incorporadas à resina no momento da impressão.

Os compósitos estão sendo preparados com 1% 1,5% 2% 2,5% em volume de fibras e o volume está sendo elevado gradualmente com o objetivo de conseguir produzir os compósitos com 5% em volume de fibras de linho.

3.3 Resina fotopolimerizável

Para preparar as amostras por manufatura aditiva foi usado uma resina 3D Azul Opaca (405 nm), ilustrada na figura 24, fornecida pela D3M INDUSTRIA E COMERCIO LTDA. Este polímero é produzido para impressoras que operam com a tecnologia de processamento digital da luz SLA, DLP ou LCD. O material proporciona alta velocidade de polimerização, de cura e qualidade final da impressão(38).

O fabricante disponibiliza as informações de composição e propriedades físico-químicas, e estão listadas na tabela 7.

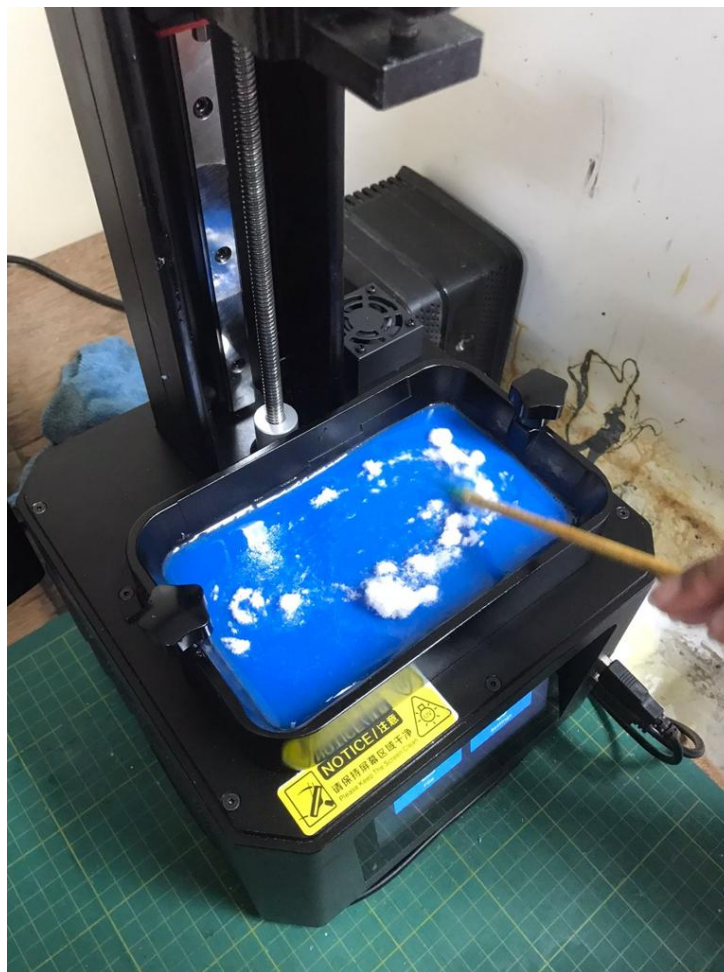


Figura 23 – Encorporeção da Fibra à resina
fonte: Autor

A quantidade de resina utilizada é indicada pela própria impressora de acordo com o modelo digital a ser produzido. Em média, são utilizados cerca de 145g de resina para cada impressão realizada. A fibra é encorporeada à resina de forma manual e aos poucos a fim de a mistura fique homogênea e apta para a impressão.

3.4 Metodologia para Manufatura Aditiva

Para iniciar a produção, é necessário uma sequência de processos para que ocorra a realização da MA corretamente. De modo geral, as etapas que fazem parte do processo de MA são: elaboração do modelo digital, conversão para o formato “.stl”, fatiamento, correção de erros de projeto/fatiamento e impressão.

O modelo digital que foi elaborado pelo software CAD é convertido para o formato ".stl" que pode ser traduzido como Linguagem de Triângulo Padrão que é considerado como idioma de mosaico padrão e arquiva informações sobre a geometria e superfície do modelo. Para a conversão do modelo digital produzido foi utilizado o software Fursion 360



Figura 24 – Fotopolímero utilizado na MA (3D Fila Azul Opaca) (38).

fonte: Adaptado de 3D Fila 2023

Tabela 7 – Informações técnicas da resina fotopolimerizável 3D fila.

| | |
|---|----------------------|
| Aparência | Líquido azulado |
| pH | 6,8 7,3 |
| Ponto de fusão / Ponto de congelamento | < 0°C |
| Ponto inicial de ebulição e range de ebulição | > 200 °C |
| Monomeros Acrilados | > 90% |
| Fotoiniciadores | < 5% |
| Pigmentacao | < 2% |
| Odor | Suave, como um éster |
| Densidade relativa | 1,08 1,14 (água = 1) |
| Viscosidade | 190 500 cps a 25 °C |
| Massa específica a 20 °C – kg/m ³ | 1122,2 |

Fonte: Adaptado de 3D Fila 2023

– AutoDesk®.

Após a etapa de conversão, o arquivo em formato ".stl" foi carregado no programa LycheeSlicer® que gera códigos "G" baseados nas informações do arquivo. O código gerado se assemelha aos códigos de máquina CNC, definindo o movimento da extrusora e a direção da plataforma durante a impressão. Através do fatiamento que o programa proporciona é possível verificar a viabilidade e qualidade das peças que serão impressas. Para identificar erros de projeto após o processo de fatiamento e corrigir-los, foi utilizado o software UVTools® que faz uma varredura pixel a pixel de cada camada gerada no arquivo ".stl" e os erros podem ser corrigidos pelas ferramentas oferecidas na plataforma.

Após as etapas de elaboração e preparação do modelo digital, passamos para a

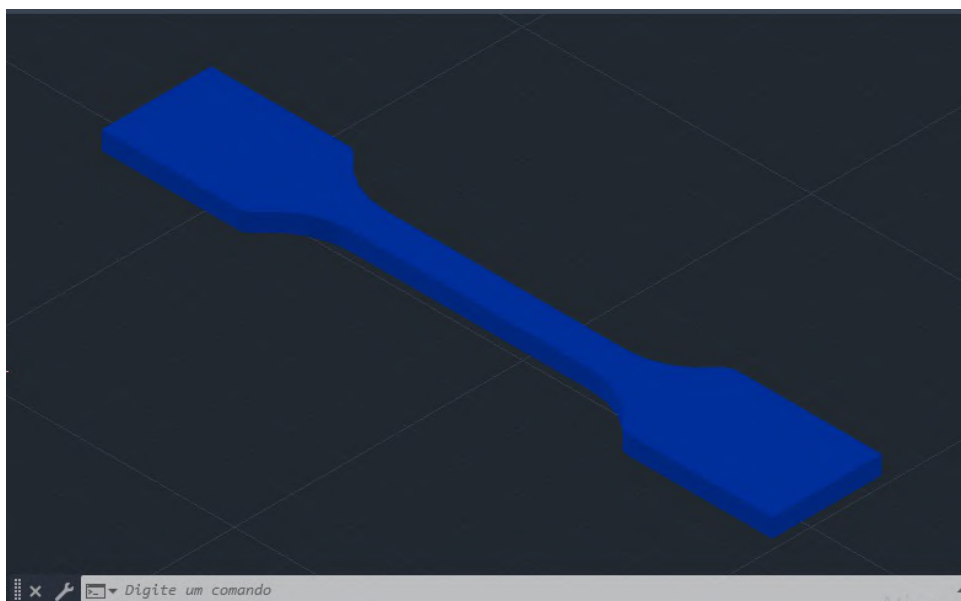


Figura 25 – Modelos digitais das amostras obtidas através do software AutoCAD®. Corpo de prova de tração

fonte: (3)

etapa de impressão. Neste trabalho está sendo utilizado a impressora 3D da marca Creality modelo Halot One CL-60, apresentada na Figura 28.

A impressora é configurada com parâmetros segundo as indicações do fabricante do equipamento e da resina utilizada que estão listados na Tabela 8.

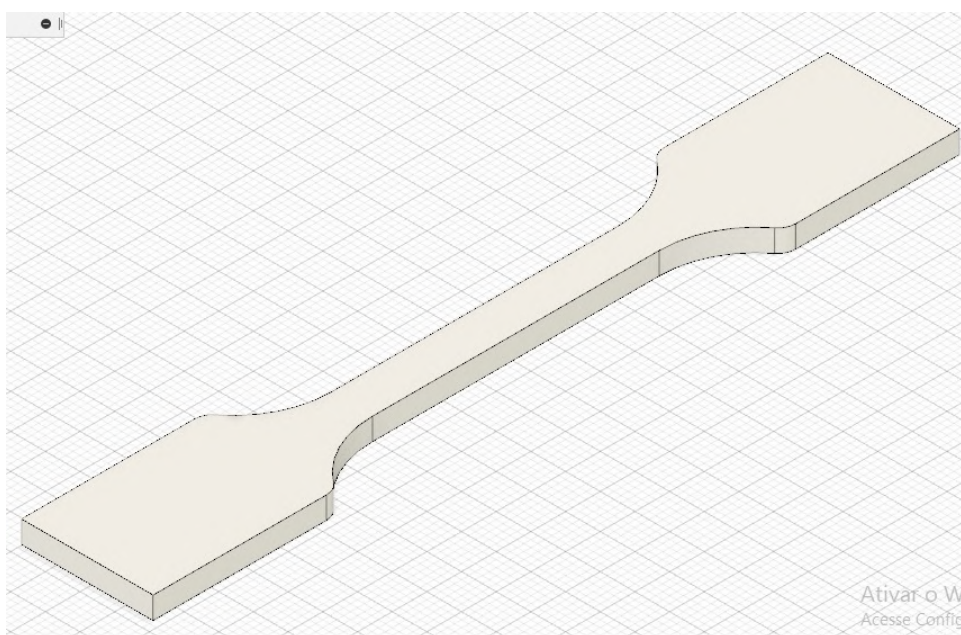


Figura 26 – Modelos digitais para conversão no software Fusion 360®.Corpo de prova de tração

fonte: (3)

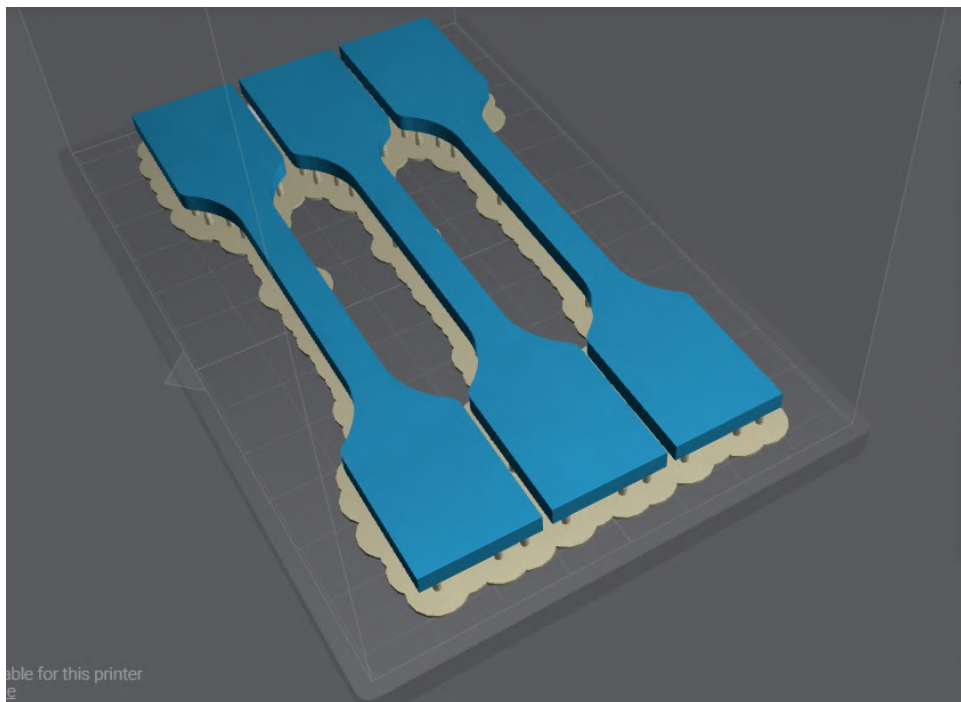


Figura 27 – Utilização do Software LycheeSlicer® para realizar o fatiamento dos projetos das amostras. Corpos de prova de tração.

fonte: (3)

Ao término da impressão as amostras são retiradas da impressora e passadas no álcool a fim de retirar a peça do suporte e remover excesso de resina, quando necessário. Então, são levadas ao banho de luz UV a fim de realizar o processo de pós-cura da resina. As amostras ficaram expostas sob luz UV (405 nm) durante 12 horas, colocadas em posição estratégica para que a maior parte da superfície da amostra esteja exposta à luz UV.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados para impressão das amostras.

| Parâmetros | Valores |
|---------------------------------------|----------------|
| Temperatura de operação | 25°C |
| Tempo de exposição da camada inferior | 58 s |
| Atraso na tela | 5 s |
| Tempo de exposição | 5 s |
| Espessura da camada inferior | 6 mm |
| Velocidade do Motor | 4 mm/s |

Fonte: Adaptado de (3)



Figura 28 – Impressora 3D utilizada para fabricação das amostras. (3).

3.5 Ensaios Mecânicos

Na tabela 9 segue a projeção da ordem dos ensaios a serem realizados e a quantidade de amostras a serem fabricadas para cada compósito.

Tabela 9 – Planejamento dos ensaios a serem realizados

| Ensaio | Quant. Amostras |
|--|-----------------|
| Tração 0%, 1%, 1,5% , 2% e 2,5% | <8 |
| Impacto 0%, 1%, 1,5% , 2% e 2,5% | <8 |
| Flexão 0%, 1%, 1,5% , 2% e 2,5% | <8 |
| TG 0%, 1%, 1,5% , 2% e 2,5% | Pó |
| DSC 0%, 1%, 1,5% , 2% e 2,5% | Pó |
| DMA 0%, 1%, 1,5% , 2% e 2,5% | 3 |
| Velocidade residual 0%, 1%, 1,5% , 2% e 2,5% | <8 |

3.5.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram desenvolvidos conforme norma ASTM D638-14 (2015), onde os CPs são fabricados nas dimensões indicadas pela norma (39).

Foram produzidos 10 corpos de prova por manufatura aditiva para cada fração de fibra conforme escrito em 3.2. Os parâmetros geométricos utilizados foram os disponíveis na norma ASTM D638-14 (2015), segundo a tabela10 e a Figura29. A figura 30 apresenta corpos de prova recém impressos.

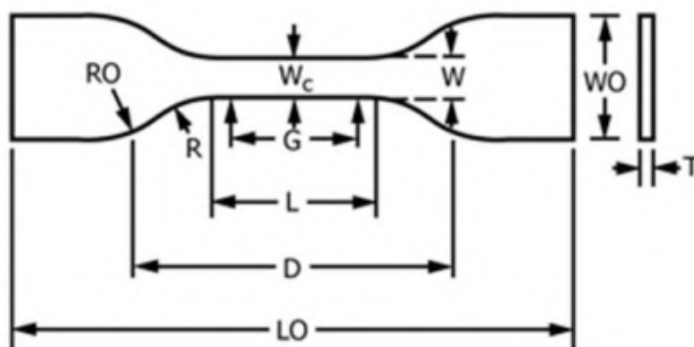


Figura 29 – Geometria adotada para produção dos corpos de prova(3).

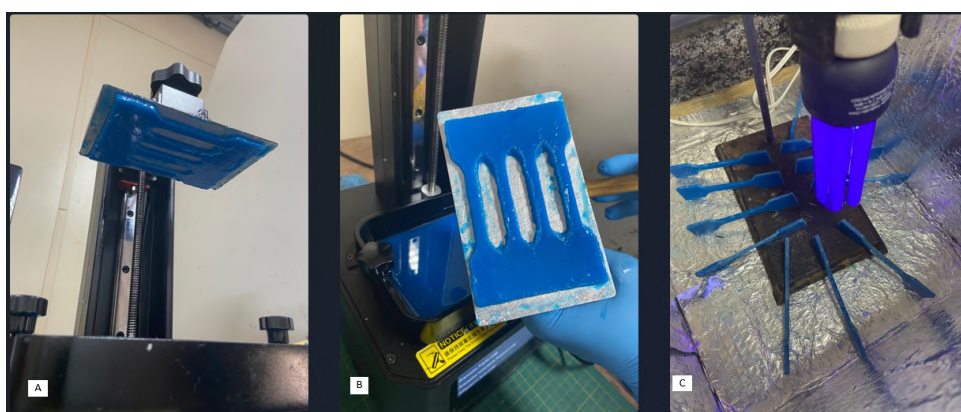


Figura 30 – Impressão recém finalizada (A) e (B), amostras em banho de luz UV (C).

Tabela 10 – Dimensões das amostras para ensaio de tração (mm)

| Dimensões do corpo de prova | Espessura T = 3,0 mm |
|-----------------------------------|----------------------|
| W – Largura da seção estreita | 6 mm |
| L – Comprimento da seção estreita | 33 mm |
| WO – Largura geral | 19mm |
| LO – Comprimento geral | 115 mm |
| G – Comprimento do medidor | 25 mm |
| D – Distância entre garras | 65 mms |
| R – Raio do filete | 14 mm |
| R0 – Raio Externo | 25 mm |

Fonte: Adaptado de (3)

O objetivo deste ensaio é obter parâmetros como tensão máxima (σ_{max}), módulo de elasticidade longitudinal (E), deformação máxima percentual (ϵ) e obter informações para a plotagem das curvas tensão-deformação relativa as amostras.

As variáveis a ser obtidas estão associadas às fórmulas:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

Onde:

σ_{max} : Tensão máxima de engenharia;

F_{max} : Carga máxima;

A_0 : Área inicial da seção reta do corpo de prova;

E: Módulo de elasticidade;

σ, ε : Tensão e deformação associada na região elástica.

A impressora foi configurada com parâmetros, apresentados na tabela 3.5.1, segundo as indicações do fabricante do equipamento e da resina utilizada e foram adaptados à medida que se aumentava a fração de fibra adicionada, a fim de evitar falhas de adesão e descolamento de camadas regulares das camadas inferiores.

Tabela 11 – Parâmetros utilizados para impressão das amostras de tração.

| Parâmetros | 0% | 0.5% | 1% | 1,5% | 2% |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tempo de exposição da camada inferior | 60s | 60s | 60s | 60s | 60s |
| Atraso na tela | 5s | 5s | 5s | 5s | 5s |
| Tempo de exposição | 5 s | 5,5s | 6s | 7s | 8s |
| Espessura da camada inferior | 6 s | 6 s | 6 s | 6 s | 6 s |
| Velocidade do Motor | 8 mm s | 8 mm s | 8 mm s | 8 mm s | 8 mm s |

Fonte: Autor

Fonte: Adaptado de (3)

3.5.2 Ensaio de impacto Charpy

O método de ensaio de impacto foi aplicado com o intuito de mensurar a tenacidade dos compósitos fabricados, obtendo a energia em J/m liberada na fratura. A resistência ao impacto é definida como a energia absorvida dividida pela área da seção intermediária (40). A realização deste ensaio será conforme a norma ASTM D256-10 (2018), serão produzidas nas dimensões 63,5mm, 12,7mm e 10mm e o entalhe com 45°(41), a geometria e as dimensões adotadas para os CPs estão representadas pela FIG.31.

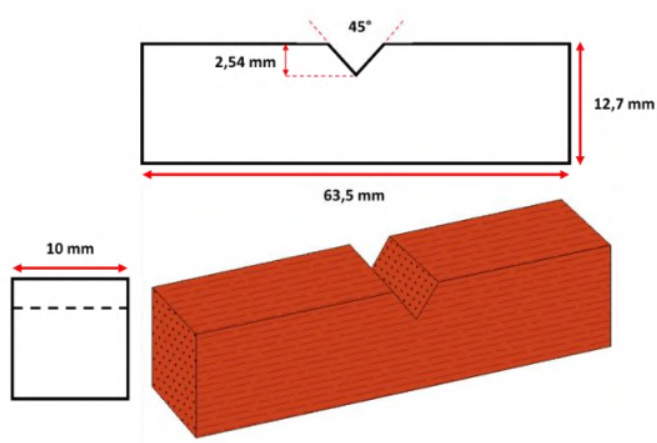


Figura 31 – Geometria adotada para produção dos corpos de prova(26).

O ensaio consiste em submeter o corpo de prova a carga, provocando a sua fratura. Na utilização de um pêndulo instrumentado, com martelo de 22 joules que atingirá o corpo de prova. O corpo de prova é fixado por um par de garras na posição vertical. O entalhe central do CP é posicionado na face que recebe o impacto.

Para a confecção dos corpos de prova, foram adotados os parâmetros de impressão descritos na tabela 12 e a figura 34 apresenta as amostras impressas e prontas para o ensaio.

Tabela 12 – Parâmetros utilizados para impressão das amostras.

| Parâmetros | 0% | 0.5% | 1% | 1,5% | 2% |
|---------------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| Tempo de exposição da camada inferior | 60s | 60s | 60s | 60s | 60s |
| Atraso na tela | 5s | 5s | 6s | 6s | 7s |
| Tempo de exposição | 5 s | 5,7s | 6s | 6,7s | 7s |
| Espessura da camada inferior | 6 s | 6 s | 6 s | 6 s | 6 s |
| Velocidade do Motor | 6 mm s | 6 mm s | 6 mm s | 6 mm s | 6 mm s |

Fonte: Autor

3.5.3 Ensaio de Flexão

O ensaio será realizado com o objetivo de avaliar as propriedades de flexão dos materiais compósitos fabricados, para obter curvas precisas de tensão versus deformação. A partir desses resultados, determinar as resistências à flexão e os módulos de elasticidade dos materiais analisados. Os Ensaios de flexão 3-pontos serão realizados conforme a norma ASTM D790–17. Os CP terão seção reta retangular constante, comprimento de 127mm, largura de 13mm e espessura 3mm, conforme ilustrado na figura 33. Um corpo de prova é colocado sobre dois suportes em uma posição plana e é submetido a uma carga localizada



Figura 32 – Corpos de prova para ensaio de impacto compósito 2% de fibra de linho.

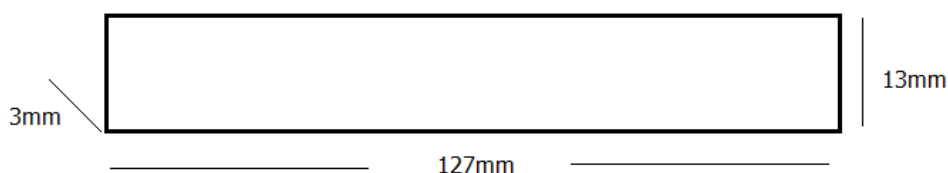


Figura 33 – Geometria adotada para produção dos corpos de prova.

no meio do caminho entre os suportes. O corpo de prova é defletido até que ocorra ruptura na superfície externa do corpo de prova ou até que uma deformação máxima, antes do limite de 5% de deformação (42).

3.6 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura será utilizada para analisar as fibras utilizadas, o comprimento das fibras depois de moídas para uma possível comparação com o comprimento crítico da fibra, e sua heterogeneidade e para estudar as superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados para investigar os possíveis mecanismos de falha atuantes no material. Pela falta de condutividade das fibras naturais e dos compósitos poliméricos, é necessário realizar um recobrimento de tungstênio nas superfícies desejadas.

3.7 Análises Térmicas

3.7.1 Análise termogravimétrica (TGA)

Os compósitos produzidos foram cominuídos, conforme a figura 36 e colocados em cadinho de platina para a realização da análise termogravimétrica, com o objetivo de determinar as temperaturas de degração, através do equipamento Shimadzu modelo DTG-60H, pertencente à Divisão de Materiais Energéticos e Polímeros do Instituto de



Figura 34 – Amostras para ensaio de flexão.

fonte: Autor

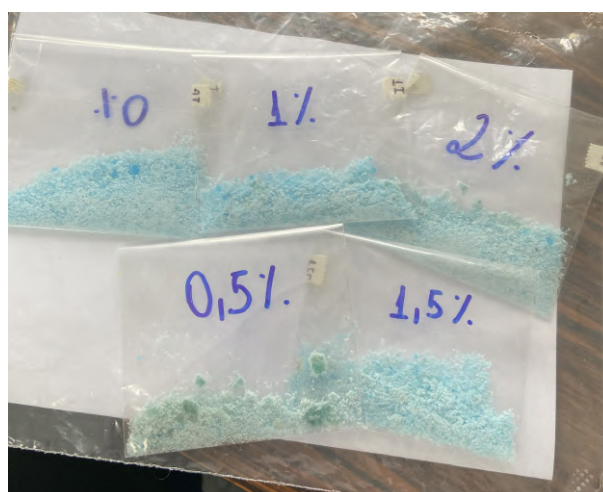


Figura 35 – Amostras dos compósitos cominuídas para TGA e DSC.

fonte: Autor

Pesquisas da Marinha (IPqM) e operado em atmosfera de nitrogênio a uma taxa de aquecimento de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e fluxo de $50[\text{ml}/\text{min}]$ no intervalo de temperatura de 25°C a 800°C .

3.7.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Para as análises de DSC os compósitos cominuídos, conforme a figura 35, foram acondicionados em cadinho de alumínio e destinadas à análise no equipamento Shimadzu



Figura 36 – Amostra do compósito 0,5% cominuída para TGA.

fonte: Autor

modelo DSC – 60, pertencente à Divisão de Materiais Energéticos e Polímeros do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) e operado em atmosfera de nitrogênio a uma taxa de aquecimento de 5°C/min e fluxo de 50[ml/min] no intervalo de temperatura de 25°C a 550°C.

3.7.3 Análise dinâmico-mecânica (DMA)

A análise dinâmico-mecânica foi empregada com o intuito da determinação dos parâmetros de módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E''), tangente delta ($\text{Tan}\delta$), como também determinar de uma forma direta a temperatura de transição vítrea (T_g) dos materiais estudados.

As amostras de compósitos para a análise de DMA foram preparadas com corpos de prova medindo 65x12x3,5 mm nas frações de 0%,0,5%,1%,1,5% e 2% de fibra de linho através da MA, conforme as figuras 37A e B.



Figura 37 – (A) Amostras para DMA recém impressa. (B) Amostras dos compósitos para DMA.

fonte: Autor

O modo de ensaio foi a flexão em três pontos para amostras fixas por uma das extremidades (“single cantilever”). O ensaio foi realizado no Laboratório de Macromoléculas e Colóides na Indústria do Petróleo (LMCP) - UFRJ. Foram utilizados os seguintes parâmetros de ensaio: Frequência = 1,0 Hz; Deformação = 0,05%; Taxa de aquecimento = 5° C/min; Atmosfera = Nitrogênio.

3.8 Ensaio balístico de velocidade residual

Para o ensaio foram produzidas placas de compósitos nas dimensões de 68x55x7 mm, conforme a figura 39, com frações volumétricas de reforço de fibra de linho 0,5%, 1%, 1,5% e 2% , sendo 10 placas em cada condição, totalizando 40 amostras para cada condição a ser analisada.

Para os testes foram realizados no Centro de Avaliações do Exército – CAEx, através de um radar Doppler WEIBEL SL-520P pertencente ao Centro de Avaliações do Exército (CAEx). Foi utilizado projétil de calibre 9mm com distância do alvo de 5 metros, figura 38. Foram considerados 8 disparos em cada grupo analisado para a determinação da velocidade residual.

3.9 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância será utilizada para analisar a existência de diferenças significativas entre as médias dos valores obtidos entre as propriedades apresentadas pelos compósitos fabricados. Será adotado para os testes o nível de confiabilidade de 95% e 5% de significância. A análise será utilizada para analisar os dados obtidos nos ensaios de tração, impacto, flexão e energia absorvida.



Figura 38 – Placa compósita presa na estativa.

fonte: Autor



Figura 39 – Amostra para ensaio de velocidade residual produzidas por MA.

fonte: Autor

Os graus de liberdade: - de tratamento: $k-1$;

- do total: $n-1$ ($n=kr$);

- do resíduo: $(n-1)-(k-1)=n-k$

GL: número de graus de liberdade;

k : número de tratamentos (percentuais de fibras aplicadas como reforço);

r : número de repetições do tratamento;

Tabela 13 – Parâmetros para análise de variância (ANOVA).

| Causa de Variação | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F Calculado | F Crítico |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
| Tratamentos | $SQTr$ $\frac{\Sigma T^2}{r} - C$ | QMT $\frac{SQTr}{k-1}$ | QMT/QMR | Tabela F (5% de signif.) |
| Resíduo | SQR $SQT - SQTr$ | QMR | | |
| Total | $SQT0$ $\Sigma y_2 - C$ | | | |

Quando o valor de F calculado for inferior ao F crítico (tabelado), assume-se que as médias dos resultados dos tratamentos aplicados não apresentam diferença significativa entre si ao nível de significância de 5%. Quando o valor de F calculado se apresenta superior ao F tabelado, concluindo-se que ao nível de significância de 5% ou nível de confiabilidade de 95% que há diferença entre as médias dos tratamentos aplicados.

Neste caso, a utilização do Teste de Tukey permite a comparação entre as médias obtidas dois a dois, para cada um dos tratamentos empregados. A partir dos resultados é possível rejeitar ou não a hipótese de igualdade entre as médias comparadas através da diferença mínima significativa (d.m.s.).

$$d.m.s = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (3.3)$$

Onde:

q: é um valor dado em uma tabela;

QMR: quadrado médio do resíduo;

r: número de repetições de cada tratamento.

Com este teste é possível determinar de forma comparativa a influência do teor de fibras utilizadas na produção do compósito, possibilitando averiguar qual compósito apresentou melhor resultado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de Tração

Foram obtidos resultados para o ensaio de tração dos compósitos reforçados com fibras de linho nas frações de 0%, 0,5%, 1%, 1,5% e 2% em volume de fibra. a figura 40 apresenta os corpos de prova de cada fração de fibra rompidos após ensaio.

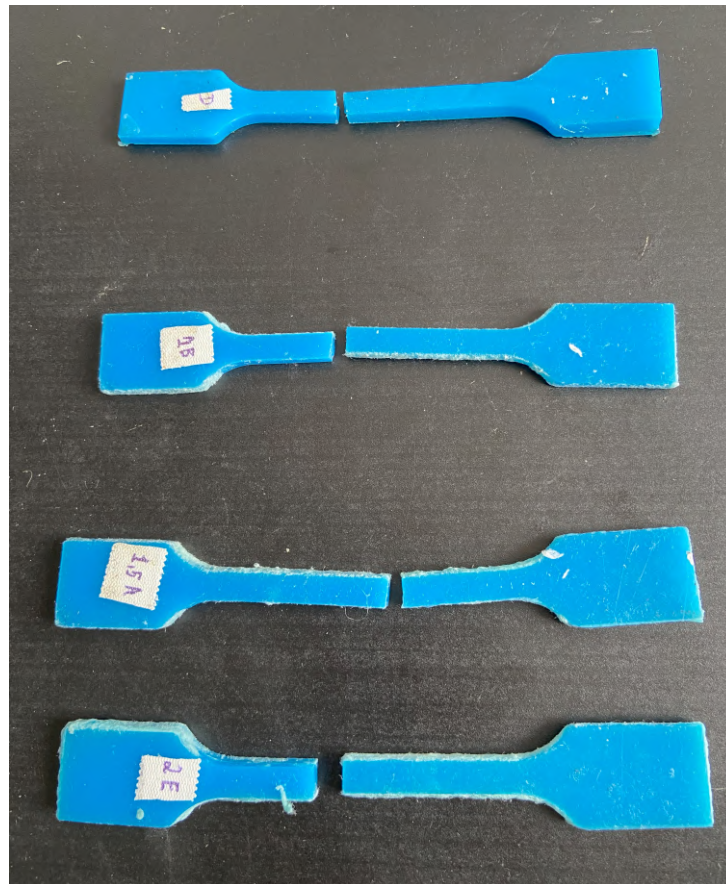


Figura 40 – Corpos de prova rompidos após ensaio de tração

fonte: Autor

A Figura 41 apresenta as curvas correspondentes aos resultados de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação percentual apresentados na Tabela ?? Pode-se observar uma redução das propriedades conforme ocorre o aumento da fração de fibras. A Tabela 14 ilustra os valores médios para as propriedades mecânicas apresentadas pela resina e compósitos com diferentes frações mássicas de fibra de linho.

É possível entender que situação apresentada ocorre pelo fato da possibilidade da fibra adicionada ser descontínua (43) ou também por não ter sido exposta a um tratamento químico, físico ou biológico para melhorar suas propriedades (44)(45).

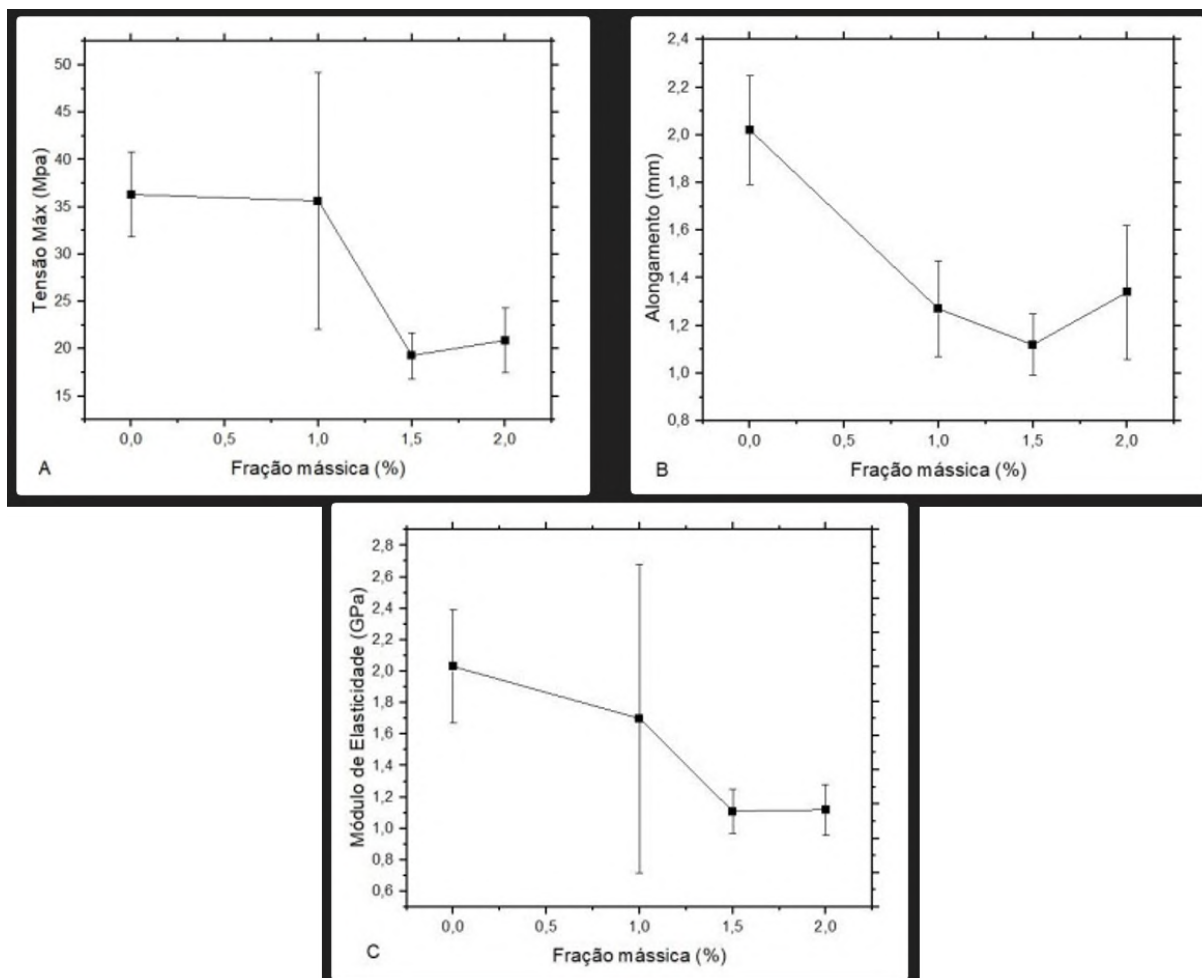


Figura 41 – Resistência à tração máxima em função da fração mássica da fibra de linho (A), deformação máxima em função da fração mássica da fibra de linho (B), módulo de elasticidade máxima em função da fração mássica da fibra de linho (C).

fonte: Autor

O compósito que apresentou tensão máxima mais próxima da resina pura foi o que possuía 1% de fibra com 36,98 MPa, seguindo com um declínio mais significativo em 1,5% com 19,29 MPa e um leve aumento em 2% com 20,9 MPa, mas ainda abaixo das propriedades apresentadas pela resina. As deformações e os módulos de elasticidade dos compósitos fabricados se apresentaram menores como a tensão máxima obtida conforme Figura 41A.

Ao analisar as micrografias apresentadas pelo compósito com 2% de fração mássica de fibra de linho que apresentou maiores propriedades comparadas aos outros compósitos ensaiados, na Figura 42 (A), é possível identificar regiões com duas características diferentes.

Uma região caracterizada por marcas longitudinais comum a fratura frágil e regiões com fratura interfibrilar sem a apresentação de marcas de rio e com a presença das fibras, que dificultaram a propagação da trinca que surgiu durante a tração. Ainda é possível

Tabela 14 – Propriedades de flexão dos compósitos.

| Amostra | Resistência à Tração(MPa) à Tração(MPa) | Módulo de elasticidade(GPa) |
|---------|--|--------------------------------|
| CP 0 | 33,02± 7,42 | 1,12±0,14 |
| CP 0,5 | 24,41 ±3,76 | 1,15±0,09 |
| CP 1 | 35,62±25,98 | 1,71 ±0,98 |
| CP 1,5 | 20,36± 2,12 | 1,17±0,07 |
| CP 2 | 20,90± 3,37 | 1,12±0,16 |

Fonte: Autor

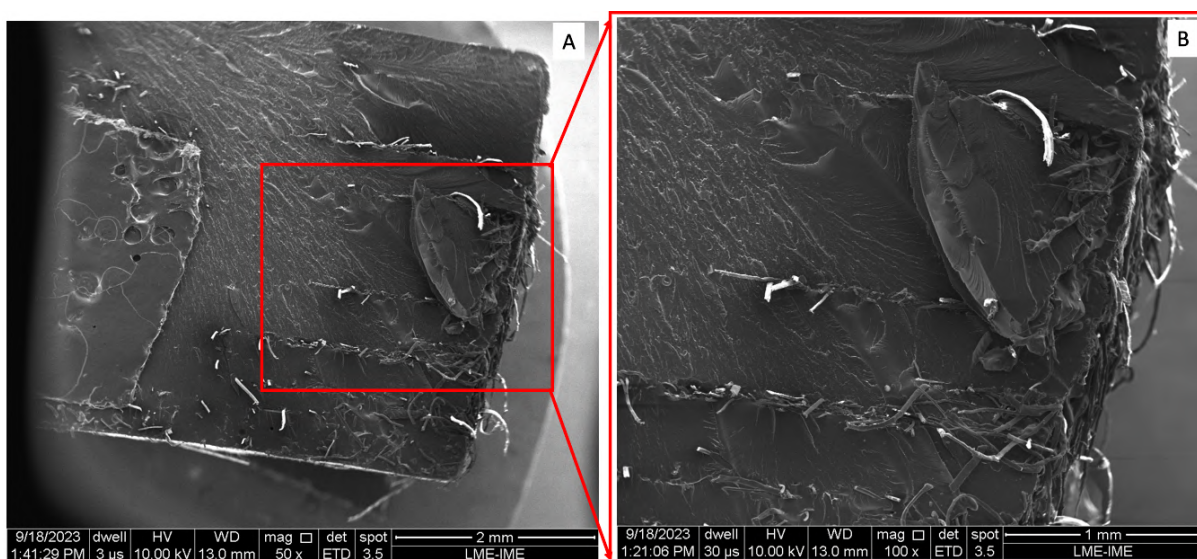


Figura 42 – Micrografias da superfície da fratura do corpo de prova (2de fibras ensaiado por tração). (a)50x (b)100x.

fonte: Autor

observar que as fibras se apresentam em camadas sequenciais conforme as camadas geradas pelo processo de manufatura aditiva utilizado.

Tabela 15 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as resistências à tração dos compósitos obtidas nos ensaios de Tração

| SQT | SQR | F calculado | F tabulado |
|------|---------|-------------|------------|
| 5948 | 4559,83 | 2,28 | 2,69 |

Fonte: Autor

4.2 Ensaio de Impacto

Na Tabela 16, são apresentados os resultados médios de energia absorvida pelos compósitos, obtidas nos ensaios de impacto Charpy.

Tabela 16 – Energia média absorvida e desvio padrão obtidos nos ensaios de impacto Charpy dos compósitos.

| Amostras | Energia média absorvida (kJ/m ²) |
|----------|--|
| 0% | 3,21± 0,62 |
| 0,5% | 2,01± 0,74 |
| 1% | 2,08± 0,48 |
| 1,5% | 2,20± 0,69 |
| 2% | 1,66± 0,51 |

Fonte: Autor

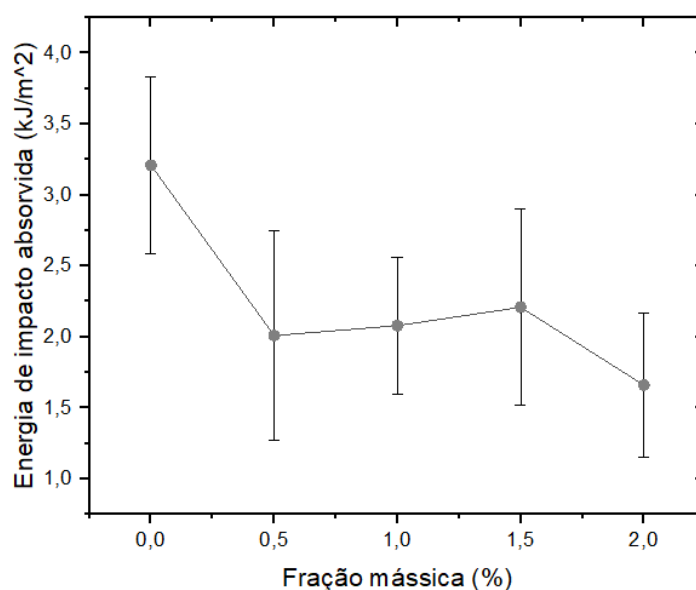


Figura 43 – Energia de impacto charpy em função das frações mássicas de fibras de linha dispostas nos compósitos.

fonte: Autor

Ao analisar os dados apresentados pela tabela 16 e a figura ??, nota-se uma diminuição da energia absorvida em relação à fração de fibras nos compósitos quando comparados a resina fotossensível pura. Além disso, é possível observar diminuição do desvio padrão em relação aos valores de cada fração apresentada.

A fim de corroborar essa observação e verificar se existem diferenças significativas entre as energias dos compósitos, foi utilizado o teste de análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5

Ao analisar os dados apresentados pela tabela 16 e figura ?? nota-se uma diminuição da energia absorvida em relação à fração de fibras nos compósitos quando comparados a resina fotossensível pura. Além disso, é possível observar diminuição do desvio padrão em relação aos valores de cada fração apresentada. Todos os corpos de prova submetidos ao ensaio sofreram ruptura completa, validando os resultados obtidos.

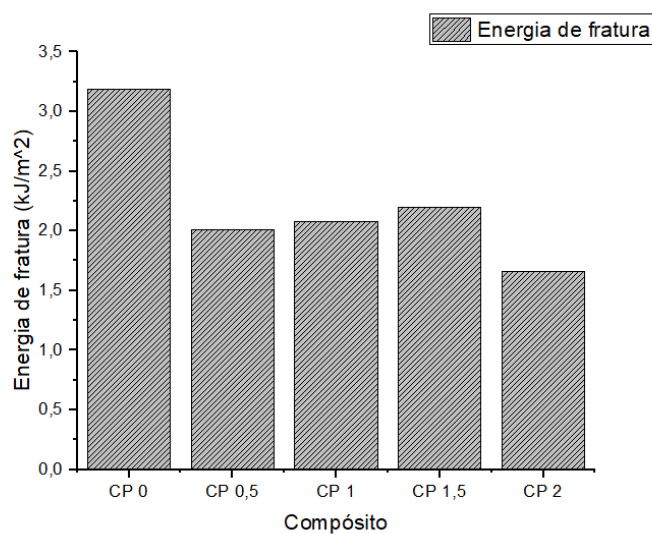


Figura 44 – Comparação das energias de fratura dos compostos, obtidas nos ensaios de impacto Charpy.

fonte: Autor

Tabela 17 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as resistências ao impacto dos compostos obtidas nos ensaios de impacto Charpy

| SQT | SQR | F calculado | F tabulado | Q tabulado | DMS |
|-----|-------|-------------|------------|------------|------|
| 31 | 17,09 | 8,92 | 3,24 | 2,61 | 0,92 |

Fonte: Autor

A partir dos resultados do teste, mostrados na Tabela 17, como $F \gg F_{\text{crítico}}$, pode-se afirmar com 95% de confiança que há médias estatisticamente diferentes. A fim de comparar as energias absorvidas pelos compostos entre si, foi utilizado o teste de Turkey baseado na diferença mínima significativa (DMS) que deve haver entre duas médias para que elas sejam significativamente diferentes com nível de significância de 5%.

Todas as diferenças entre as energias dos compostos foram maiores que a DMS, confirmando a diminuição dessa propriedade com a redução de camadas de aramida e o aumento de camadas de curauá. Esse resultado já era esperado tendo em vista a superioridade das propriedades mecânicas da aramida em relação às fibras naturais, principalmente da resistência ao impacto (SAFRI et al., 2018).

De acordo com os valores obtidos pela análise de variância apresentados pela TAB. 4.12, rejeita-se a hipótese de equidade entre as médias com um nível de significância de 5%, pois $F_{\text{Calc}} = 0,64$ é consideravelmente menor que $F_{\text{Tab}} = 3,24$. Conclui-se que a fração volumétrica de fibras de linho presente nos compostos têm efeito direto sobre a energia de impacto apresentada por esses materiais.

Todos os corpos de prova submetidos ao ensaio sofreram ruptura completa, validando

os resultados obtidos. A Figura 45 apresenta os CPs após ensaio de impacto Izod.



Figura 45 – Comparação das energias de fratura dos compósitos, obtidas nos ensaios de impacto Charpy

fonte: Autor

A análise visual dos corpos de prova após rompimento confirma-se a ocorrência de fratura frágil para a resina pura, apresentando-se de uma superfície com aparência lisa e espelhada (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2016).

4.3 Ensaio de Flexão

Na Tabela 18, são apresentados os resultados de resistência à flexão (σ_{fm}) e módulo de flexão (E_B) dos compósitos. A Figura 46 apresenta um corpo de prova de cada fração de fibra produzido, após serem submetidos aos ensaios de flexão.

Tabela 18 – Propriedades de flexão dos compósitos.

| Compósito | Resistência Flexão, σ_{fm} (MPa) | Módulo flexão, E_B (GPa) |
|-----------|---|----------------------------|
| CP 0 | 65,09± 16,60 | 739,55±220,37 |
| CP 0,5 | 35,78 ±8,10 | 544,70±264,36 |
| CP 1 | 42,88± 11,78 | 813,41 ±194,38 |
| CP 1,5 | 23,95± 3,73 | 507,32±214,16 |
| CP 2 | 29,09± 14,18 | 452,74±401,82 |

Fonte: Autor

Ao se analisar os dados apresentados pela Tabela 18, se observa uma diminuição da resistência à flexão nos compósitos em relação à resina pura, também é observado, que entre os compósitos, ocorre o aumento do desvio padrão em relação aos valores

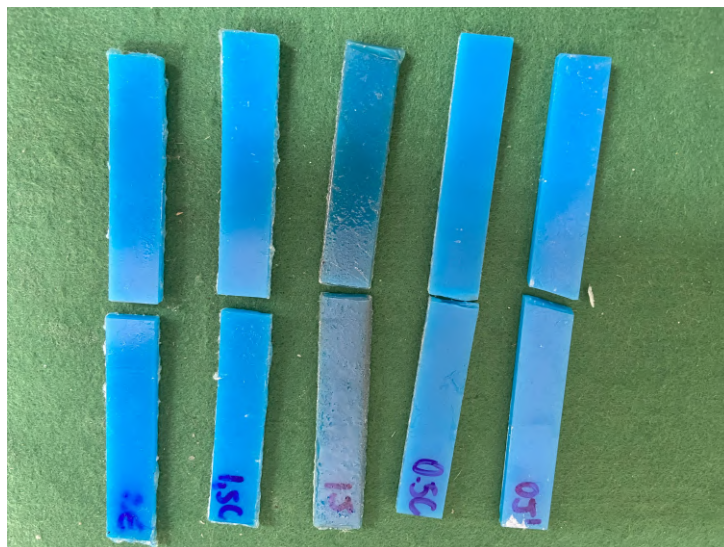


Figura 46 – Corpos de prova após ensaio de flexão

fonte: Autor

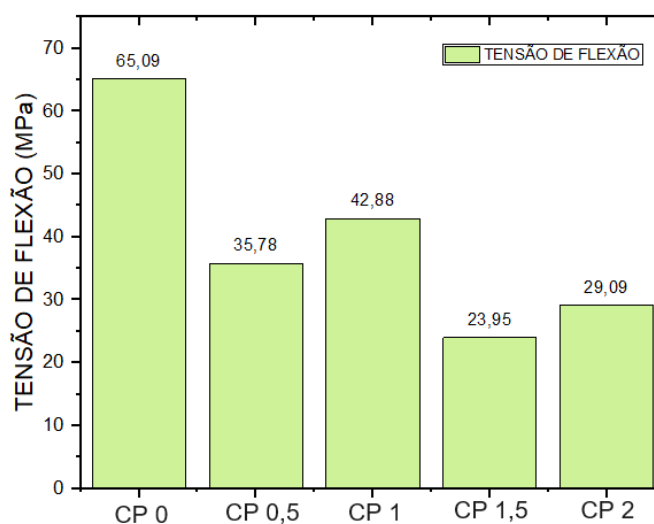


Figura 47 – Comparação das resistências à flexão dos compósitos, obtidas nos ensaios de flexão 3-pontos.

fonte: Autor

apresentados por cada fração ensaiada, fato que pode ser explicado pela variabilidade de propriedades apresentadas pelas FNLs, logo, conforme se aumenta sua concentração nos compósitos, pode ocorrer a elevação da variabilidade das propriedades destes (46),(22). Salvo o compósito com 1,5% de fibra linho, que, além de apresentar menor resistência à flexão entre os compósitos ensaiados, também apresentou desvio padrão inferior aos compósitos com menor concentração de fibra, sendo uma exceção. Este fato pode ter ocorrido pelo aumento da viscosidade da resina devido o aumento da carga de fibra, que pode impactar na precisão e desempenho das amostras impressas (47).

Percebe-se uma queda significativa na resistência apresentada ao se comparar o valor obtido para a resina fotopolimerizável pura com o valor apresentado para os compósitos reforçados com fibras de linho. Essa evolução pode estar relacionada à má ligação interfacial entre as fibras e a matriz(47),(48).

Todos os corpos de prova submetidos ao ensaio sofreram ruptura completa, validando os resultados obtidos. A Figura apresenta os CPs após ensaio de flexão.

A fim de reforçar essas observações e verificar se existem diferenças significativas entre as resistências à flexão dos compósitos, foi utilizado o teste de análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%.

Tabela 19 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as resistências à flexão dos compósitos, obtidas nos ensaios de flexão 3-pontos.

| SQT | SQR | F calculado | F tabelado | Q tabelado | DMS |
|------------|------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------|
| 16558 | 6255,28 | 18,53 | 2,61 | 4,04 | 15,77 |

Fonte: Autor

A partir dos resultados do teste, mostrados na Tabela20, como $F_{calc} \gg F_{tab}$, pode-se afirmar com 95% de confiança que há médias estatisticamente diferentes. A partir desta informação, foi utilizado o teste de Tukey para calcular a diferença mínima significativa (DMS) que deve haver entre duas médias para que elas sejam significativamente diferentes com nível de significância de 5%.

Verifica-se que não há diferença significativa entre os valores da média de resistências à flexão nos percentuais de reforço de fibra de linho com 0,5%, 1%, 1,5% e 2%, pois a diferença entre as médias não é superior ao d.m.s calculado e podem ser consideradas similares estatisticamente. As diferenças entre as médias da resina pura e todos os compósitos ensaiados e entre os percentuais de 1% e 1,5% foram superiores ao d.m.s, mostrando que estas médias são estatisticamente diferentes. Com base nos resultados têm-se que, com o nível de confiança de 95%, que o compósito com 1% de volume de fibras de linho, apresentou o melhor desempenho entre os compósitos ensaiados, assim, exibindo maior valor de resistência média à flexão(42,88 MPa). Apresentando diferença significativa da resina pura e do compósito com 1,5%, este que, apresentou maior diferença entre a média da resina pura, sendo o compósito que expôs o menor valor de resistência média à flexão (23,95MPa).

Baseado na Tabela 18 e na Figura 48, pode-se observar que o módulo de flexão diminuiu com o aumento da porcentagem de fibra de linho. As informações sugerem ainda que não houve variação significativa do módulo de flexão entre os compósitos 0,5%, 1,5% e 2%.

A fim de reforçar essas observações e verificar se existem diferenças significativas

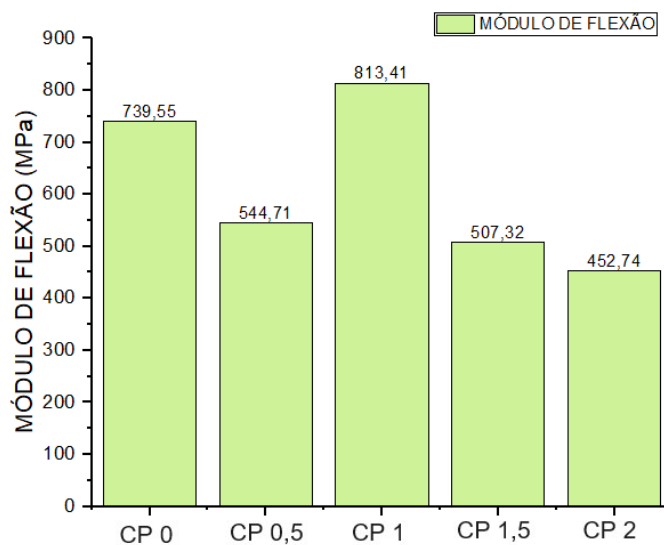


Figura 48 – Comparação dos módulos de flexão dos compósitos, obtidos nos ensaios de flexão 3-pontos.

fonte: Autor

entres os módulos de flexão dos compósitos, foi utilizado o teste de análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%. A partir dos resultados do teste, mostrados na Tabela 16, como $F_{calc} \gg F_{tab}$, pode-se afirmar com 95% de confiança que há médias estatisticamente diferentes.

A partir dos resultados do teste, mostrados na Tabela 20, como $F_{calc} \gg F_{tab}$, pode-se afirmar com 95% de confiança que há médias de módulo de flexão estatisticamente diferentes. Foi utilizado o teste de Tukey para calcular a diferença mínima significativa (DMS) que deve haver entre duas médias para que elas sejam significativamente diferentes com nível de significância de 5%.

Tabela 20 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para os módulos de flexão dos compósitos, obtidas nos ensaios de flexão 3-pontos.

| SQT | SQR | F calculado | F tabelado | Q tabelado | DMS |
|---------|---------|-------------|------------|------------|--------|
| 4248845 | 3271998 | 3,36 | 2,61 | 4,73 | 403,33 |

Fonte: Autor

A diferença entre as médias dos módulos de flexão dos compósitos ensaiados foi menor que a DMS, indicando que, estatisticamente, eles podem ser considerados iguais e que não houve variação significativa dessa propriedade entre eles.

4.4 Caracterização Térmica

Ao se trabalhar com compósitos reforçados com fibras naturais lignocelulósicas, é importante considerar a estabilidade térmica destes materiais, visto que, as suas propriedades podem ser afetadas com o aumento da temperatura e o aquecimento excessivo pode causar degradação a estrutura orgânica da fibra.

A resina e compósitos reforçados com fibra de linho foram submetidos aos ensaios térmicos de TG e DSC, com o objetivo de levantar informações inerentes ao comportamento térmico desses materiais. As curvas de TG obtidas para resina e seus compósitos estão representados nas FIG. 4.18 e FIG. 4.19 respectivamente.

Foram realizadas análises dinâmico-mecânicas na resina e nos compósitos com 0,5,1,1,5 e 2% de fração mássica de fibras de linho. Foi analisado em cada condição as curvas de módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e tangente delta ($\text{Tan } \delta$). Os dados obtidos estão apresentados na Tabela?? e nas Figuras49,50, e 51 .

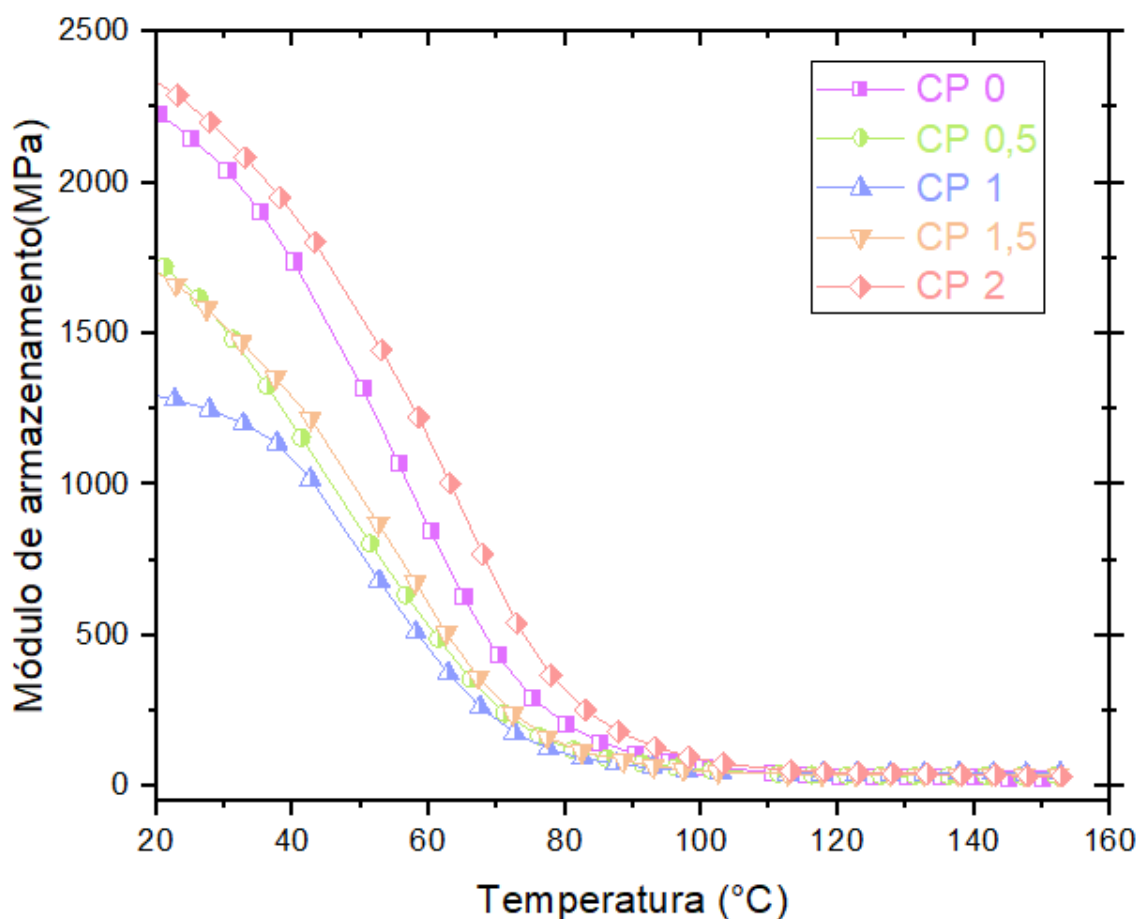


Figura 49 – Curvas do módulo de armazenamento para as amostras de resina e compósitos de fibras de linho.

fonte: Autor

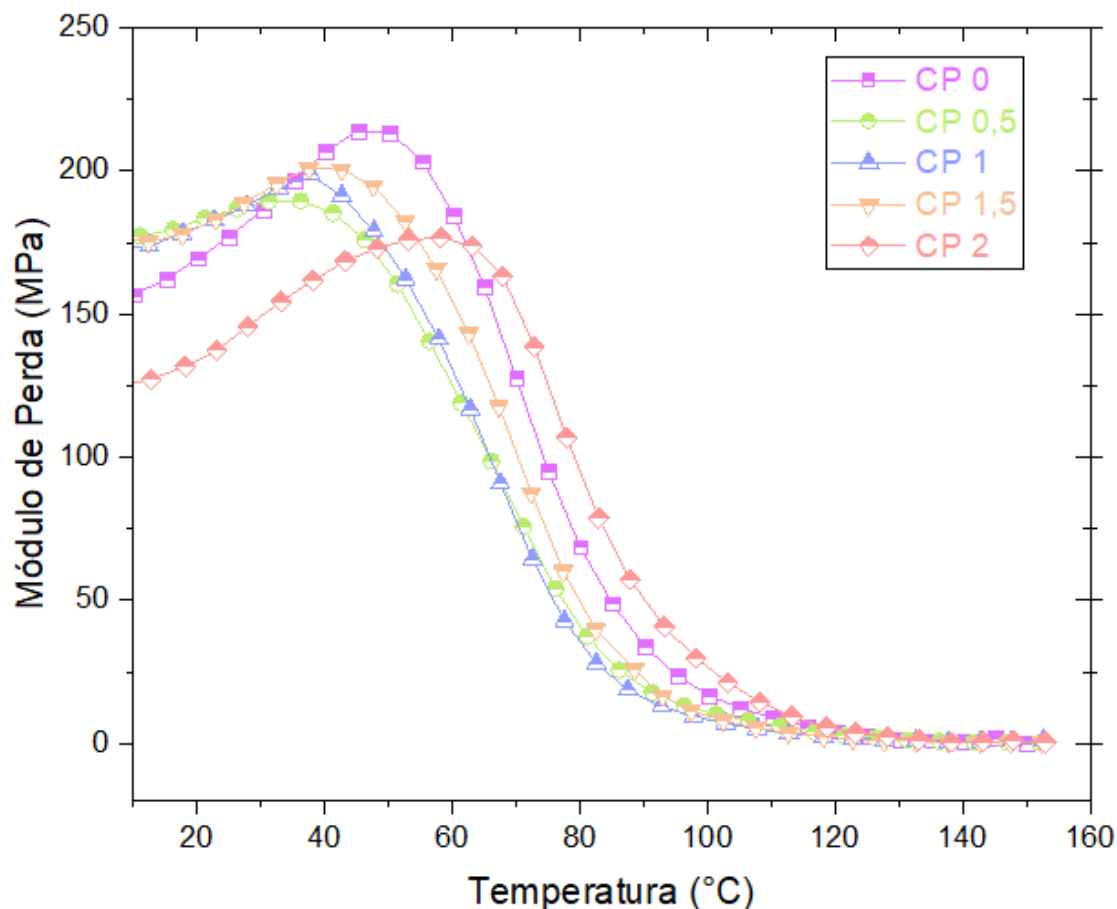


Figura 50 – Curvas do módulo de perda para as amostras de resina e compósitos de fibras de linho.

fonte: Autor

4.5 Ensaios de velocidade residual

Os testes de velocidade residual foram realizados para verificar a resistência balística das placas e os resultados obtidos permitem estimar dados para o estudo das propriedades balísticas apresentadas pelos compósitos reforçados com fibras de fibra de linho produzidas por MA. Através do ensaio de velocidade residual foi possível estimar a energia absorvida (E_{abs}) e a velocidade limite (VL) de cada amostra ensaiada (47)(49).

A Figura 52 apresenta os pontos experimentais obtidos para uma amostra de 1% em fração de fibras a partir do espectro de radar Doppler, juntamente a curva polinomial contínua ajustada. Observa-se uma queda acentuada da velocidade do projétil em torno de 419 m/s, essa redução representa o momento do impacto no alvo. Essa velocidade é definida como velocidade de impacto (V_i) e a velocidade mínima atingida após o impacto é a velocidade residual (V_r).

Gráficos semelhantes foram obtidos para as demais condições estudadas, com base nos dados fornecidos por essas curvas determinou-se a velocidade limite (VL) e a energia

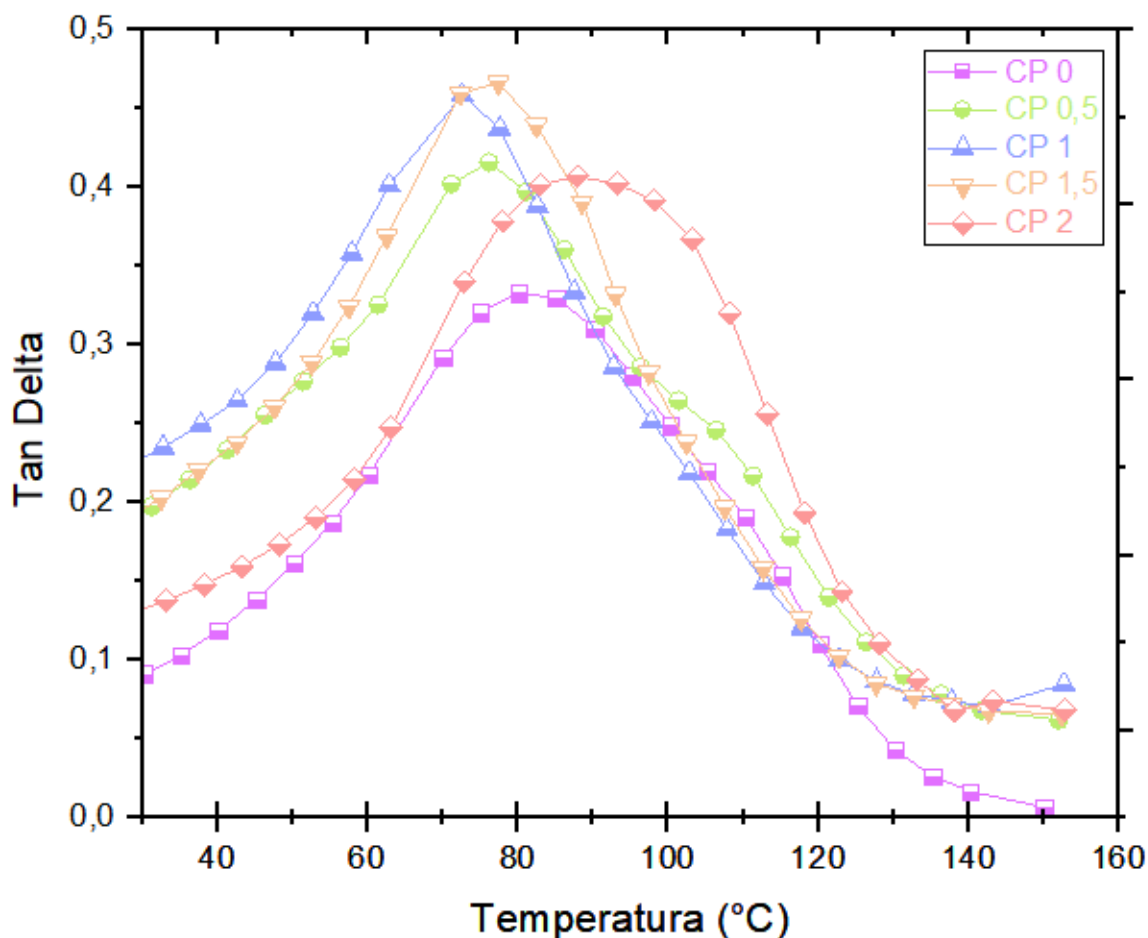


Figura 51 – Curvas da Tan Delta para as amostras de resina e compósitos de fibras de linho.

fonte: Autor

Tabela 21 – Parâmetros obtidos no ensaio de velocidade residual e velocidade limite.

| Amostras | Vi (m/s) | Vr (m/s) | Eabs (J) | VL (m/s) |
|----------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,5% | 418,85±2,48 | 328,96±12,84 | 271,91±25,28 | 208,95±2,45 |
| 1% | 418,07±2,94 | 332,55±5,00 | 262,69±27,31 | 204,98±11,03 |
| 1,5% | 416,95±2 | 332,20±5,53 | 253,87±11,16 | 201,51±5,05 |
| 2% | 414,32±3,71 | 336,23±11,44 | 234,01±6,54 | 193,26±4,47 |

Fonte: Autor

absorvida (Eabs). A Tabela 21 expõe os resultados de velocidade média de impacto do projétil (Vi), velocidade residual média (Vr), energia absorvida (Eabs) e sua porcentagem em relação à energia total (% Eabs), como também a estimativa da velocidade limite (VL).

A figura 53 representa graficamente os dados obtidos no ensaio que foram descritos na Tabela 21 para a energia absorvida pelos compósitos. Através da análise dos dados fornecidos e considerando os valores médios apresentados, é possível observar uma variação nos resultados de energia absorvida, pela redução nos valores médios de energia absorvida

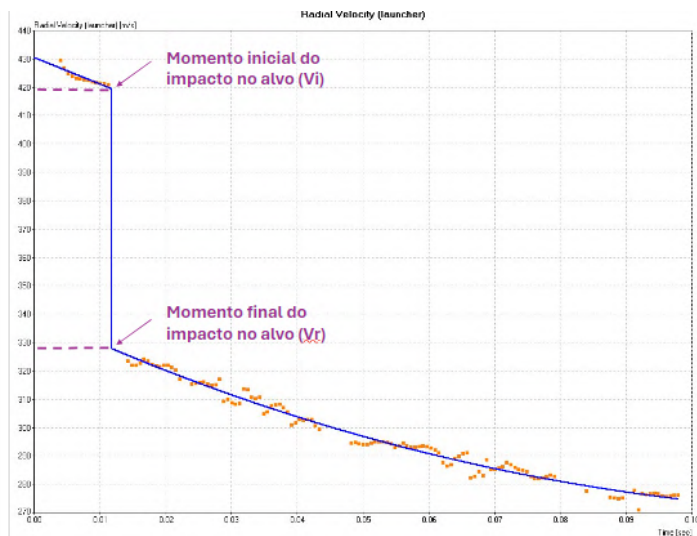


Figura 52 – Curva de pontos experimentais do compósito epóxi com 1% em fração de fibras de linho.

fonte: Autor

conforme o aumento da fração volumétrica de fibras. O compósito com 0,5% de fibras apresentou maior média observada para a energia absorvida, tal comportamento pode estar relacionado ao comportamento frágil da matriz, através da geração de superfícies de fratura após impacto balístico. Esse comportamento também é identificado em outros estudos, indicando, que possivelmente, o reforço não foi eficaz (50).

No ensaio todas as amostras foram perfuradas e atravessadas pelo projétil, tal fato possibilita a determinação da energia absorvida por cada placa ensaiada. O comportamento apresentado pelas amostras, onde as mesmas destacaram seu comportamento frágil, a amostra se estilhaçou após o ensaio balístico, restando apenas alguns fragmentos da placa ensaiada. Este comportamento indica a matriz como principal mecanismo de falha, podendo estar presente também outros mecanismos de fratura como arrancamento de fibra e delaminação. Estudos recentes na literatura demonstram que o material compósito pode se tornar mais resistente ao impacto quando o reforço da matriz é aumentado pela adição de mais fibras (49). De forma geral, todas as amostras ensaiadas apresentaram comportamento próximo, considerando a integridade estrutural.

Para a identificação da influência do percentual de fibras presentes nos compósitos sobre a energia absorvida foi aplicada a análise de variância nos valores obtidos. A Tabela 22 apresenta a ANOVA dos dados de energia de absorção em função do percentual de fibras nos compósitos.

Através das micrografias representadas na Figura 54 é possível observar as camadas de impressão realizadas pela impressão 3D e buracos na superfície da amostra que apontam a ocorrência de arrancamento da fibra.

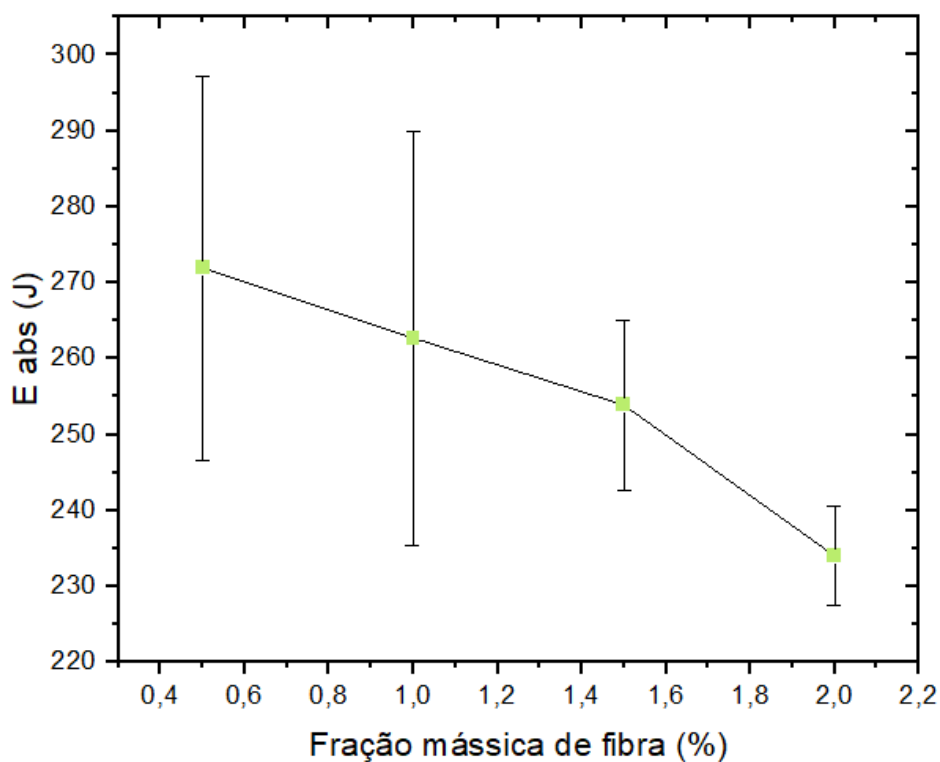


Figura 53 – Energia de absorção média para os compósitos nas frações de 0,5%, 1%, 1,5% e 2% de volume de fibras de linho.

fonte: Autor

Tabela 22 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey parada energia de absorção para amostras com 0,5, 1, 1,5 e 2 % fração de fibras de linho.

| SQT | SQR | F calculado | F tabelado | Q tabelado | DMS |
|-------|---------|-------------|------------|------------|-------|
| 16216 | 9934,32 | 5,90 | 2,95 | 3,86 | 25,71 |

Fonte: Autor

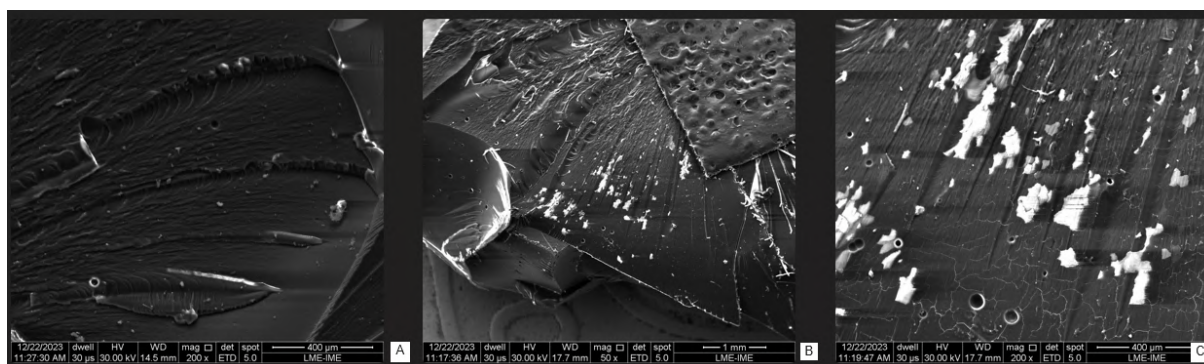


Figura 54 – Micrografias da superfície da fratura do corpo de prova de compósito após ensaio de velocidade residual. (a)100x de 1,5% (b)50x de 2% e (c)100x de 2%.

fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

Através dos valores obtidos nos ensaios de tração realizados nos compósitos foi possível avaliar as propriedades mecânicas. As propriedades como resistência máxima a tração e módulo de elasticidade diminuíram, mostrando um comportamento mais próximo de carga do que reforço. A partir destes resultados, como na fotopolimerização em cuba é possível utilizar, de forma geral, somente fibras descontínuas, pode-se verificar a possibilidade de tratamentos para serem realizados na fibra de linho com o objetivo de modificar as propriedades desta fibra e obter resultados mais satisfatório aos compósitos.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, P. C.; SANTANDREA, R. S.; BRANDÃO, L. C.; XAVIER, M. V. A.; VOLPINI, V. L. Manufatura aditiva: Revisão sistemática da literatura. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 11, p. 84502–84515, 2020.
- 2 RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. de S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, v. 12, n. 3, p. 1, 2017.
- 3 HASAN, A.; RABBI, M.; BILLAH, M. M. *Making the lignocellulosic fibers chemically compatible for composite: A comprehensive review*. 100078 p. Tese (Doutorado), 2022.
- 4 PAZHAMANNIL, R. V.; GOVINDAN, P. Current state and future scope of additive manufacturing technologies via vat photopolymerization. *Materials Today: Proceedings*, v. 43, p. 130–136, 2021. ISSN 2214-7853. 1st International Conference on Energy, Material Sciences and Mechanical Engineering. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320388337>>.
- 5 JAFFERSON, J.; CHATTERJEE, D. A review on polymeric materials in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 46, p. 1349–1365, 2021.
- 6 VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.
- 7 LIRA, V. M. *Processos de fabricação por impressão 3D: Tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.
- 8 BORRELLO, J.; NASSER, P.; IATRIDIS, J. C.; COSTA, K. D. 3d printing a mechanically-tunable acrylate resin on a commercial dlp-sla printer. *Additive Manufacturing*, v. 23, p. 374–380, 2018. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418301180>>.
- 9 LIRA, V. M. *Processos de fabricação por impressão 3D: Tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.
- 10 MEMARZADEH, A.; SAFAEI, B.; TABAK, A.; SAHMANI, S.; KIZILORS, C. Advancements in additive manufacturing of polymer matrix composites: A systematic review of techniques and properties. *Materials Today Communications*, Elsevier, p. 106449, 2023.
- 11 JAFFERSON, J.; CHATTERJEE, D. A review on polymeric materials in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 1349–1365, 2021. ISSN 2214-7853. 28th International Conference on Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM28). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321016059>>.
- 12 NUNES, E. d. C. D.; LOPES, F. R. S. Polímeros: conceitos, estrutura molecular, classificação e propriedades. *São Paulo, SP: Érica*, 2014.
- 13 JR, S. V. C. Ciência dos polímeros. *Artiliber editora, São Paulo*, v. 24, 2002.

- 14 JAFFERSON, J.; CHATTERJEE, D. A review on polymeric materials in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 1349–1365, 2021. ISSN 2214-7853. 28th International Conference on Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM28). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321016059>>.
- 15 LIZ-BASTEIRO, P.; SANZ-HORTA, R.; REVIRIEGO, F.; MARTÍNEZ-CAMPOS, E.; REINECKE, H.; ELVIRA, C.; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, J.; GALLARDO, A. High resolution molds, sacrificial in aqueous media, obtained by vat photopolymerization 3d printing. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 75, p. 103758, 2023.
- 16 MORAES, S. R.; OLIVEIRA, A. L.; SOUZA, J. F.; ALVES, J. Avaliação de polímeros termoplásticos recicláveis como materiais componentes de telhas e tijolos. *ENCICLOPEDIA BIOSFERA*, v. 6, n. 11, 2010.
- 17 JUNIOR, W. D. C.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. *Rio de Janeiro: LTC*, v. 589, p. 249, 2002.
- 18 MANO, E. B. Introdução a polímeros. (*No Title*), 1999.
- 19 FERNANDES, G. A. C.; RIBEIRO, M. C. É. Polímeros termorrígidos.
- 20 NEUMANN, M. G.; RODRIGUES, M. R. Fotopolimerização: princípios e métodos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Associação Brasileira de Polímeros-ABPol, v. 13, n. 4, p. 276–286, 2013.
- 21 MUSA, A. A.; ONWUALU, A. P. Potential of lignocellulosic fiber reinforced polymer composites for automobile parts production: Current knowledge, research needs, and future direction. *Heliyon*, v. 10, n. 3, p. e24683, 2024. ISSN 2405-8440. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402400714X>>.
- 22 PICKERING, K.; EFENDY, M. A.; LE, T. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 83, p. 98–112, 2016. ISSN 1359-835X. Special Issue on Biocomposites. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X15003115>>.
- 23 ELFALEH, I.; ABBASSI, F.; HABIBI, M.; AHMAD, F.; GUEDRI, M.; NASRI, M.; GARNIER, C. A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, v. 19, p. 101271, 2023. ISSN 2590-1230. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023003985>>.
- 24 JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, Elsevier, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.
- 25 KABIR, M.; WANG, H.; LAU, K.; CARDONA, F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, v. 43, n. 7, p. 2883–2892, 2012. ISSN 1359-8368. Natural Materials in Composites Engineering. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812002922>>.
- 26 ABDALLAH, S. B.; TEIXEIRA, M.; CHALA, I.; OTAZAGHINE, B.; SONNIER, R.; LONGUET, C.; ROUX, J.-C.; ROUÏF, S. Chemical treatments of flax fibers—control of the diffusion of molecules into the fiber structure. *Industrial Crops and Products*, Elsevier, v. 132, p. 430–439, 2019.

- 27 SOUTO, A. P. Linho. Ideal Artes Gráficas, 2009.
- 28 PEZZOLO, D. B. *Tecidos: história, tramas, tipos e usos*. [S.l.]: Editora Senac São Paulo, 2021.
- 29 GAZETA, R. *Produção de linho movimentou economia de cidades no norte da Rússia desde o Império*. 2019. 20 de junho de 2023. Disponível em: <<https://br.rbth.com/economia/82059-producao-linho-economia-norte-russia>>.
- 30 BALEY, C.; BOURMAUD, A.; DAVIES, P. Eighty years of composites reinforced by flax fibres: A historical review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 144, p. 106333, 2021.
- 31 FAZER, S. *DA MACERAÇÃO DO LINHO (PT1)*. 2023. 22 de junho de 2023. Disponível em: <<https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>>.
- 32 De Prez, J.; Van Vuure, A. W.; IVENS, J.; AERTS, G.; Van de Voorde, I. Flax treatment with strategic enzyme combinations: Effect on chemical fiber composition and ease of fiber extraction. *Biotechnology Reports*, v. 23, p. e00358, 2019. ISSN 2215-017X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X19300670>>.
- 33 DURO ANA CATARINA FERREIRA SCHOOL=Universidade do Minho- Escola de Engenharia, M. *Desenvolvimento e caracterização de compósitos reforçados com fibras de linho e sisal*. Tese (Doutorado), 2013.
- 34 DOAN, T.-T.-L.; GAO, S.-L.; MÄDER, E. Jute/polypropylene composites i. effect of matrix modification. *Composites Science and Technology*, v. 66, n. 7, p. 952–963, 2006. ISSN 0266-3538. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353805003076>>.
- 35 KANDEMIR, A.; LONGANA, M. L.; HAMERTON, I.; EICHHORN, S. J. Developing aligned discontinuous flax fibre composites: Sustainable matrix selection and repair performance of vitrimers. *Composites Part B: Engineering*, v. 243, p. 110139, 2022. ISSN 1359-8368. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836822005145>>.
- 36 SAHU, M.; PATNAIK, A.; Kishor Sharma, Y.; DALAI, A. Physico-mechanical and tribological behaviour of natural fiber reinforced polymer composites: A short review. *Materials Today: Proceedings*, 2023. ISSN 2214-7853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323019065>>.
- 37 VEIGA, A. T. V. *COMPÓSITO DE POLIPROPILENO REFORÇADO COM FIBRAS DE LINHO MODIFICADAS COM SF6*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- 38 FILA, D. *Impressão 3D com Resina: entenda como funciona*. *3DFila*, 2022. 2022. 01 de abril de 2023. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/categoria-produto/resina-3d/>>.
- 39 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS: ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D638-14*: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, 2014.

- 40 LI, L.; LIU, W.; SUN, L. Mechanical characterization of 3d printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, v. 227, p. 109618, 2022. ISSN 0266-3538. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353822003608>>.
- 41 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS: ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D256-10*: Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. West Conshohocken, 2018.
- 42 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS: ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D790 17*: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. West Conshohocken, 2017.
- 43 KANDEMIR, A.; LONGANA, M. L.; HAMERTON, I.; EICHHORN, S. J. Developing aligned discontinuous flax fibre composites: Sustainable matrix selection and repair performance of vitrimers. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 243, p. 110139, 2022.
- 44 ZHANG, L.; MENG, C.; FU, J.; LOU, J.; ZHANG, X.; GAO, W.; FAN, X. Effect of ozone treatment on the chemical and mechanical properties of flax fibers. *Industrial Crops and Products*, Elsevier, v. 189, p. 115694, 2022.
- 45 ABDALLAH, S. B.; TEIXEIRA, M.; CHALA, I.; OTAZAGHINE, B.; SONNIER, R.; LONGUET, C.; ROUX, J.-C.; ROUIF, S. Chemical treatments of flax fibers—control of the diffusion of molecules into the fiber structure. *Industrial Crops and Products*, Elsevier, v. 132, p. 430–439, 2019.
- 46 PALANISAMY, S.; VIJAYANANTH, K.; MURUGESAN, T. M.; PALANIAPPAN, M.; SANTULLI, C. The prospects of natural fiber composites: A brief review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2024. ISSN 2588-8404. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S258884042400009X>>.
- 47 WU, Y.; LI, C.; CHEN, T.; QIU, R.; LIU, W. Photo-curing 3d printing of micro-scale bamboo fibers reinforced palm oil-based thermosets composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 152, p. 106676, 2022. ISSN 1359-835X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X21003936>>.
- 48 KANDEMIR, A.; LONGANA, M. L.; HAMERTON, I.; EICHHORN, S. J. Developing aligned discontinuous flax fibre composites: Sustainable matrix selection and repair performance of vitrimers. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 243, p. 110139, 2022.
- 49 de Mendonça Neuba, L.; Camposo Pereira, A.; Felipe Pereira Junio, R.; Teixeira Souza, A.; Soares Chaves, Y.; Picanço Oliveira, M.; Neves Monteiro, S. Ballistic performance of cyperus malaccensis sedge fibers reinforcing epoxy matrix as a standalone target. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 23, p. 4367–4375, 2023. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542300323X>>.
- 50 COGSWELL, F.; ECKOLD, G.; MIRAVETE, A.; MATTHEWS, F.; RAWLINGS, R.; DAVIES, G.; HITCHINGS, D.; SOUTIS, C. Woodhead publishing series in composites science and engineering. *Advanced fibrous composite materials for ballistic protection*, 2016.