MINISTÉRIO DA DEFESA EXÉRCITO BRASILEIRO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA 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 e Engenharia dos materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia 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, microfilmar 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).

Moreira, Daysiane da Silva.

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

110 f.

Orientador(es): Lucio Fabio Cassiano Nascimento.

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

1. Manufatura aditiva; Fibra de linho; 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 e Engenharia dos materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia dos materiais.

Orientador(es): Lucio Fabio Cassiano Nascimento.

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

Lucio Fabio Cossiono hascimento

Prof. Lucio Fabio Gassiano Nascimento - D.Sc.do IME - Presidente

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

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

Falis da Corta (a cia trilus

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 contribuiram com meu crescimento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo de toda essa jornada. Sem Sua presença em minha vida, nada disso seria possível.

A conclusão desta dissertação representa a realização de um grande sonho, e sou grata a todas as pessoas que contribuíram para este momento.

Agradeço ao meu orientador, pela orientação valiosa, paciência e apoio. Seu conhecimento e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores e colegas, sou profundamente grata pelas contribuições, discussões enriquecedoras e pelo suporte técnico ao longo deste trabalho.

À minha família, agradeço pelo amor incondicional, pela paciência nos momentos de ausência e pelo apoio em cada passo dessa caminhada. Aos meus pais, devo tudo o que sou, e dedico este trabalho como uma prova de gratidão por tudo o que me ensinaram.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, obrigada pelo incentivo e por acreditarem em mim mesmo nos momentos mais desafiadores. Em especial, agradeço a minha cachorrinha Madalena, cuja presença foi essencial para que eu nunca perdesse o foco.

Também agradeço às instituições e agências de fomento que possibilitaram a execução desta pesquisa, oferecendo recursos, suporte técnico e oportunidades fundamentais para este trabalho.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta dissertação se tornasse realidade, meu mais sincero agradecimento.

"O Senhor é meu pastor, nada me faltará."" (Bíblia Sagrada, Salmos 23,)

RESUMO

A manufatura aditiva é uma tecnologia emergente que possibilita a produção de geometrias complexas pela sobreposição de camadas, utilizando diversos materiais e processos, como modelagem por deposição fundida (FDM), estereolitografia (SLA) e processamento digital de luz (DLP). Recentes avanços tecnológicos tornaram essa técnica mais acessível, com aplicações em setores como saúde, aeroespacial, automotivo e industrial. Entre os materiais utilizados, os polímeros destacam-se por sua versatilidade, custo acessível e compatibilidade com diversas técnicas. O uso de fibras naturais em compósitos poliméricos, como o linho, oferece vantagens sustentáveis e mecânicas, incluindo leveza, rigidez elevada e possibilidade de reciclagem. Este estudo explorou compósitos reforçados com fibras de linho fabricados por DLP, com frações mássicas de fibras variando de 0.5% a 2%. Apesar do aumento da viscosidade limitar a fração de fibras, todos os corpos de prova foram produzidos para avaliação mecânica, térmica e balística. Os ensaios mecânicos mostraram que a adição de fibras reduziu a resistência à tração e à flexão em frações maiores, devido a má adesão fibra-matriz e microdefeitos gerados durante a manufatura aditiva, como bolhas e vazios. O módulo de elasticidade apresentou variações limitadas, enquanto a resina pura demonstrou maior homogeneidade estrutural e resistência. A análise termomecânica revelou um aumento no módulo de armazenamento inicial e na temperatura de transição vítrea em compósitos com maior fração de fibras, mas sem melhora significativa no desempenho geral. Nos ensaios de impacto, a adição de fibras não resultou em aumento da resistência, com a resina pura apresentando maior energia absorvida. O desempenho limitado dos compósitos foi associado a falhas de adesão e propagação de trincas na matriz, evidenciando a necessidade de otimização do processo. A análise térmica indicou menor estabilidade térmica nos compósitos, com degradação influenciada pelos elementos estruturais da fibra de linho, como hemicelulose, celulose e lignina. As análises confirmaram que os desafios associados à interface fibra-matriz e aos defeitos no processo de fabricação comprometem o potencial dos compósitos. Futuras melhorias incluem tratamentos químicos nas fibras para aprimorar a adesão, além de ajustes no processo aditivo para reduzir a formação de defeitos. Tais avanços podem aumentar a viabilidade dos compósitos para aplicações como blindagem balística e outros setores industriais.

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

ABSTRACT

Additive manufacturing is an emerging technology that makes it possible to produce complex geometries by geometries by superimposing layers, using various materials and processes, such as fused deposition modeling (FDM), stereolithography (SLA) and digital light processing (DLP). processing (DLP). Recent technological advances have made this technique more accessible, with health, aerospace, automotive and industrial sectors. Among the materials materials used, polymers stand out due to their versatility, affordable cost and compatibility with various techniques. The use of natural fibers in polymer composites, such as flax, offers sustainable and mechanical advantages, including lightness, high stiffness and recyclability. recyclability. This study explored composites reinforced with flax fibers manufactured by DLP, with fiber mass fractions ranging from 0.5% to 2%. Although the increase in viscosity limits the fiber fraction, all the specimens were produced for mechanical, thermal and ballistic for mechanical, thermal and ballistic evaluation. The mechanical tests showed that the reduced tensile and flexural strength at higher fractions, due to poor fiber-matrix adhesion and microdefects. adhesion and micro-defects generated during additive manufacturing, such as bubbles and voids. voids. The modulus of elasticity showed limited variations, while the pure resin showed greater structural homogeneity and resistance. Thermomechanical analysis revealed an increase in initial storage modulus and glass transition temperature in composites with a higher fiber fraction, but with no significant improvement in overall performance. performance. In the impact tests, the addition of fibers did not result in an increase in resistance, with the pure resin showing greater absorbed energy. The limited performance of the performance of the composites was associated with adhesion failures and crack propagation in the matrix, highlighting the need to optimize the process. the need to optimize the process. Thermal analysis indicated lower thermal stability degradation influenced by the structural elements of the flax fiber, such as the hemicell fiber, such as hemicellulose, cellulose and lignin. The analyses confirmed that the challenges associated with the fiber-matrix interface and defects in the manufacturing process compromise the the potential of the composites. Future improvements include chemical treatments on the fibers to improve adhesion, as well as adjustments to the additive process to reduce defect formation. defects. Such advances could increase the viability of composites for applications such as ballistic armor and other industrial sectors.

Keywords: Additive manufacturing; Fiber flax; DLP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Representação das principais etapas do processo de MA	25
Figura 2 –	Volume gerado com superfícies não conectadas e conectadas	26
Figura 3 –	Modelagem de sólido não conectado e sólido único	26
Figura 4 –	Exemplo da imagem na tela de um computador de um modelo STL	27
Figura 5 –	Regra da mão direita para a orientação do vetor normal	27
Figura 6 –	Configuração de triângulos em STL válida e inválida	28
Figura 7 $-$	Exemplo de imagem de um modelo fatiado.	28
Figura 8 $-$	Principais técnicas de MA por Fotopolimerização em cuba	31
Figura 9 –	Formatos das unidades básicas dos processos SLA e DLP	32
Figura 10 –	Funcionamento de Impressora 3D-DLP	33
Figura 11 –	Classificação das fibras naturais	37
Figura 12 –	Estrutura de fibra natural	39
Figura 13 –	Fragmento de bandagem de mumia feito de lihho e decoradas com um	
	capítulo do livro livro dos mortos	41
Figura 14 –	Rótulo da Figura, descrevendo a figura	42
Figura 15 –	Linho no processo de maceração	43
Figura 16 –	Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos	45
Figura 17 –	Tecido de linho como recebido, em processo de desfiamento e linhas	
	desfiadas	49
Figura 18 –	Processo de preparo das fibras de linho	50
Figura 19 –	A - Fibras no processo de moagem ${\rm B}$ - Fibras algumas horas após a	
	moagem	50
Figura 20 –	Fibras antes do processo de peneiração	51
Figura 21 –	Fotopolímero utilizado na MA	51
Figura 22 –	Modelos digitais das amostras obtidas através do software AutoCAD®.	
	Corpo de prova de tração	52
Figura 23 –	Modelos digitais para conversão no software Fusion 360®. Corpo de	
	prova de tração \ldots	53
Figura 24 –	Utilização do Software LycheeSilicer $\ensuremath{\mathbbm B}$ para realizar o fatiamento dos	
	projetos das amostras. Corpos de prova de tração	54
Figura 25 –	Impressora 3D utilizada para fabricação das amostras.	54
Figura 26 –	Encorporação da Fibra à resina	56
Figura 27 –	Amostras expostas à luz UV	57
Figura 28 –	Geometria adotada para produção dos corpos de prova . \ldots . \ldots .	58
Figura 29 –	Impressão recém finalizada (A) e (B), amostras em banho de luz UV (C).	59
Figura 30 –	Geometria adotada para produção dos corpos de prova impacto	60

Figura 31 –	Corpos de prova para ensaio de impacto compósito 2% de fibra de linho.	61
Figura 32 –	Geometria adotada para produção dos corpos de prova Flexão	61
Figura 33 –	Amostras para ensaio de flexão	62
Figura 34 –	Amostra do compósito 0,5% cominuída para TGA	64
Figura 35 –	Amostras dos compósitos cominuídas para TGA e DSC	65
Figura 36 –	(A) Amostras para DMA recém impressa. (B) Amostras dos compósitos	
	para DMA	66
Figura 37 –	Placa compósita presa na estativa.	67
Figura 38 –	Amostra para ensaio de velocidade residual produzidas por MA	68
Figura 39 –	Compósito com fração mássica de 2,5% de fibra não apta para impressão.	70
Figura 40 –	Corpos de prova rompidos após ensaio de tração	71
Figura 41 –	Médias das resistências à tração máxima em função da fração mássica	
	da fibra de linho	72
Figura 42 –	Médias da deformação máxima em função da fração mássica da fibra	
	de linho	73
Figura 43 –	Médias do módulo de elasticidade máximo em função da fração mássica	
	da fibra de linho	74
Figura 44 –	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (2%) em fração	
	mássica de fibras ensaiado por tração 50x	77
Figura 45 –	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (2%) em fração	
	mássica de fibras ensaiado por tração 100x	78
Figura 46 –	Comparação das energias de fratura dos compósitos, obtidas nos ensaios	
	de impacto Charpy	79
Figura 47 –	Energia de impacto charpy em função das frações mássicas de fibras de	
	linho dispostas nos compósitos.	80
Figura 48 –	Comparação das energias de fratura dos compósitos, obtidas nos ensaios	
	de impacto Charpy	80
Figura 49 –	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova $(1,5\%)$ em fração	
	mássica de fibras ensaiado por impacto 300x	82
Figura 50 –	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova $(1,5\%)$ em fração	
	mássica de fibras ensaiado por impacto 400x	83
Figura 51 –	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova $(1,5\%)$ em fração	
	mássica de fibras ensaiado por impacto 700x	84
Figura 52 –	Corpos de prova após ensaio de flexão	85
Figura 53 –	Comparação das resistências à flexão dos compósitos, obtidas nos ensaios	
	de flexão 3-pontos.	86
Figura 54 –	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova $(1,5\%)$ em fração	
	mássica de fibras ensaiado por flexão 50x	87

Figura	55 -	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova $(1,5\%)$ em fração	
		mássica de fibras ensaiado por flexão 200x	88
Figura	56 –	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova $(1,5\%)$ em fração	
		mássica de fibras ensaiado por flexão 1000x	89
Figura	57 –	Curva TG /DTG da resina fotossensível	90
Figura	58 -	Curvas TG/DTG para os compósitos resina/fibras de linho. \ldots .	91
Figura	59 -	Curva de DSC da resina fotossensível. \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	92
Figura	60 -	Curvas de DSC compósitos	93
Figura	61 -	Curvas do módulo de armazenamento para as amostras de resina e	
		compósitos de fibras de linho	94
Figura	62 –	Curvas do módulo de perda para as amostras de resina e compósitos de	
		fibras de linho.	95
Figura	63 -	Curvas da Tan Delta para as amostras de resina e compósitos de fibras	
		de linho	96
Figura	64 -	Curva de pontos experimentais do compósito com 1% em fração de	
		fibras de linho.	97
Figura	65 -	Energia de absorção média para os compósitos nas frações de 0,5%, 1%,	
		1,5%e $2%$ de volume de fibras de linho	98
Figura	66 -	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova de compósito	
		com 2% de fração mássica de fibra após ensaio de velocidade residual	
		100x	100
Figura	67 –	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova de compósito	
		com 2% de fração mássica de fibra após ensaio de velocidade residual	
		200x	101
Figura	68 -	Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova de compósito	
		com 1% de fração mássica de fibra após ensaio de velocidade residual	
		1000x	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Processo de MA	24
Tabela 2 –	Classificação de acordo com o princípio de processamento das camadas.	30
Tabela 3 –	Classificação dos polímeros	35
Tabela 4 –	Composições estruturais de fibras naturais	38
Tabela 5 –	Propriedades comparativas de fibras naturais com fibras sintéticas	
	convencionais	40
Tabela 6 –	Informações técnicas da resina fotopolimerizavel 3D fila	52
Tabela 7 –	Parâmetros utilizados para impressão das amostras	55
Tabela 8 –	Planejamento dos ensaios realizados	58
Tabela 9 –	Dimensões das amostras para ensaio de tração (mm) $\hfill\h$	59
Tabela 10 –	Parâmetros utilizados para impressão das amostras de tração	60
Tabela 11 –	Parâmetros utilizados para impressão das amostras	61
Tabela 12 –	Parâmetros para análise de variância (ANOVA)	69
Tabela 13 –	Propriedades de flexão dos compósitos	75
Tabela 14 –	Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as	
	resistências à tração dos compósitos obtidas nos ensaios de Tração . $\ .$	76
Tabela 15 –	Energia média absorvida e desvio padrão obtidos nos ensaios de impacto	
	Charpy dos compósitos.	79
Tabela 16 –	Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as	
	resistências ao impacto dos compósitos obtidas nos ensaios de impacto	
	Charpy	81
Tabela 17 –	Propriedades de flexão dos compósitos	85
Tabela 18 –	Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as	
	resistências à flexão dos compósitos, obtidas nos ensaios de flexão 3-	
	pontos.	86
Tabela 19 –	Parâmetros termogravimétricos observados para a resina e os compósitos.	90
Tabela 20 –	Parâmetros obtidos pela análise dinâmico-mecânica (DMA) $\ \ . \ . \ .$	93
Tabela 21 –	Parâmetros obtidos no ensaio de velocidade residual e velocidade limite.	97
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.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD Desenho assistido por computador STL Stereolithography Tesselation Language FNL Fibra Natural Lignocelulósica. lf Comprimento da fibra. MA Manufatura aditiva DLP Processamento digital de luz DMD Dispositivo de microespelho digital 2DBidimensional 3D Tridimensional SLA Estereolitografia MEV Microscopia eletrônica de varredura IME Instituto Militar de Engenharia CM Ciência dos Materiais Instituto de Pesquisas da Marinha **IPqM** LMPCC Laboratório de Misturas Poliméricas e Compósitos Condutores Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ DSC Calorimetria diferencial de varredura TGA Análise termogravimétrica MEV Microscopia Eletrônica De Varredura DMA Análise dinâmico-mecânica ISO International Organization for Standardization ASTM American Society for Testing and Materials UV Ultravioleta \mathbf{PE} Polietileno

PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila
Pc	Propriedade estimada do compósito
Pm	Propriedade da matriz
Рр	Propriedade da fibra
Vm	Fração volumétrica da matriz
Vp	Fração volumétrica da fibra
LME	Laboratório de Microscopia Eletrônica
IMA	Instituto de Macro moléculas
CAEx	Centro de Avaliações do Exército

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ_f	Limite de resistência à tração da fibra
$ au_c$	Tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz.
d	Diâmetro da fibra
Σ_{max}	Tensão máxima de engenharia
F_m	Carga máxima
Σ	Tensão
Е	Módulo de elasticidade
A_0	Área inicial da seção reta do corpo de prova
ϵ	Deformação associada na região elástica
E'	Módulo de armazenamento
E"	Módulo de perda
Tg	Tangente delta
$\mathrm{Tan}\delta$	Temperatura de transição vítrea
GL	Número de graus de liberdade
k	Número de tratamentos
r	Número de repetições do tratamento
SQTr	Soma de Quadrado Tratamentos
SQR	Soma de Quadrado Resíduo
SQT0	Soma de Quadrado Total
QMR	Quadrado Médio Resíduo
QMT	Quadrado MédioTratamentos
q	Valor dado em uma tabela
d.m.s	Diferença mínima significativa
Vi	Velocidade de impact

Vr	Velocidade residua
Eabs	Energia absorvida
VL	Velocidade limite
Δ	Delta
∞	Infinito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	22
1.1.1	OBJETIVOS GERAIS	22
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	MANUFATURA ADITIVA	23
2.1.1	MODELAGEM 3D DA PEÇA EM UM SISTEMA CAD	25
2.1.2	FORMATO STL	26
2.1.3	FATIAMENTO	28
2.1.4	FABRICAÇÃO DA PEÇA NO EQUIPAMENTO DE MA	29
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MA	29
2.2.1	FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA	30
2.3	MATERIAIS POLIMÉRICOS	34
2.4	FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS	36
2.4.1	FIBRA DE LINHO	40
2.5	MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS	43
	_	
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3 3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	49 49
3 3.1 3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	49 49 49
3 3.1 3.2 3.3	MATERIAIS E MÉTODOS	49 49 49 51
3 3.1 3.2 3.3 3.4	MATERIAIS E MÉTODOS APECTOS GERAIS APECTOS GERAIS FIBRA DE LINHO FIBRA DE LINHO FIBRA FOTOPOLIMERIZÁVEL METODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVA FIBRA	49 49 49 51 52
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	MATERIAIS E MÉTODOS APECTOS GERAIS APECTOS GERAIS FIBRA DE LINHO FIBRA DE LINHO FIBRA DE LINHO RESINA FOTOPOLIMERIZÁVEL FIBRA DITIVA METODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVA FIBRA DITIVA ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO FIBRA DITIVA	49 49 51 52 58
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1	MATERIAIS E MÉTODOS APECTOS GERAIS FIBRA DE LINHO RESINA FOTOPOLIMERIZÁVEL METODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVA ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO ENSAIO DE TRAÇÃO	49 49 51 52 58 58
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1 3.5.2	MATERIAIS E MÉTODOSAPECTOS GERAISFIBRA DE LINHORESINA FOTOPOLIMERIZÁVELMETODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVAENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE IMPACTO CHARPY	 49 49 51 52 58 58 60
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1 3.5.2 3.5.3	MATERIAIS E MÉTODOSAPECTOS GERAISFIBRA DE LINHORESINA FOTOPOLIMERIZÁVELMETODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVAENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE IMPACTO CHARPYENSAIO DE FLEXÃO	 49 49 51 52 58 58 60 61
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1 3.5.2 3.5.3 3.6	MATERIAIS E MÉTODOSAPECTOS GERAISFIBRA DE LINHORESINA FOTOPOLIMERIZÁVELMETODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVAENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE IMPACTO CHARPYENSAIO DE FLEXÃOMICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	 49 49 49 51 52 58 60 61 63
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1 3.5.2 3.5.3 3.6 3.7	MATERIAIS E MÉTODOSAPECTOS GERAISFIBRA DE LINHORESINA FOTOPOLIMERIZÁVELMETODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVAENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE IMPACTO CHARPYENSAIO DE FLEXÃOMICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)ANÁLISES TÉRMICAS	 49 49 51 52 58 58 60 61 63 63
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1 3.5.2 3.5.3 3.6 3.7 3.7.1	MATERIAIS E MÉTODOSAPECTOS GERAISFIBRA DE LINHORESINA FOTOPOLIMERIZÁVELMETODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVAENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE IMPACTO CHARPYENSAIO DE FLEXÃOMICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)ANÁLISES TÉRMICASANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	 49 49 51 52 58 58 60 61 63 63 63 63
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1 3.5.2 3.5.3 3.6 3.7 3.7.1 3.7.2	MATERIAIS E MÉTODOSAPECTOS GERAISFIBRA DE LINHORESINA FOTOPOLIMERIZÁVELMETODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVAENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE IMPACTO CHARPYENSAIO DE FLEXÃOMICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)ANÁLISES TÉRMICASANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)	 49 49 51 52 58 58 60 61 63 63 63 63 63 63
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1 3.5.2 3.5.3 3.6 3.7 3.7.1 3.7.2 3.7.3	MATERIAIS E MÉTODOSAPECTOS GERAISFIBRA DE LINHORESINA FOTOPOLIMERIZÁVELMETODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVAENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE IMPACTO CHARPYENSAIO DE FLEXÃOMICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)ANÁLISES TÉRMICASANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICA (DMA)	 49 49 51 52 58 60 61 63 63 63 63 64
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1 3.5.2 3.5.3 3.6 3.7 3.7.1 3.7.2 3.7.3 3.8	MATERIAIS E MÉTODOSAPECTOS GERAISFIBRA DE LINHORESINA FOTOPOLIMERIZÁVELMETODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVAENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE IMPACTO CHARPYENSAIO DE FLEXÃOMICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)ANÁLISES TÉRMICASANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICA (DMA)ENSAIO BALÍSTICO DE VELOCIDADE RESIDUAL	 49 49 51 52 58 60 61 63 63 63 63 63 64 66
3 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.5.1 3.5.2 3.5.3 3.6 3.7 3.7.1 3.7.2 3.7.3 3.8 3.9	MATERIAIS E MÉTODOSAPECTOS GERAISFIBRA DE LINHORESINA FOTOPOLIMERIZÁVELMETODOLOGIA PARA MANUFATURA ADITIVAENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE TRAÇÃOENSAIO DE IMPACTO CHARPYENSAIO DE FLEXÃOMICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)ANÁLISES TÉRMICASANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICA (DMA)ENSAIO BALÍSTICO DE VELOCIDADE RESIDUALANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	 49 49 51 52 58 60 61 63 63 63 63 64 66 68

	REFERÊNCIAS1	L 06
5	CONCLUSÃO	L 03
4.5	ENSAIOS DE VELOCIDADE RESIDUAL	97
4.4	CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA	89
4.3	ENSAIO DE FLEXÃO	84
4.2	ENSAIO DE IMPACTO	78
4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	71

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 e métodos que utilizam materiais poliméricos como matéria - prima, é possível citar a modelagem de deposição fundida, laser seletivo de sinterização, estereolitografia (SLA) e processamento digital de luz (DLP)(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, podendo tornar a produção mais barata e mais sustentável evitando desperdício de material (4). Essa sua capacidade possibilita a sua utilização em várias áreas da indústria, médica, odontológica, automobilística e proporciona os usuários a expandirem suas fabricações (2) (4).

Conhecida também como fotopolimerização em cuba, a estereolitografia é uma das mais antigas e técnicas tecnologias de impressão 3D (5). Desde sua introdução, essa técnica tem sido amplamente utilizada graças à sua capacidade de produzir geometrias complexas e altamente precisas. O processo envolve o uso de resinas poliméricas líquidas que são solidificadas por irradiação de luz ultravioleta (UV) ou visível, desencadeando uma reação química na resina, camada por camada, permitindo a construção de objetos detalhados em conformidade com o design especificado pelo usuário (5) (6) (7).

Inicialmente restritas a setores industriais, as tecnologias de manufatura aditiva que utilizam fotopolímeros líquidos ou resinas fotopolimerizáveis tornaram-se acessíveis também a consumidores finais e aplicações de manufatura leve. Utilizando projetores de luz digital ou lasers, essas tecnologias permitem uma ampla gama de aplicações, desde prototipagem rápida até a fabricação de produtos finais (5).

Desenvolvida por Larry Hornbeck da Texas Instruments em 1987, a tecnologia DLP (Digital Light Processing) utiliza um sistema de projeção baseado no dispositivo de microespelho digital (DMD), contribuindo significativamente para o avanço da impressão 3D por fotopolimerização, sendo uma inovação que oferece maior precisão e flexibilidade na criação de objetos (2) (8).

No contexto dos polímeros fotopolimerizáveis, a luz atua na etapa inicial da polimerização, tornando a fotoiniciação a parte central do processo de fotopolimerização. Esses fotopolímeros são classificados com base nas reações de fotoiniciação em sistemas de radical livre e base iônica, que diferem na produção de espécies reativas, como radicais e íons, quando expostos à luz, iniciando uma série de reações que levam à fotopolimerização (2).

Os polímeros são frequentemente escolhidos para impressão 3D devido à sua acessibilidade, custo-benefício, propriedades mecânicas projetadas e compatibilidade com diversos métodos de produção aditiva. Eles desempenham um papel essencial em setores variados como saúde, aviação, automotivo (1). A manufatura aditiva utilizando polímeros tem mostrado eficácia ao empregar uma ampla gama de materiais poliméricos com diferentes composições e formas, incluindo compósitos, compósitos termoplásticos reforçados com fibra contínua ou descontínua, e materiais híbridos (9).

Os materiais compósitos oferecem vantagens como alta resistência específica, leveza, rigidez elevada e bom comportamento dinâmico, permitindo um design flexível dos componentes (10). Recentes pesquisas avançaram na fabricação de uma ampla variedade de compósitos, incluindo tipos como os reforçados com partículas, fibras naturais e sintéticas (1). Esses compósitos são valorizados por suas excelentes propriedades mecânicas, incluindo alta rigidez, resistência superior e eficiente relação entre resistência e peso, despertando considerável interesse em ambientes acadêmicos e industriais.

Os compósitos de fibras naturais estão ganhando destaque na engenharia devido à sua sustentabilidade ecológica. Utilizados em diversos setores avançados como automotivo, aeroespacial, naval, esportivo, civil e químico, esses materiais ajudam a reduzir a dependência de combustíveis fósseis, promovendo práticas industriais mais sustentáveis (11).

O aumento do interesse na sustentabilidade ambiental tem motivado o desenvolvimento de materiais que utilizem recursos naturais, considerando que as fibras sintéticas, amplamente empregadas em compósitos poliméricos devido à sua alta resistência e rigidez, enfrentam desafios significativos relacionados à biodegradabilidade, reciclabilidade e impactos ambientais adversos (12). Neste cenário, as fibras lignocelulósicas se apresentam como uma opção sustentável, destacando-se por seu baixo consumo energético e neutralidade em relação ao dióxido de carbono. Estas fibras oferecem um ambiente de processamento amigável, proporcionando melhores condições de trabalho e reduzindo a irritação dérmica e respiratória. Sua disponibilidade mundial é um fator adicional que reforça sua utilização (13).

Para atender à demanda por peças sólidas com excelentes propriedades mecânicas e funcionalidades, pesquisas exploram a incorporação de cargas micro e nanométricas em fotopolímeros líquidos (2). Os avanços na fotopolimerização em cuba têm demonstrado sucesso ao utilizar fibras curtas para reforçar resinas em compósitos, melhorando as propriedades mecânicas e corrigindo defeitos de fabricação. Tanto compósitos reforçados com fibras curtas quanto contínuas foram fabricados com sucesso usando esse método (6).

Neste estudo, propõe-se a aplicação da fibra de Linho (Linum usitatissimum) como material de reforço para amostras impressas por DLP. O linho, uma planta herbácea da família das lináceas, destaca-se por suas fibras longas extraídas do caule e sementes oleaginosas com propriedades medicinais. Historicamente, o linho foi uma das primeiras fibras a ser fiada, com origens estimadas nas regiões do Cáucaso e Mar Morto (14). Suas propriedades intrínsecas, como preço relativamente baixo, boas propriedades mecânicas, capacidade de absorção sonora, baixa densidade e possibilidade de reciclagem, tornam-no uma escolha eficiente para diversas aplicações técnicas industriais(15).

Devido à sua elevação, rigidez específica, resistência ao impacto e capacidade de absorção, as fibras naturais são frequentemente utilizadas para maximizar a absorção de energia. A eficácia balística desses materiais é avaliada pela quantidade de energia potencial que pode absorver, considerando fatores como a velocidade do projétil e a profundidade da penetração. O desempenho balístico pode ser significativamente melhorado através da escolha do material, técnicas de fabricação, combinação de fibras e tecelagem (16).

Materiais com blindagem eficaz são essenciais para proteger contra ameaças balísticas, que podem causar danos severos a estruturas e pessoas. Compósitos reforçados com fibras apresentam comportamento ortotrópico ou anisotrópico, dependendo do padrão de configuração do reforço dentro da matriz, o que influencia diretamente suas propriedades mecânicas e a eficácia em aplicações de blindagem (17).

A seleção adequada dos materiais é crucial para minimizar os riscos de danos e lesões. Para garantir a eficácia das blindagens, é essencial avaliar o desempenho dos materiais frente às deformações operacionais que ocorrem durante impactos balísticos (17). 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 reforçados 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 mecânicas, térmicas e balísticas apresentadas por esses materiais para verificar a viabilidade do desenvolvimento desses materiais para blindagem balística.

1.1 Objetivos do Trabalho

1.1.1 Objetivos 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.

1.1.2 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 através do método de DLP;

b) Avaliar as propriedades mecânicas apresentadas pelo compósito através de ensaios de tração, flexão e impacto charpy;

c) Observar características microestruturais da superfície das amostras fraturadas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), identificando possíveis mecanismos de fratura;

d) Analisar o comportamento térmico apresentado pelo compósito através de análises térmicas de TGA, DSC e DMA;

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) é uma tecnologia emergente que permite a fabricação de componentes através da deposição de camadas sucessivas de material (2). Essa técnica baseia-se no processo de impressão de materiais, camada por camada, para construir um objeto (1) (4) (7) com base em informações oriundas de uma representação geométrica computacional tridimensional (3D) (18). A MA é conhecida também como impressão 3D (9), sendo o termo MA amplamente utilizado entre especialistas e profissionais da área científica e técnica, enquanto a expressão impressão 3D é mais comum em divulgações dirigidas ao público em geral (2).

A MA apresenta um significativo potencial na fabricação de geometrias complexas, bem como na criação de uma variedade de materiais, estruturas e formas intricadas a partir de modelos computacionais (19) (18) (7). Esta tecnologia facilita a produção de uma ampla gama de estruturas simples e complexas através de modelagem Desenho assistido por computador (CAD, da sigla em inglês *computer-aided design and drafting*) (1), transformando geometrias 3D em uma sequência de camadas bidimensionais (2D), o que simplifica o processo através do empilhamento sucessivo dessas camadas (2) (19).

Uma das vantagens mais destacadas da AM é o custo de fabricação quase constante, que não varia significativamente com a escala de produção, oferecendo uma vantagem considerável em relação aos métodos tradicionais (2). Também oferece uma vasta gama de aplicações e têm atraído diversos setores industriais, incluindo aeroespacial, defesa, ciências médicas, eletrônica, engenharia civil, indústrias automotivas, engenharia oceânica e aviação, entre outros (1) (2) (4).

A adoção crescente da MA por mais setores está tornando o processo de fabricação economicamente acessível e ambientalmente sustentável (2).Especificamente na área médica, a MA desempenha um papel crucial com biomateriais como biometais (por exemplo, aço inoxidável e ligas de titânio), biopolímeros e biocerâmicas (como hidroxiapatita, etc.), amplamente utilizados em aplicações biomédicas como engenharia de tecidos e implantes dentários (4).

Esta tecnologia é capaz de fabricar uma variedade de materiais, como metais, polímeros, compósitos, cerâmicas, madeira, pós, vidro, materiais de construção, biodegradáveis, e materiais inteligentes, utilizando processos de impressão 3D avançados (1). Esses materiais podem estar em diferentes estados físicos, como sólido, líquido, viscoelástico e géis, demonstrando a versatilidade e o potencial do processo MA em diferentes contextos (9). A MA está sendo amplamente adotada em diversos setores devido aos seus benefícios como baixo custo e desperdício de materiais, ausência de necessidade de ferramentas, facilidade na fabricação de formas complexas e viabilidade para produção em volumes menores (9) (2).

Nos últimos dez anos, a tecnologia de MA tem experimentado um aumento significativo em popularidade, com foco em pesquisas destinadas a desenvolver novas tecnologias para melhorar a eficiência dos processos e aprimorar as propriedades mecânicas e de acabamento dos materiais (2).

A MA abrange uma diversidade de métodos, materiais e equipamentos, evoluindo continuamente e com potencial para revolucionar operações de fabricação e logística de maneira significativa (18). Com o poder de transformar a produção industrial, a MA está posicionada para gerar impactos substanciais nos setores industrial, econômico e social (9).

A fabricação aditiva de um objeto 3D segue um processo que pode ser dividido em três fases principais: design, impressão e pós-processamento (2). Durante a fase de design, a geometria tridimensional desejada é criada utilizando software CAD como SOLIDWORKS, AutoCAD, entre outros, e é exportada no formato STL (Standard Tessellation Language). Em seguida, o modelo é fatiado em imagens bidimensionais (camadas) por meio de software de fatiamento, para orientar a adição de material em cada camada (1) (2) (19), conforme descrito na Tabela 1 e ilustrado na Figura 1.

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: Adaptado (5)(7)

		S	
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Model	o físico

Figura 1 – Representação das principais etapas do processo de MA (5).

2.1.1 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, ultrassonografia 3D 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 MA (19).

A necessidade significativa de tempo e esforço para corrigir arquivos no formato STL pode representar um desafio substancial e muitos sistemas de CAD 3D dependem de ferramentas projetadas para otimizar e acelerar esse processo de reparo (5). Portanto, é essencial utilizar ferramentas computacionais especializadas capazes de lidar de forma eficiente com a correção de arquivos STL. Isso permite que os usuários de CAD 3D concentrem seus esforços mais no desenvolvimento de designs e menos na solução de desafios técnicos relacionados à integridade dos modelos.

A modelagem criteriosa em CAD é crucial para a usabilidade em tecnologias de MA. Problemas geométricos podem impedir a formação de uma estrutura sólida, comprometendo a geração de uma malha adequada para a execução na MA (5).

Ao modelar objetos com múltiplas superfícies próximas, é fundamental garantir uma conexão adequada para formar um volume fechado conforme a Figura 2 e a Figura 3 ilustram, pois, erros nessa conexão podem resultar em representações falhas do objeto (5).



Figura 2 – Volume gerado com superfícies não conectadas (a) e conectadas(b) (5).



Figura 3 – Modelagem de sólido não conectado (a) e sólido único(b) (5).

Para evitar esses problemas, é essencial utilizar superfícies que formem volumes completamente fechados, com todas as superfícies devidamente conectadas.

2.1.2 Formato STL

O formato STL produz triângulos finitos que correspondem toda a superfície do modelo 3D, como exemplificado na Figura 4, 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 (19). O processo de coleta e processamento de dados para MA é alicerçado nos dados 3D do modelo obtido a partir de arquivo CAD, que por sua vez, exporta as informações no formato STL. O formato STL é amplamente adotado como padrão na indústria de MA e é amplamente suportado por todos os sistemas CAD 3D. Sua elaboração visa assegurar que modelos possam ser interpretados por qualquer sistema MA, independentemente dos recursos computacionais ou sistema operacional utilizados. Isso proporciona uma portabilidade desejável e interoperabilidade entre equipamentos e programas nesta área específica (5).



Figura 4 – Exemplo da imagem na tela de um computador de um modelo STL (19).

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, conforme ilustrado na Figura 5, 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 (5).



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

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 comum com um vértice, isso indica uma degeneração da malha e, consequentemente, sua invalidação, conforme ilustrado na Figura 6 (5).



Figura 6 – Configuração de triângulos em STL válida (a) e inválida (b) (5).

Durante a conversão para o formato STL, as superfícies de um modelo CAD 3D são discretizadas em uma malha de triângulos. A quantidade precisa e a distribuição desses triângulos são cruciais para garantir a precisão do modelo final. Para obter o melhor equilíbrio entre precisão e tamanho de arquivo, são ajustados parâmetros como comprimento da corda, flecha e ângulo de controle durante o processo de geração da malha. Esses ajustes são essenciais nos sistemas CAD para otimizar a representação digital do objeto tridimensional (5).

2.1.3 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 (5). Na Figura 7 é possível observar um exemplo de um modelo fatiado.



Figura 7 – Exemplo de imagem de um modelo fatiado (2).

Durante esta fase, é comum ocorrer problemas de vedação na superfície devido à falta de conexão entre os vértices de triângulos vizinhos. Para resolver essas falhas, podem ser utilizadas ferramentas especializadas que não apenas detectam, mas também corrigem esses problemas e essas ferramentas permitem otimizar os parâmetros tecnológicos necessários durante a fabricação do modelo em 3D (19). O arquivo resultante do software de fatiamento contém as informações geométricas detalhadas das camadas fatiadas, essenciais para o processo de impressão ou fabricação aditiva (2).

Especialmente durante a comunicação entre o software e a máquina de MA, 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.

2.1.4 Fabricação da peça no equipamento de MA

Após as etapas de modelagem digital, conversão, fatiamento e correção de erros, o projeto pode ser preparado para impressão. Esta tecnologia se destaca pela automação, reduzindo significativamente a necessidade de intervenção do operador durante o processo. No entanto, a presença do operador é crucial na preparação inicial do equipamento, ajustando parâmetros como alimentação de materiais e configurações da máquina (5).

Os parâmetros de impressão, como o tempo de exposição, são pré-definidos no software da impressora antes do início do processo, adaptando-se à técnica e ao processo específico empregados (2). Uma vez que as informações geométricas da peça são definidas por um sistema de planejamento 3D computacional, muitas etapas subsequentes podem ser executadas sem assistência direta do operador. Durante o processo de impressão, camadas 2D são depositadas sucessivamente até a construção completa do objeto, formando uma estrutura em pilha na plataforma de construção (2) (19).

As impressoras 3D, baseadas em diversas tecnologias de fabricação, operam com códigos G gerados pelo software da impressora e são compatíveis com uma variedade de formatos de arquivos 3D. Esses códigos G encapsulam todas as informações necessárias para a execução da impressão, incluindo coordenadas de movimento da impressora, imagens fatiadas, configurações de temperatura, entre outros parâmetros relevantes (2).

2.2 Classificação dos processos de MA

A MA é resultado da integração de métodos tradicionais de manufatura, como metalurgia do pó e usinagem, combinados com tecnologias avançadas como impressão a jato de tinta, laser e feixes de elétrons, além do contínuo desenvolvimento de materiais adaptados para cada processo (5).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 (19).

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 (1) (9). Esses materiais são processados com facilidade por meio de impressoras 3D, com cada método projetado para a impressão de materiais específicos (1). Entre os métodos de fabricação aditiva estão inclusos a modelagem por deposição fundida, estereolitografia, sinterização direta a laser de metal, fusão por feixe de elétrons, sinterização seletiva a laser, fabricação de objetos laminados, fusão em leito de pó e técnicas de elaboração de contornos, cada um adaptado para suas respectivas aplicações específicas (1) (3) (18) (7).

A norma ISO ASTM 52900 propõe a categorização em sete grupos distintos, descristos suscintamente na Tabela 2, baseados nos diferentes princípios de processamento utilizados nas tecnologias de produção (3) (19) (9). 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.

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.

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

Fonte: Adaptado de ASTM 52900 (2021).

2.2.1 Fotopolimerização em cuba

A estereolitografia, também conhecida como fotopolimerização em cuba, é uma das tecnologias mais antigas de impressão 3D disponíveis (5). Utiliza resinas poliméricas líquidas que são curadas por irradiação de luz ultravioleta (UV) ou visível, desencadeando uma reação química na resina fotossensível para solidificá-la na cuba (5) (6) (7). Esse processo permite criar geometrias definidas pelo usuário na superfície da resina, solidificando-a em camadas sucessivas. Embora seja altamente preciso, seu uso é limitado devido à seleção restrita de materiais disponíveis (7). Uma limitação da fotopolimerização é a dispersão da

luz UV na solução precursora do polímero, causada pela mudança na opacidade da resina durante a polimerização (8).

Os equipamentos de manufatura aditiva por fotopolimerização em cuba operam em duas configurações principais: bottom-up e top-down (2) (19). Na bottom-up, a cabeça de construção fica submersa na resina e a luz UV é projetada de baixo para cima através do fundo transparente da cuba. Na top-down, a fonte DLP fica acima da cuba e a cabeça de construção está totalmente imersa na resina. Ambos os métodos têm suas vantagens e desafios, como a separação das camadas na bottom-up e a exposição ao oxigênio na top-down (2) (7).

O método mais comum de polimerização utilizado na manufatura aditiva por fotopolimerização em cuba é a polimerização por radicais livres, que envolve sistemas de monômeros de metacrilato/acrilato. Esse processo avança através da geração de radicais livres, seguida pela propagação e terminação da reação de polimerização (8).

As tecnologias de manufatura aditiva que utilizam fotopolímeros líquidos ou resinas fotopolimerizáveis, inicialmente restritas a setores industriais, tornaram-se acessíveis também a consumidores finais e aplicações de manufatura leve (5). Estes processos empregam projetores de luz digital ou lasers para configurar as imagens.

A Figura 8 apresenta as principais técnicas de MA por Fotopolimerização em cuba. Os projetores digitais fotopolimerizam a seção transversal completa de uma vez, conhecidos como estereolitografia de projeção, enquanto os lasers curam as resinas ponto a ponto, denominados estereolitografia de varredura vetorial (7).



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

(6)

O escaneamento vetorial em impressão 3D por fotopolimerização envolve o uso de um laser focalizado sobre uma cuba contendo resina fotocurável. Um sistema óptico

direciona o feixe laser para solidificar a resina, seguindo um padrão definido pelas camadas 2D do modelo 3D fatiado. Após cada camada ser solidificada, a plataforma de construção desce para permitir a formação da próxima camada. Este processo continua até que o objeto esteja completo, sendo então submetido a um forno para a cura final da resina (5).

Na tecnologia de impressão DLP, a projeção da área da seção transversal de cada camada do modelo ocorre de maneira sequencial usando um projetor. Isso é realizado através da projeção de luz UV por um conjunto de microespelhos, que se ajustam para formar o padrão correspondente à seção transversal desejada para impressão. A fonte de luz opera geralmente na faixa de 300 a 400 nm, e cada microespelho reflete a luz para iniciar a polimerização ou desvia a luz para finalizar o processo (5).

A Figura 9 ilustra os formatos das unidades de impressão. Pontual para SLA e pixel para impressão DLP.



Figura 9 – Formatos das unidades básicas dos processos SLA e DLP. (20)

DLP é uma tecnologia de impressão desenvolvida por Larry Hornbeck da Texas Instruments em 1987, utilizando um sistema de projeção baseado no dispositivo de microespelho digital (DMD) (2) (8).

Ao contrário do SLA, que usa um feixe de laser, o DLP projeta uma imagem totalmente digital na cuba de resina. O DMD consiste em milhares de microespelhos dispostos em uma matriz em um chip semicondutor, determinando a resolução de impressão e o tamanho da área de construção conforme o número e tamanho dos microespelhos, além das lentes utilizadas para focalizar a luz projetada (8).

A tecnologia estereolitográfica DLP utiliza uma resina fotossensível que passa pela

polimerização via projeção sequencial de imagens em camadas 2D, utilizando um dispositivo DLP. Estas imagens são compostas por padrões de pixels de diferentes intensidades de luz, controlados por microespelhos no DMD, que definem a resolução espacial XY da camada polimerizada (2). Esta abordagem alcança resoluções de recurso na faixa de 0,6 a 50 μ m em uma área de impressão de cerca de 60 \times 40 mm, preenchendo o espaço entre técnicas como a impressão SLA (8).

Na Figura 10, são apresentados os componentes de uma impressora utilizando tecnologia DLP, destacando suas respectivas posições e disposições no sistema.



Figura 10 – Funcionamento de Impressora 3D-DLP.

(20)

Em essência, o processo de impressão em impressoras DLP segue um padrão geral, embora possa variar em termos de configurações geométricas, como bottom-up e top-down (2). A qualidade e o desempenho do produto final são influenciados pelas características dos materiais e pelos parâmetros do processo, especialmente o tempo de exposição para a polimerização da camada de resina líquida por radiação UV (2) (9). Um tempo de exposição inadequado pode resultar em polimerização insuficiente, levando à dissolução do fotopolímero durante a limpeza, ou polimerização excessiva, causando adesão excessiva à base da cuba e possivelmente danificando-a (2).

Assim, é fundamental estabelecer um tempo de exposição ideal para assegurar a polimerização adequada das camadas e prevenir problemas relacionados à adesão insuficiente ou excessiva.

2.3 Materiais Poliméricos

A indústria de polímeros teve início com avanços significativos, como a tecnologia de vulcanização da borracha natural patenteada em 1844 e a nitretação da celulose, que a tornou um material aplicável em produtos do cotidiano (21). O termo "polímero", criado por Berzelius em 1832, diferenciava moléculas orgânicas que, embora compostas pelos mesmos elementos químicos, poderiam apresentar propriedades distintas, como os gases etileno e buteno. A palavra deriva do grego, onde "poli"significa muitos e "meros" partes (21).

Em 1912, Leo Baekeland produziu o primeiro polímero sintético, a resina fenólica, ao reagir fenol com formaldeído, criando o material sólido conhecido como baquelite. Foi somente em 1920 que Hermann Staudinger propôs a teoria da macromolécula, estabelecendo o conceito moderno de polímero como uma substância formada por unidades repetitivas ligadas covalentemente, chamadas meros, que resultam da reação entre monômeros, as unidades básicas dos polímeros (21) (22) (23).

Por apresentarem baixo preço, facilidade de fabricação, resistência à água e versatilidade, os polímeros são utilizados em diversas aplicações dos setores domésticos e industriais (21).

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 (21) (22).

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.

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

Tabela 3 – Classificação dos polímeros

Fonte: (8)

A estrutura do polímero influência 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 (24).

Os polímeros termoplásticos são 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 (21) (22).

Os polímeros termorrígidos são materiais que, quando expostos a altas temperaturas e pressões, amolecem e fluem, podendo ser moldados (9). Eles são conhecidos como termofixos e são moldados enquanto ainda estão na forma de pré-polímero, passando por um processo de cura onde reações químicas formam ligações cruzadas entre as cadeias, solidificando-os em materiais insolúveis e infusíveis. Após a cura, esses polímeros não alteram seu estado físico quando aquecidos novamente, o que os torna não recicláveis (22).

Esses materiais são amplamente utilizados devido à sua rigidez, resistência elevada e capacidade de suportar altas temperaturas de maneira estável. Exemplos comuns de termoplásticos incluem acrílico, náilon, PE, entre outros (9).

Nos polímeros fotopolimerizáveis, considerando o mecanismo da fotoformação dos polímeros, a luz atua na etapa inicial da polimerização, o que torna a fotoiniciação a parte central do processo de fotopolimerização. Os fotopolímeros são classificados com base nas reações de fotoiniciação em sistemas de radical livre e base iônica. Esses sistemas diferem
na produção de espécies reativas, como radicais e íons, quando expostos à luz, iniciando uma série de reações que levam à fotopolimerização (2).

O processo envolve três etapas: iniciação, propagação e terminação, onde a luz UV ativa o fotoiniciador, gerando espécies reativas que reagem com oligômeros e monômeros. Os oligômeros são cadeias moleculares longas que formam a estrutura principal do fotopolímero, enquanto os monômeros atuam como diluentes (2) (25). A presença do fotoiniciador é essencial, pois sua função primordial é iniciar a fotopolimerização, convertendo a energia luminosa em espécies reativas essenciais. Para melhorar o desempenho do fotoiniciador, são elaborados sistemas mais sofisticados que podem envolver co-iniciadores, corantes inertes e fotossensibilizadores (2).

A escolha dos monômeros é guiada por critérios que incluem o controle da viscosidade, o impacto na taxa de polimerização, as propriedades do produto final, a volatilidade, o odor e a toxicidade. Essa seleção possibilita a formulação de resinas diversificadas para atender a diferentes aplicações (25).

Os polímeros são frequentemente selecionados para impressão 3D devido à sua acessibilidade, custo-benefício, propriedades mecânicas favoráveis e compatibilidade com diferentes métodos de manufatura aditiva. Eles desempenham um papel crucial em setores diversos como saúde, aviação, automotivo, brinquedos e eletrônica, refletindo sua adaptação e aplicação amplas na indústria contemporânea (1).

A manufatura aditiva empregando polímeros demonstrou eficácia ao utilizar uma ampla gama de materiais poliméricos com diversas composições e formas, incluindo compósitos, nanocompósitos, compósitos termoplásticos reforçados com fibra contínua ou descontínua, e materiais híbridos (9).

2.4 Fibras Naturais Lignocelulósicas

O aumento do interesse na sustentabilidade ambiental tem motivado o desenvolvimento de materiais que utilizem recursos naturais. Embora as fibras sintéticas, como vidro, carbono e aramida, sejam amplamente empregadas em compósitos poliméricos devido à sua alta resistência e rigidez, enfrentam desafios significativos relacionados à biodegradabilidade, reciclabilidade e impactos ambientais adversos (12).

O uso crescente de fibras naturais está se destacando devido à sua biodegradabilidade, disponibilidade abundante, custo acessível e baixo consumo de energia no processamento. As propriedades distintivas das fibras naturais, como alto módulo específico, leveza e excelente resistência ao desgaste, têm impulsionado seu emprego como reforço em compósitos poliméricos, tanto termofixos quanto termoplásticos (26).

Para superar esses desafios, as fibras naturais renováveis estão ganhando espaço

como reforços em matrizes poliméricas, neste cenário, as fibras lignocelulósicas são predominantes devido ao seu custo relativamente baixo e excelentes propriedades mecânicas em comparação com outras fibras naturais, podendo ser classificadas em diferentes categorias com base na parte vegetal de origem (12).

As fibras podem ser classificadas, principalmente em fibras naturais ou sintéticas. As fibras naturais geralmente são subdividas como vegetal, animal ou mineral (26). As fibras naturais lignocelulósicas (FNL) são obtidas em vegetais e constituem bons exemplos de materiais ecologicamente corretos (27) e podem ser classificadas com base em sua origem, incluindo caule, folha, fruto e semente, por exemplo (11). As formas de classificações para as fibras naturais são exemplificadas na Figura 11.



Figura 11 – Classificação das fibras naturais.

Fonte: Adaptado(27)

As FNLs apresentam características complexas devido à sua composição estrutural variada, que inclui celulose, hemiceluloses, lignina, pectina e substância cerosa (28). Esses materiais têm atraído interesse, mas enfrentam desafios significativos que não podem ser ignorados. A capacidade de absorver a umidade do ambiente pode comprometer a adesão dos materiais da matriz em determinadas aplicações. Além disso, a falta de uniformidade, dimensões limitadas e heterogeneidade (28) (29).

Nas fibras lignocelulósicas a celulose, que possuem predominância amorfa, se une nas paredes celulares devido à disposição aleatória da hemicelulose e da lignina (11).A celulose é o componente estrutural predominante das fibras, conferindo-lhes resistência, rigidez e estabilidade. Sua estrutura química inclui grupos hidroxila que formam pontes de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares (30). A hemicelulose, encontrada na parede celular primária, consiste em polímeros de açúcares de cinco e seis carbonos, com estruturas químicas variadas. A lignina, amorfa e aromática, e a pectina, composta por polissacarídeos complexos com cadeias laterais reticuladas, também favorecem a complexidade das fibras (13).

Além dos componentes principais, as fibras contêm pequenas quantidades de extrativos orgânicos que influenciam o cor, o odor e a resistência à resistência, e componentes inorgânicos que aumentam sua natureza abrasiva (29). A composição química e a estrutura celular das fibras de celulose são intrincadas, variando entre diferentes tipos como curauá, juta e sisal, que possuem diferentes diâmetros de lúmen e espessura de parede celular, além de diferenças de lignina, celulose e hemicelulose (12). A Tabela 4 apresenta as composições estruturais de algumas fibras lignocelulósicas.

Nome	Celulose	Lignina	Hemicelulose	Ângulo micro-	Teor de umidade
das fibras	(% em peso)	(% em peso)	(% em peso)	fibrilar (°)	(% 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

Tabela 4 – Composições estruturais de fibras naturais

Fonte: Adaptado(29)

À medida que a fibra transita das camadas primárias para as secundárias, observase um aumento na concentração de celulose e uma redução na lignina. A hemicelulose desempenha um papel crucial na estrutura da fibra, estabelecendo pontes de hidrogênio com as fibrilas de celulose para fortalecer o material.

A lignina e a pectina conferem adesividade, promovendo a coesão molecular que resulta em resistência e enfraquecimento da fibra (29). A camada secundária(s2) é determinante para as propriedades mecânicas (29) (11), onde o ângulo microfibrilar determina a flexibilidade das fibras, assim, orientações espirais prevê maior flexibilidade, enquanto orientações paralelas conferem rigidez, inflexibilidade e alta resistência (29). A Figura 12 ilustra a estrutura de uma fibra natural lignocelulósica.



Figura 12 – Estrutura de fibra natural lignocelulósica.(29)

As fibras lignocelulósicas são naturalmente hidrofílicas e absorvem umidade devido às conexões de hidrogênio entre suas macromoléculas na parede celular. Quando expostas à umidade atmosférica, essas conexões se quebram e os grupos da fibra interagem com as moléculas de água, causando inflamação da fibra na matriz polimérica hidrofóbica. Esse processo diminui a adesão entre fibra e matriz, resultando em instabilidade dimensional, fissuração da matriz e redução das propriedades mecânicas dos compósitos (29) (9).

Portanto, em muitos casos, é essencial remover a umidade das fibras durante a preparação dos compostos. Isso pode ser feito por meio de tratamentos químicos que eliminam os grupos hidroxila hidrofílicos da estrutura da fibra (29) (12). A presença de água nas fibras também pode criar vazios na estrutura dos compostos, que atuam como concentradores de tensão, produzindo ainda mais a resistência do material composto e comprometendo sua eficiência (27).

Ao analisar as diferenças entre fibras naturais e sintéticas, é importante destacar a interação com a umidade. A Tabela 5 traz informações sobre algumas fibras lignocelulósicas e sintéticas.

Nome	Densidade	Resistência à tração	Módulo de Young	Alongamento
das fibras	$(g/cm \ 3)$	(MPa)	(GPa)	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

ורד	۲	D	• 1	1		· ·	1	Cl				C1	•	111.		•	•
Tabela	h -	Prot	prieds	ades	comr	narativa	s de	1 n h	ras na	turais	com	Thras	Sint	tetica	s conv	encio	mais
rabera	0	1 10	pricu	JULUD	COLL		Juc	mo	ab ma	ourans	COIII	moran	DIII	000100	D COILY	onoro	man

Fonte: Adaptado(28)

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 (29). O uso bem-sucedido dessas fibras requer um fator de caracterização preciso, garantindo a qualidade e eficiência do material . Condições ambientais durante o cultivo afetam a quantidade de celulose e lignina em fibras naturais, influenciando sua morfologia, propriedades mecânicas e térmicas (11). Fibras com maior celulose geralmente têm melhor resistência à tração e módulo de Young. No entanto, a alta variabilidade na qualidade das fibras devido a esses fatores é uma limitação significativa (12).

As fibras naturais começam a se degradar em torno de 240°C, sendo a lignina sensível a partir de 200°C, enquanto hemiceluloses e celulose experimentam temperaturas mais elevadas para manipulação (30) (29). Melhorar a estabilidade térmica das fibras pode ser alcançado removendo hemiceluloses e lignina por tratamentos químicos específicos. A manipulação térmica das fibras naturais é crítica tanto na fabricação quanto no uso do compósito, destacando a importância de escolher fibras adequadas para cada objetivo (29).

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(13).

2.4.1 Fibra de linho

O linho, uma planta herbácea da família das lináceas, pode alcançar até um metro de altura, caracterizado por suas fibras longas extraídas do caule e as sementes oleaginosas que possuem propriedades medicinais. Historicamente, o linho foi uma das primeiras fibras a ser fiada, possivelmente entre 4000 e 3100 a.C. no Antigo Egito, com origem estimada nas regiões do Cáucaso e Mar Morto (14).

É considerada a fibra mais antiga do mundo com indícos de sua utilição há cerca de 8000 a.C. E evidências encontradas em tumbas egípicias indicam que o linho é conhecido em tempos mais longíquos (31). 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 (32).



Figura 13 – Fragmento de bandagem de mumia feito de lihho e decoradas com um capítulo do livro livro dos mortos (31).

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 (31).

Seu cultivo é preferencialmente em climas temperados e solos férteis e abundantes de água (14).Após cerca de 60 dias da semeadura, as flores aparecem brevemente devido ao curto ciclo de vida. Após três semanas, as plantas atingem 80-120 cm e são arrancadas pela raiz para maximizar o comprimento das fibras. Após a colheita, as sementes são separadas e parte delas usada para semeadura (31). Desde 1939, houve um avanço notável na qualidade das sementes. Hoje em dia, as sementes passam por certificação, garantindo a autenticidade da variedade, sua pureza e a capacidade de germinação (15). As fibras são agrupadas, secas e imersas em água e na Figura 14 é mostrada uma plantação de linho.



Figura 14 – Plantação de linho (33).

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 filamentosa. Esta etapa facilita o processo de separação das fibras do caule (14).

Existem diversas técnicas para a retificação de plantas. Uma delas é a imersão em água parada, na qual os feixes são colocados em tanques com água fria por até 15 dias, dependendo da temperatura. Outra técnica é a imersão em água corrente, feita em rios ou córregos, comumente praticada em áreas produtoras. A maceração no solo ou por orvalho tem gradualmente substituído métodos de imersão em água e é ainda utilizada na Europa devido ao menor custo e ao menor impacto ambiental (15).

Atualmente, o controle manual determina o grau de maceração e as propriedades da fibra durante o processo (15). A maceração tradicional pode ser imprevisível e demorada devido a condições variáveis como clima e região e é ilustrada na Figura 15. No entanto, a maceração enzimática surge como uma alternativa mais eficiente, oferecendo maior controle e especificidade ao processo (34).

Após estarem secos, os caules passam pelo processo de separação das fibras, um processo bruto e vigoroso chamado trilhamento, onde a fibra é extraida 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



Figura 15 – Linho no processo de maceração (35).

20% da palha inicial segue para a indústria têxtil(31).

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 (14).

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 (15). As fibras de linho superam as de algodão em desempenho, mesmo com tamanhos similares. Isso se deve ao menor ângulo de microfibrila do linho (10° versus 20-30° no algodão), o qual influencia suas propriedades mecânicas. O linho se apresenta como uma escolha inteligente e eficiente para diversas aplicações (15).

2.5 Materiais Compósitos poliméricos reforçados com fibras

Compósitos podem ser considerados o resultado da fusão de dois ou mais materiais com características distintas, sejam eles sintéticos ou naturais, fazendo parte da categoria de materiais heterogêneos. Essa abordagem, que se baseia na combinação estratégica de diferentes materiais, pode gerar conjuntos de propriedades superiores (26) (30).

Compósitos híbridos, formados por uma matriz polimérica e múltiplos materiais de reforço, oferecem maior rigidez e resistência do que seus componentes individuais, variando conforme a origem e escala (micro/nano) dos reforços utilizados, resultando em uma ampla gama de propriedades disponíveis (26).

O primeiro componente, conhecido como carga ou agente de reforço (fase descontí-

nua), 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(36). Devido à resistência das fibras em compósitos fibrosos geralmente superar significativamente a resistência da matriz, esses materiais são comumente chamados de "compósitos reforçados com fibras"(37).

Compósitos podem ser criados para exibir propriedades mecânicas, elétricas anisotrópicas e condutividade térmica inovadoras, representando uma vantagem potencial significativa que desperta interesse considerável na comunidade de pesquisa (18).

Em teoria, as propriedades dos compósitos híbridos seguiriam a regra das misturas se não houvesse interação química ou física entre as fibras de reforço (26) (36). Essa regra é formulada conforme a Equação 2.1:

$$P_c = P_m V_m + P_p V_p \tag{2.1}$$

Onde:

 P_c : Propriedade estimada do compósito;

 P_m : Propriedade da matriz;

 P_p : Propriedade 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 16.

Os materiais compósitos oferecem vantagens como alta resistência específica, leveza, rigidez elevada e bom comportamento dinâmico, permitindo um design flexível dos componentes (10). Recentes pesquisas avançaram na fabricação de uma ampla variedade de compósitos, incluindo tipos como os reforçados com partículas, fibras naturais e sintéticas, nanomateriais, polímero-metal iônico, grafeno e compósitos celulares leves, entre outros, todos disponíveis comercialmente em diversos materiais compósitos (1). Os reforços fornecem resistência e suporte à matriz para transferência de carga, enquanto a matriz mantém os reforços posicionados. A adição de fibras ou partículas como reforços contribui para melhorar as propriedades mecânicas e outras características do material (10).

Compósitos poliméricos reforçados com fibra são amplamente valorizados por suas excelentes propriedades mecânicas, incluindo alta rigidez, resistência superior e eficiente relação entre resistência e peso, despertando considerável interesse em ambientes acadêmicos e industriais (6). Esses materiais são fabricados combinando dois ou mais



Figura 16 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos (36).

materiais distintos, cada um com propriedades únicas, para alcançar melhorias que não seriam possíveis individualmente pela fibra ou pela matriz e que consistem em três componentes que são as fibras, a matriz e a interface(9) e são amplamente adotados na indústria devido à sua notável relação entre resistência e peso, além de sua característica leve. Algumas dessas matrizes poliméricas podem ser de natureza termoplástica, termofixa (6).

Os compósitos de fibras naturais estão ganhando destaque na engenharia devido à sua sustentabilidade ecológica. Utilizados em diversos setores avançados como automotivo, aeroespacial, naval, esportivo, civil e químico, esses materiais ajudam a reduzir a dependência de combustíveis fósseis, promovendo práticas industriais mais sustentáveis (11).

Conforme ilustrado na Figura 16, 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 ou curtas (9) podem estar alinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. Uma distribuição uniforme das fibras proporciona melhores propriedades gerais dos compósitos (36).

As fibras contínuas são longas (geralmente mais de 15 vezes o comprimento crítico lc), enquanto as fibras descontínuas ou curtas têm comprimentos inferiores a esse valor. Quando as fibras são mais curtas que lc, a deformação na matriz ocorre principalmente ao redor da fibra, resultando em uma transferência de tensão quase negligenciável. Assim, o reforço proporcionado pela fibra é mínimo nessas circunstâncias (36). O comprimento crítico da fibra pode ser calculado usando a Equação 2.2.

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \tag{2.2}$$

Onde:

Lc: Comprimento crítico da fibra;

 σ_f : Limite de resistência à tração da fibra;

d – Diâmetro da fibra;

 τ_c – Tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz.

A orientação aleatória das fibras curtas em compósitos resulta em variações nas propriedades mecânicas devido à distribuição complexa de carga ao longo das interfaces e garantir consistência nessas propriedades é um desafio significativo (29).

As fibras naturais são geralmente hidrofílicas, o que pode complicar sua integração em matrizes poliméricas hidrofóbicas devido à absorção de umidade (27) (29). Quando as fibras absorvem água, isso cria espaços vazios dentro dos compósitos, onde as tensões podem se concentrar, reduzindo a resistência geral do material (27). Esse efeito é causado pela ruptura das ligações de hidrogênio presentes nas fibras lignocelulósicas quando expostas à umidade, resultando no inchaço das fibras dentro da matriz (29).

O inchaço compromete a adesão entre a fibra e a matriz polimérica, o que leva à instabilidade dimensional, formação de fissuras na matriz e diminuição das propriedades mecânicas dos compósitos (29) (37). Assim, muitas vezes, é necessário remover a umidade das fibras através de tratamentos químicos para reduzir a absorção de água e minimizar seus efeitos adversos sobre o desempenho dos materiais compósitos (29).

Devido às diferentes estruturas químicas das fibras e da matriz polimérica, os acoplamentos entre eles frequentemente apresentam desafios na transferência eficiente de estresse na interface, dos compósitos fabricados, podendo resultar na formação de microfissuras na região de contato entre a fibra e a matriz (29).

A adesão interfacial adequada é crucial para garantir uma ligação eficaz entre a fibra e a matriz de resina, sendo essencial para determinar as propriedades dos compósitos (9), sendo a interface fundamental na transferência de carga da matriz para as fibras, sendo responsável pelo efeito de reforço do compósito (29). Após a seleção da fibra, a interface fibra-matriz é um critério de seleção essencial para a matriz sustentável desenvolver um alto desempenho (38).

A aplicação de tratamentos químicos de superfície em fibras naturais reforçadas em compósitos busca reduzir sua hidrofilicidade, limpar suas superfícies, aumentar a rugosidade e diminuir a capacidade de absorção de água, resultando em interfaces fibramatriz aprimoradas (12) (37). Esses tratamentos são fundamentais para otimizar a interação fibra-matriz (29), reduzindo o número de grupos OH na superfície das fibras e promovendo ligações covalentes robustas.

Diferentes métodos, como tratamentos alcalinos, de silano, peróxido e ácido esteárico, são empregados para melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos (37), aumentando a adesão interfacial e reduzindo a absorção de umidade (12). Essas intervenções químicas são essenciais para melhorar a estabilidade dimensional, resistência à tração e outras propriedades dos compósitos de fibras naturais, tornando-os mais adequados para diversas aplicações industriais (37).

As fibras naturais têm limitações de estabilidade térmica, o que restringe seu uso em aplicações de alta temperatura, pois, a baixa resistência ao calor aumenta o risco de degradação da celulose e emissão de materiais voláteis, afetando negativamente as propriedades do compósito (37). Normalmente processadas até cerca de 200 °C, elas podem tolerar breves exposições a temperaturas mais altas (29) (37). Melhorar a estabilidade térmica pode envolver a remoção de hemiceluloses e lignina por tratamentos químicos, além disso, a temperatura controlada das fibras naturais é essencial tanto na produção quanto na aplicação dos compósitos, enfatizando a necessidade de selecionar fibras apropriadas para cada finalidade específica (29).

O resultado final dos métodos tradicionais de fabricação de compósitos é satisfatório, embora frequentemente envolva processos custosos, como fabricação de moldes, impregnação de fibras com resina polimérica, cura em autoclave e pós-processamento (18). Os compósitos poliméricos fabricados aditivamente são amplamente empregados em diversos setores, eles permitem a criação de componentes flexíveis, como eletrônicos vestíveis e materiais têxteis avançados, devido à adaptabilidade dos polímeros a diferentes processos de manufatura aditiva e à capacidade de personalização para geometrias complexas com alta precisão (9).

Os materiais à base de celulose desempenham um papel crucial na fabricação de polímeros reforçados com celulose para diferentes técnicas de impressão 3D, como por exemplo a estereolitografia, e são amplamente utilizados em diversas indústrias, incluindo têxtil, saúde e eletrônica (1).

Para atender à demanda por peças sólidas com excelentes propriedades mecânicas e funcionalidades, pesquisas exploram a incorporação de cargas micro e nanométricas em fotopolímeros líquidos, visando diversas aplicações (2). O reforço desses polímeros com fibras e partículas visa aumentar suas propriedades mecânicas, tornando-os adequados para aplicações que exigem resistência e durabilidade no transporte de carga (9). A extrusão de materiais, a fotopolimerização em cuba e o jateamento de materiais têm se mostrado eficazes na fabricação de compósitos com fibras (6).

Os avanços na fotopolimerização em cuba têm demonstrado sucesso ao utilizar

fibras curtas para reforçar resinas em compósitos. Isso não apenas melhora as propriedades mecânicas, mas também corrige defeitos de fabricação, tanto compósitos reforçados com fibras curtas quanto contínuas foram fabricados com sucesso usando esse método (6). Atualmente, a fotopolimerização em cuba vem sendo investigada como uma nova técnica de fabricação para produzir compósitos feitos de diversos materiais, adaptados para várias aplicações, permitindo ajustar características como resistência mecânica, condutividade elétrica, biocompatibilidade, entre outras (2).

A utilização da fotopolimerização em cuba oferece uma abordagem simplificada para a fabricação de compósitos reforçados com fibras curtas, permitindo a dispersão das fibras na resina e sua cura através da irradiação (6).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Apectos gerais

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 17 ilustra o tecido adquirido e o processo de desfiamento:



Figura 17 – A - Tecido de linho como recebido, B - em processo de desfiamento e C - linhas desfiadas.

fonte: Autor

O processo de preparação das fibras, antes de ser encorporada a resina fotossensível para a impressão, ocorreu basicamente com as estapas de separação dos fios, corte, desidratação e peneiração, conforme o esquema ilustrado na Figura 18.

As fibras foram moídas no laboratório do J 107 do IMA localizado na UFRJ, utilizando um moinho de facas, a fim de conseguir encorpora-la da forma mais homogênea possível à resina. A Figura 19 mostra como as fibras recém moidas saiam do moinho e como se apresentaram alguns minutos após a moagem.

Devido às características hidrofílicas, comum às fibras lignocelulósicas, as fibras de linho apresentaram uma absorsorção 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



Figura 18 – Processo de preparo das fibras de linho fonte: Autor



Figura 19 – A - Fibras no processo de moagem B - Fibras algumas horas após a moagem. fonte: Autor

degradação da mesma. Na Figura 20 é possível observar as fibras antes do processo de peneiração.

Foram testadas peneiras de variadas dimensões de poros para que se obtivesse o melhor aproveitamento possível, nisso, foram utilizadas telas com 0,71mm, 0,5mm e 0,18mm, dispostas em um agitador na vibração máxima, do maior para o menor poro. Desta forma, era possível obter a cada ciclo de 30 minutos de peneiração com agitação máxima 0,283g de fibra peneirada.

As fibras foram peneiradas e submetidas à exposição de 50°C por 24h, para que ocorra uma padronização no processo, e então, foram utilizadas conforme necessário e incorporadas à resina no momento da impressão.



Figura 20 – Fibras antes do processo de peneiração. fonte: Autor

3.3 Resina fotopolimerizável

Para preparar as amostras por manufatura aditiva foi usado uma resina 3D Azul Opaca (405 nm), ilustrada na figura 21, fornecida pela D3M INDUSTRIA E COMERCIO LTDA. Este polímero é produzido para impressoras que operam com a tecnologia de processamento digital da luz SLA e DLP. O material proporciona alta velocidade de polimerização, de cura e qualidade final da impressão(7).



Figura 21 – Fotopolímero utilizado na MA (3D Fila Azul Opaca) (7). fonte: Adaptado de 3D Fila 2023

Aparência	Líquido azulado
pH	6,8 7,3
Ponto de fusão / Ponto de congelamento	$< 0^{\circ}$ C
Ponto inicial de ebulição e range de ebulição	$> 200 \ ^{o}C$
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 $^{\circ}C$
Massa específica a 20 $^{\circ}C - kg/m3$	1122,2

Tabela 6 – Informações técnicas da resina fotopolimerizavel 3D fila.

Fonte: Adaptado	de 3 D Fila 2023
-----------------	--------------------------

O fabricante disponibiliza as informormações de composição e propriedades físicoquímicas, e estão listadas na tabela 6.

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.



Figura 22 – Modelos digitais das amostras obtidas através do software AutoCAD®. Corpo de prova de tração

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 Funsion 360 – AutoDesk®.



Figura 23 – Modelos digitais para conversão no software Fusion 360®. Corpo de prova de tração

fonte: (9)

Após a etapa de conversão, o arquivo em formato ".stl"foi carregado no programa LycheeSlicer® que gera códigos "G"baseados nas informações do arquivo. 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 etapa de impressão. Neste trabalho foi utilizado a impressora 3D da marca Creality modelo Halot One CL-60, apresentada na Figura 25.



Figura 24 – Utilização do Software LycheeSilicer® para realizar o fatiamento dos projetos das amostras.Corpos de prova de tração.

fonte: (9)



Figura 25 – Impressora 3D utilizada para fabricação das amostras. (9).

A impressora é configurada com parâmetros segundo as indicações do fabricante do equipamento e da resina utilizada que estão listados na Tabela 7.

Parâmetros	Valores
Temperatura de operação	$25^{\circ}\mathrm{C}$
Tempo de exposição da camada inferior	$58 \mathrm{s}$
Atraso na tela	$5 \mathrm{s}$
Tempo de exposição	$5 \mathrm{s}$
Espessura da camada inferior	$6 \mathrm{mm}$
Velocidade do Motor	4 mm/s

Tabela 7 – Parâmetros utilizados para impressão das amostras.

Fonte: Adaptado de (9)

A quantidade de resina utilizada é indicada pela própria impressora de acordo com o modelo digital a ser produzido. Em média, foram utilizados cerca de 145g de resina para cada impressão realizada. A fibra foi encorporada à resina de forma manual e aos poucos a fim de que a mistura fique homogênea e apta para a impressão, conforme a Figura 26 mostra.



Figura 26 – Encorporação da Fibra à resina fonte: Autor

Ao término da impressão as amostras foram retiradas da impressora e passadas no álcool para retirar a peça do suporte e remover excesso de resina, quando necessário. Então, foram levadas ao banho de luz UV para 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, como demonstrado na Figura 27.



Figura 27 – Amostras expostas à luz UV fonte: Autor

3.5 Ensaios para caracterização

Na tabela 8 segue a projeção da ordem dos ensaios que foram realizados e a quantidade de amostras fabricadas para cada compósito.

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

Tabela 8 – Planejamento dos ensaios realizados

3.5.1 Ensaio de tração



Figura 28 – Geometria adotada para produção dos corpos de prova.

Os ensaios de tração foram desenvolvidos conforme norma ASTM D638-14 (2015), onde os corpos de prova são fabricados nas dimensões indicadas pela norma (36).

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 Tabela 9 e a Figura 28. A Figura 29 apresenta corpos de prova recém impressos.

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:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0} \tag{3.1}$$



Figura 29 – Impressão recém finalizada (A) e (B), amostras em banho de luz UV (C).

Tabela 9 – Dimensões das amostras para ensaio de tração (mm)

Dimensões do corpo de prova	Espessura $T = 3,0 \text{ mm}$
W – Largura da seção estreita	$6 \mathrm{mm}$
L – Comprimento da seção estreita	$33 \mathrm{mm}$
WO – Largura geral	19mm
L0 – Comprimento geral	115 mm
G – Comprimento do medidor	25 mm
D – Distância entre garras	$65 \mathrm{~mms}$
R – Raio do filete	14 mm
R0 – Raio Externo	25 mm

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{3.2}$$

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 10, 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.

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	$5 \mathrm{s}$	5,5s	6s	7s	8s
Espessura da camada inferior	6 s	6 s	6 s	6 s	6 s
Velocidade do Motor	$8 \mathrm{mm} \mathrm{s}$				

Tabela 10 – Parâmetros utilizados para impressão das amostras de tração.

Fonte: Autor

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 (39). A realização deste ensaio seguiu conforme a norma ASTM D256-10 (2018), foram produzidas nas dimensões 63,5mm, 12,7mm e 10mm e o entalhe com 45°(40), a geometria e as dimensões adotadas para os CPs estão representadas pela Figura 30.



Figura 30 – Geometria adotada para produção dos corpos de prova.

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 atinge o corpo de prova. O corpo de prova é fixado por um par de garras na posição vertical. O entalhe central do corpo de prova é posicionado na face que recebe o impacto.

Para a confecção dos corpos de prova, foram adotados os parâmetros de impressão descritos na Tabela 11 e a Figura 31 apresenta as amostras impressas e prontas para o ensaio.

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	$5 \mathrm{s}$	5,7s	6s	6,7s	7s
Espessura da camada inferior	6 s	6 s	6 s	6 s	6 s
Velocidade do Motor	$6 \mathrm{mm} \mathrm{s}$	6 mm s	6 mm s	6 mm s	6 mm s

Fonte: Autor

Tabela 11 – Parâmetros utilizados para impressão das amostras.



Figura 31 – Corpos de prova para ensaio de impacto compósito 2% de fibra de linho.

3.5.3 Ensaio de Flexão

O ensaio foi 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 seguiram 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 32. Um corpo de prova é colocado



Figura 32 – Geometria adotada para produção dos corpos de prova.

sobre dois suportes em uma posição plana e é submetido a uma carga localizada 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 (34). A Figura 33 mostra corpos de provas utilizados no ensaio de flexão.



Figura 33 – Amostras para ensaio de flexão.

fonte: Autor

3.6 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica amplamente utilizada para analisar a superfície de materiais com alta resolução. Ela funciona emitindo um feixe de elétrons que interage com a amostra, gerando sinais como elétrons secundários, retroespalhados e raios X característicos, que fornecem informações topográficas, morfológicas e composicionais. A imagem resultante é formada a partir da varredura do feixe sobre a superfície da amostra. Para a análise, a amostra precisa estar condutora, caso contrário, é coberta com uma camada de material condutor, sendo útil para avaliar defeitos, texturas, interfaces e mecanismos de falha em materiais.

Neste trabalho foram realizados análises com elétrons secundários e as amostras foram recobertas com uma camada de ouro. Foram realizadas micrografias com aumentos entre 50x a 1000x nos corpos de prova após sofrerem fratura, utilizando o equipamento Quanta FEG 250, do Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do IME.

3.7 Análises Térmicas

3.7.1 Análise termogravimétrica (TGA)

Os compósitos produzidos foram cominuídos, conforme a mostrado na Figura 34 e colocados em cadinho de platina para a realização da análise termogravimétrica, que permite medir a mudança de massa de uma amostra em função da temperatura, sendo possível obter informações sobre a estabilidade térmica do material. A análise ocorreu através do equipamento Shimadzu modelo DTG-60H, 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 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 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.



Figura 34 – Amostra do compósito 0,5% cominuída para TGA. fonte: Autor

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 (Tan δ), como também determinar de uma forma direta a temperatura de transição vítrea (Tg) 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 36 A e B.



Figura 35 – Amostras dos compósitos cominuídas para TGA e DSC. 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 Misturas Poliméricas e Compósitos Condutores - LMPCC/UFRJ. Foram utilizados os seguintes parâmetros de ensaio: Temperatura = 0-160°C; Frequência = 1,0 Hz; Deformaçãode = 0,05%; Taxa de aquecimento = 5° C/min; Atmosfera = Nitrogênio.



Figura 36 – (A) Amostras para DMA recém impressa. (B) Amostras dos compósitos para DMA.

fonte: Autor

3.8 Ensaio balístico de velocidade residual

Para o ensaio foram produzidas placas de compósitos nas dimensões de 68x55x7 mm, conforme a figura 38, 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.



Figura 37 – Placa compósita presa na estativa. fonte: Autor

Para os testes foram realizados através de um radar Doppler WEIBEL SL-520P pertencente ao Centro de Avaliações do Exército (CAEx), onde ocorreu os testes. Foi utilizado projétil de calibre 9mm com distância do alvo de 5 metros, Figura 37. Foram considerados 8 disparos em cada grupo analisado para a determinação da velocidade residual e a Figura 38 mostra corpos de prova antes da realização dos ensaios.



Figura 38 – Amostra para ensaio de velocidade residual produzidas por MA. fonte: Autor

3.9 Análise de variância (ANOVA)

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

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;

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.).

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

Tabela 12 – Parâmetros para análise de variância (ANOVA).

$$d.m.s = q.\sqrt{\frac{QMR}{r}} \tag{3.3}$$

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 possivel 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

Os compósitos foram preparados com 0.5%, 1% 1.5% 2% em fração mássica de fibras. O carregamento da fibra impactou significativamente na viscosidade da resina como mostrado na Figura 39, por este motivo, a fração mássica máxima utilizada foi de 2%, sendo possível fabricar todos os corpos de prova necessários para a realização das caracterizações propostas.



Figura 39 – Compósito com fração mássica de 2,5% de fibra não apta para impressão. fonte: Autor

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 corpos de prova de cada fração de fibra rompidos após ensaio.



Figura 40 – Corpos de prova rompidos após ensaio de tração fonte: Autor
As Figuras 41, 42 e 43 apresentam as curvas correspondentes às médias dos resultados de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação percentual obtidos nos ensaios realizados. A Tabela 13 mostra os valores médios para as propriedades mecânicas apresentadas pela resina e compósitos com diferentes frações mássicas de fibra de linho.



Figura 41 – Médias das resistências à tração máxima em função da fração mássica da fibra de linho.



Figura 42 – Médias da deformação máxima em função da fração mássica da fibra de linho. fonte: Autor



Figura 43 – Médias do módulo de elasticidade máximo em função da fração mássica da fibra de linho.

Amostra	Resistência à Tração(MPa)	Módulo
	à Tração (MPa)	${ m de\ elasticidade(GPa)}$
CP 0	$33,02\pm7,42$	$1,12\pm0,14$
CP 0,5	$24,41 \pm 3,76$	$1,15\pm0,09$
CP 1	$26,\!42{\pm}2,\!16$	$1,20 \pm 0,70$
CP 1,5	$20,36\pm2,12$	$1,\!17{\pm}0,\!07$
CP 2	$20,90 \pm 3,37$	$1,12{\pm}0,16$

Tabela 13 – Propriedades de flexão dos compósitos.

Fonte: Autor

Através dos resultados obtidos é possível observar que a Resina pura apresenta a maior resistência (33,02 MPa), indicando que a adição de fibra tende a reduzir a resistência em geral. Os resultados obtidos para os compósitos com 0,5% e 1% de fração mássica de fibra mostram um decréscimo inicial seguido por uma leve recuperação. Sugerindo maior consistência neste último por apresentar menor variação (±2,16).

Nos compósitos com 1,5% e 2%, a resistência à tração é significativamente menor, o que pode indicar má interação fibra-matriz. A adição de fibra em excesso nesses compósitos, que apresentaram considerável alteração na viscosidade da resina para a impressão, pode ter criado pontos de falha na matriz, como bolhas ou pontos não fotopolimerizados causados pela opacidade da fibra (39).

Em relação ao Módulo de Elasticidade, verificou-se pequena variação entre as amostras (1,12–1,20 GPa), indicando que a rigidez do compósito não aumentou substancialmente com a fibra. O compósito com 1% de fração mássica de fibra mostrou módulo com maior valor (1,20 GPa), mas com alta variabilidade ($\pm 0,70$), sugerindo possíveis inconsistências no processamento ou na distribuição da fibra. Este aumento no módulo do compósito pode indicar uma leve contribuição estrutural da fibra à rigidez, mas a falta de uniformidade prejudica o desempenho geral.

Diante das informações observa-se, que de forma geral, os compósitos perdem desempenho quando comparados a resina pura, sugerindo a necessidade de otimização da interação fibra-matriz, expondo a fibra a um tratamento químico ou biológico para melhorar suas propriedades (12) (39).

Pode-se sugerir que o método de manufatura aditiva utilizado possivelmente gerou compósitos com microdefeitos, a dispersão das fibras e sua adesão à matriz. Essa hipótese é reforçada pelos resultados obtidos, que se diferenciam de compósitos produzidos por outros métodos, como moldagem convencional ou injeção, os quais geralmente demonstraram uma tendência mais consistente de melhoria nas propriedades mecânicas (28) (41).

Os resultados apresentados na Tabela 14 mostram que o teste ANOVA foi realizado para comparar as diferenças entre as médias das amostras no ensaio de tração, considerando um nível de significância de 5%.

Tabela 14 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as resistências à tração dos compósitos obtidas nos ensaios de Tração

\mathbf{SQT}	SQR	F calculado	F tabulado
5948	$4559,\!83$	2,28	2,69

JQI	squ	r calculato	r tabulauo
5948	$4559,\!83$	2,28	$2,\!69$

~~~	~~~~		
5948	$4559,\!83$	2,28	2,69
		Fonte: Autor	

O valor de F calculado (2,28) é menor que o F tabulado (2,69). Indicando que, com um nível de significância de 5%, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que existe uma diferença significativa entre as médias comprovadas no ensaio de tração. O fato de não haver diferença significativa sugere que a adição de fibras, dentro dos níveis testados, não apresentou impacto estatisticamente relevante na resistência à tração, ou que a variabilidade nos dados mascarou possíveis efeitos.

Ao analisar as micrografias apresentadas pelo compósito com 2% de fração mássica de fibra de linho, nas Figuras 44 e 45, foram apresentados dois aspectos principais nos padrões de fratura: regiões lisas e espelhadas, que indicam uma fratura de natureza frágil.



Figura 44 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (2%) em fração mássica de fibras ensaiado por tração 50x.

Além disso, identificaram-se regiões com um aspecto fibroso, apresentando múltiplas microcavidades de formato irregular. Também foi possível notar o rompimento das fibras do compósito, acompanhado pelo descolamento da matriz, indicando uma falha na interface fibra-matriz (39). Ainda é possível observar que as fibras se apresentam em camadas sequenciais conforme as camadas geradas pelo processo de manufatura aditiva utilizado.



Figura 45 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (2%) em fração mássica de fibras ensaiado por tração 100x.

### 4.2 Ensaio de Impacto

Na Tabela 15, são apresentados os resultados médios de energia absorvida pelos compósitos, obtidas nos ensaios de impacto Charpy. Todos os corpos de prova submetidos ao ensaio sofreram ruptura completa conforme mostrado na Figura 46, validando os resultados obtidos.



Figura 46 – Comparação das energias de fratura dos compósitos, obtidas nos ensaios de impacto Charpy

#### fonte: Autor

Tabela 15 – Energia média absorvida e desvio padrão obtidos nos ensaios de impacto Charpy dos compósitos.

Amostras	Energia média absorvida $(kJ/m^2)$
0%	$3,21 \pm 0,62$
0,5%	$2,01\pm 0,74$
1%	$2,08 \pm 0,48$
1,5%	$2,20\pm 0,69$
2%	$1,66 \pm 0,51$

Fonte: Autor

Ao analisar os dados apresentados pela Tabela 15 e as Figuras 47 e 48 nota-se uma diminuição da energia absorvida em relação à fração de fibras nos compósitos quando comparados a resina fotossensível pura. Apresentando a maior energia média absorvida  $(3,21 \text{ kJ/m}^2)$ , indicando que o material puro é mais resistente a impactos em comparação aos compósitos. A redução significativa da energia absorvida nos compósitos sugere que a introdução de fibras fragilizou o sistema. A energia absorvida pelos compósitos é menor em todas as frações, variando de 1,66 a 2,20 kJ/m².

Os compósitos com 0.5% de fração mássica de fibra de linho apresentaram menor energia absorvida, possivelmente devido à baixa quantidade de fibra, que pode não contribuir efetivamente para dissipar a energia de impacto. Os compósitos com 1% e 1.5% mostram uma leve recuperação ( $2.08 \text{ e } 2.20 \text{ kJ/m}^2$ ), proporcionando uma possível melhoria na dispersão e interação das fibras com a matriz nessa faixa de fração mássica. Os compósitos com 2% Apresentaram a menor energia média consumida ( $1.66 \text{ kJ/m}^2$ ),



Figura 47 – Energia de impacto charpy em função das frações mássicas de fibras de linho dispostas nos compósitos.





Figura 48 – Comparação das energias de fratura dos compósitos, obtidas nos ensaios de impacto Charpy.

indicando que o aumento da fração máxima de fibras prejudicou a integridade do material, possivelmente devido à má dispersão ou aos pontos de falhas na matriz.

A redução significativa na energia absorvida com a adição de fibras pode ser atribuída a falhas na interface fibra-matriz, como descolamento e maior adesão, além da possível concentração de microdefeitos gerados durante o processamento (41). Os resultados indicam que a adição de fibras não contribuiu para a melhoria da resistência ao impacto, sendo necessário investigar se tratamentos superficiais nas fibras poderiam melhorar a interação com a matriz (42) (43). O processo de fabricação aditiva pode ter níveis de desempenho influenciados ao impacto devido à formação de defeitos internos, como bolhas ou regiões não fotopolimerizadas. Além disso, a deposição em camadas pode gerar descontinuidades que atuam como iniciadores de fratura (39) (44).

Para verificar a existência de diferenças significativas entre as energias absorvidas pelos compostos, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%. Além disso, utilizou-se o teste de Tukey, com base na diferença mínima significativa (DMS), para identificar quais médias significativamente entre si, também com nível de significância de 5%.

Os resultados do teste, apresentados na Tabela 16, mostram que o valor de Fcalculado » Fcrítico, permitindo concluir, com 95% de confiança, que há diferenças estatisticamente significativas entre as médias. Observa-se, no entanto, que essas diferenças significativas ocorrem apenas entre a resina pura e os compósitos.

Tabela 16 – Parâmetros estatísticos dos testes de ANOVA e de Tukey para as resistências ao impacto dos compósitos 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

Foram analisadas as micrografias de amostras fraturadas de 1,5%. Nas Figuras 49, 50, 51.



Figura 49 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (1,5%) em fração mássica de fibras ensaiado por impacto 300x.



Figura 50 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (1,5%) em fração mássica de fibras ensaiado por impacto 400x.

É possível observar que a superfície apresenta um padrão misto, com regiões relativamente lisas, indicativas de fratura frágil, e áreas mais rugosas, sugerindo alguma deformação plástica.

Pequenos vazios e bolhas são visíveis, o que pode indicar porosidade no compósito, reduzindo suas propriedades mecânicas (39). Percebe-se trincas principais e secundárias e que se originam em áreas próximas às fibras, reforçando a hipótese de falhas de adesão. As fibras permanecem parcialmente embutidas na matriz, mas com evidências de destacamento em várias áreas (41). A matriz parece ter rompido de maneira frágil ao redor das fibras, com pouca evidência de interação mecânica significativa. Algumas fibras apresentam matriz residual aderida, contudo, outras áreas mostram fibras completamente expostas, possivelmente devido a uma adesão deficiente (43).



Figura 51 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (1,5%) em fração mássica de fibras ensaiado por impacto 700x.

### 4.3 Ensaio de Flexão

Na Tabela 17, são apresentados os resultados de resistência à flexão ( $\sigma_f m$ )e módulo de flexão ( $E_B$ ) dos compósitos e na Figura 53, são mostradas suas curvas. A Figura 52 apresenta um corpo de prova de cada fração de fibra produzido, após serem submetidos aos ensaios de flexão.

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

<b>D</b> • 1	1 1 1	a ~ 1		· · ·
- Propriod	19 DOD POL	HOV90 d	log comp	OCITOC -
	iaues ue	ncau u	$\log comb$	COTTOP.
 · T. · ·			<b>T</b>	





Figura 52 – Corpos de prova após ensaio de flexão fonte: Autor

Ao se analisar os dados apresentados pela Tabela 17, se observase que a resina pura Apresenta o maior valor médio ( $65,09\pm16,60$  MPa), indicando que a matriz polimérica, sem reforço de fibras, possui maior capacidade de suportar esforços antes da fratura. A resistência decresce significativamente com a adição de fibras. Embora o compósito com 1% de fibras mostre um valor superior ( $42,88\pm11,78$  MPa) comparado a outras frações mássicas de fibra, ainda assim, o desempenho é inferior ao da resina pura.

A redução pode ser atribuída a falhas na interface fibra-matriz, como descolamento, má dispersão das fibras e presença de microdefeitos durante o processo de fabricação, prejudicando a transmissão de esforços entre matriz e fibras (45).

A resina pura (739,55 $\pm$ 220,37 GPa) apresenta um módulo elevado, indicando boa rigidez estrutural. O compósito com 1% de fibras apresenta o maior módulo entre os reforçados (813,41 $\pm$ 194,38 GPa), sugerindo que a adição moderada de fibras pode contribuir para a rigidez do material. Amostras com 1,5% e 2% apresentam valores significativamente mais baixos (507,32 $\pm$ 214,16 e 452,74 $\pm$ 401,82 GPa, respectivamente), com alta variação, possivelmente relacionada a uma má distribuição das fibras e aumento da porosidade (39)



Figura 53 – Comparação das resistências à flexão dos compósitos, obtidas nos ensaios de flexão 3-pontos.

(46).

O aumento do módulo no compósito com 1% de fibra pode indicar que, nesta fração, a rigidez da fibra contribuiu de forma mais eficaz. Porém, frações maiores parecem saturar a matriz, reduzindo a eficiência mecânica.

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(39),(47).

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

Tabela 18 – 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	17,64

A partir dos resultados do teste, mostrados na Tabela18, como Fcalc » Ftab, pode-se afirmar com 95% de confiança que há médias estatisticamente diferentes. Assim, 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 os compósitos ensaiados foram superiores ao d.m.s, mostrando que estas médias são estatisticamente diferentes. O mesmo ocorreu entre os compósitos com percentuais de 1% e 1,5%.

As micrografias das Figuras 54, 55 e 56 mostram diferentes ampliações da superfície de fratura do compósito com 1,5% de fração mássica de fibra de linho , testado sob flexão. Ao analisar os principais aspectos observa-se Presença de fibras curtas de linho expostas e parcialmente destacadas da matriz.



Figura 54 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (1,5%) em fração mássica de fibras ensaiado por flexão 50x.



Figura 55 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (1,5%) em fração mássica de fibras ensaiado por flexão 200x.

A propagação da trinca parece ter sido relativamente reta, sugerindo um comportamento frágil predominante da matriz. A distribuição não homogênea de fibras pode ser um fator contribuinte para o desempenho mecânico limitado em certas direções (39). Presença de buracos e espaços vazios na matriz, possivelmente causados por falhas de adesão fibramatriz ou por porosidade introduzida durante a fabricação. Os defeitos indicam falhas no processo de impregnação da matriz nas fibras durante a manufatura aditiva (44).

Indícios de arrancamento de fibras, com algumas regiões mostrando fibras fraturadas transversalmente. Superfície relativamente lisa em algumas áreas da matriz, indicando possível fratura frágil da resina. A interface fibra-matriz pode ter sofrido delaminação parcial, sugerindo uma adesão insuficiente ou falhas na transferência de carga (39).



Figura 56 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova (1,5%) em fração mássica de fibras ensaiado por flexão 1000x.

### 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.

As amostras fabricadas com resina pura e os 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 pura e compósitos estão representados na Figura 57 e Figura 58 respectivamente.



Figura 57 – Curva TG da resina fotossensível.

Segundo os resultados obtidos, a resina fotosenssível apresentou estabilidade até aproximadamente 182°C, apresentando uma perda de massa de 5%. Esses resultados estão alinhados com dados apresentados na literatura, onde as resinas fotosensíveis baseadas em 3-(acriloiloxi)-2-hidroxipropil metacrilato mostraram estabilidade até cerca de 180°C, alcançando até 240°C conforme os monômeros utilizados (48).

A partir de aproximadamente 308°C, a perda de massa do material aumenta significativamente, com a taxa máxima ocorrendo a 384°C e se estendendo até 470°C. Nesta faixa, a perda de massa atinge cerca de 72,1% da massa da amostra. Essa perda de massa pode ser associada ao processo de despolimerização, que é o principal mecanismo de decomposição em altas temperaturas para polímeros acrílicos (49).

Amostra	Perda de massa até 200°C (%)	T início de degradação (°C)	T máx da degradação (°C)	Perda de massa segundo estágio (%)	Perda de ) massa até 800 °C(%)
0%	5,79	308,17	384,00	72,10	95,42
0,5%	$12,\!64$	310,0	$356,\!60$	$67,\!86$	$98,\!48$
1%	10,74	$324,\!90$	$356,\!80$	$54,\!31$	$95,\!59$
1,5%	$5,\!94$	323,0	360,90	$60,\!35$	98,10
2%	8,52	$321,\!55$	$369,\!63$	$71,\!28$	$97,\!45$

Tabela 19 – Parâmetros termogravimétricos observados para a resina e os compósitos.



Figura 58 – Curvas TG/DTG para os compósitos resina/fibras de linho.

As informações demonstradas na Figura 58 podem ser melhor interpretados utilizando a Tabela 19. É possível verificar que os compósitos exibem maior degradação em relação à resina pura até 200°C e que o aumento da proporção de fibra de linho nos compósitos levou a um aumento na temperatura de início de degradação, indicando uma maior estabilidade térmica, e a uma redução na temperatura de máxima degradação da resina fotossensível. Esses fenômenos ocorrem nos intervalos de 310,0 a 324,9°C para a temperatura de início de degradação e de 356,6 a 369,6°C para a temperatura de máxima taxa de degradação.

De acordo com pesquisas mencionadas na literatura, a menor estabilidade térmica pode ser explicada pela desintegração inicial dos componentes das fibras naturais e pela perda inicial de peso, como a evaporação do teor de umidade até 200°C e a redução da temperatura máxima de degradação pode ocorrer porque aproximadamente 60% da decomposição térmica das fibras naturais se dá entre 230 e 350°C, onde se observa uma perda de peso significativa devido à decomposição das hemiceluloses (37).

É possivel observar também que os compósitos com 1,5% e 2% de fração mássica de fibra de linho apresentam maior estabilidade térmica que os demais compósitos e algum aumento na temperatura máxima de degradação. Considerando que o material rico em carbono formado pela degradação da rede da fibra pode atuar como barreira térmica, retardando a degradação, é possível que o aumento da fração de fibra tenha contribuído para o retardo da degradação (50).







Figura 60 – Curvas de DSC compósitos.

fonte: Autor

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 (Tan $\delta$ ). Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 20 e nas Figuras 61,62 e 63.

Amostra	E 35°C (MPa)	E'' (MPa)-(°C)	$T_g$ (°C)
0%	2041	214 - 45	80
0,5%	1481	189 - 36	76
1%	1201	201 - 37	72
1,5%	1472	201 - 37	72
2%	2083	176 - 58	88

Tabela 20 – Parâmetros obtidos pela análise dinâmico-mecânica (DMA)



Figura 61 – Curvas do módulo de armazenamento para as amostras de resina e compósitos de fibras de linho.

A variação do módulo de armazenamento, representado por E', em função da temperatura para os compósitos investigados, é ilustrada na Figura 61. O valor de E' está intimamente ligado à capacidade do material de suportar cargas mecânicas com deformação recuperável, sendo análogo ao módulo de flexão (26). Além disso, representa a capacidade do material de armazenar energia durante um ciclo de carga (10).

Conforme ilustrado na Figura 61, é notável o declínio no valor de E' com a adição de fibra de linho até aproximadamente 80°C. Nesse ponto, todos os compósitos experimentam um considerável amolecimento térmico, com exceção do compósito contendo uma fração mássica de 2%, cuja curva é próxima e ligeiramente mais elevada do que a curva da resina acrílica. Este fenômeno pode estar relacionado à diminuição da rigidez da matriz acrílica quando a fibra de linho é incorporada, resultando não apenas em uma rigidez inferior, mas também em uma baixa tensão interfacial com a matriz polimérica, o que resulta em um menor grau de transferência de esforços da matriz para a fibra através da interface (37) (38)(39).



Figura 62 – Curvas do módulo de perda para as amostras de resina e compósitos de fibras de linho.



Figura 63 – Curvas da Tan Delta para as amostras de resina e compósitos de fibras de linho.

### 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 porduzidas por MA. Através do ensaio de velocidade residual foi possível estimar a energia absorvida (Eabs) e a velocidade limite (VL) de cada amostra ensaiada.



Figura 64 – Curva de pontos experimentais do compósito epóxi com 1% em fração de fibras de linho.

#### fonte: Autor

A Figura 64 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 (Vi) e a velocidade mínima atingida após o impacto é a velocidade residual (Vr).

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%	$418,85\pm 2,48$	$328,96{\pm}12,84$	$271,91{\pm}25,28$	$208,95\pm2,45$
1%	$418,07\pm 2,94$	$332,55\pm 5,00$	$262,\!69{\pm}10,\!34$	$204,98{\pm}11,03$
1,5%	$416,95\pm 2,32$	$332,\!20{\pm}5,\!53$	$253,\!87{\pm}8,\!97$	$201,51\pm 5,05$
2%	$414,\!32\pm\!3,\!71$	$336,23{\pm}11,44$	$234,01{\pm}24,34$	$193,26{\pm}4,47$

#### Fonte: Autor

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 absorvida (Eabs). A Tabela 21 expõe os resultados de Vi, Vr, Eabs e também a estimativa da VL.



Figura 65 – 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

A figura 65 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, pela redução nos valores médios de energia absorvida conforme o aumento da fração mássica 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 (46). Há a possibilidade de que esse fato ocorreu pela influência do carregamento na viscosidade da resina causado pela fibra inserida, considerando que conforme se aumenta a fração mássica de fibra, a viscosidade da resina impacta na precisão dos objetos impressos. (45) (16).

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 se destacou como 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 mecânismos de fratura como arrancamento de fibra e delaminação.

Segundo a literatura, o material compósito pode se tornar mais resistente ao impacto quando o reforço da matriz é aumentado pela adição de mais fibras (51). Tal fato, não ocorre nos compósitos ensaiados, reforçando o entendimento de que houve ineficiência por parte do reforço. 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 e a D.M.S em função do percentual de fibras nos compósitos.

Considerando Fcal>Ftab, conseguimos verificar que há diferença entre as médias de energia absorvida e a fração mássica de fibra demonstra influência direta sobre a absorção de energia proveniente do projétil. Segundo as informações obtidas através do teste tukey há diferença significativa entre os compósitos 0,5, 1 e 2%, não havendo diferença significativa entre as médias do compósito 1,5% e os demais compósitos.

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

Foram realizas micrografias em amostras após o ensaio que são apresentadas nas Figuras 66, 67 e 68.



Figura 66 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova de compósito com 2% de fração mássica de fibra após ensaio de velocidade residual 100x.

Nas regiões da matriz polimérica, observa-se uma propagação característica de trincas em formato de concha, indicando falha predominantemente frágil. Esse comportamento pode ocorrer em materiais frágeis submetidos a altas taxas de deformação (52) (53) (17). É visível em algumas áreas o destacamento das fibras em relação à matriz. Isso indica uma fraca adesão interfacial, possivelmente exacerbada pelas altas tensões do impacto. As trincas principais parecem se originar em pontos onde há concentração de fibras ou defeitos na matriz, o que é considerável em compósitos com reforço descontinuado (54).



Figura 67 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova de compósito com 2% de fração mássica de fibra após ensaio de velocidade residual 200x.

Em regiões indicadas pelas setas, há presença de vazios e bolhas, provavelmente originados na etapa de fabricação. Esses vazios podem atuar como iniciadores de trincas durante o impacto. Apesar de as fibras estarem parcialmente destacadas, observa-se que algumas fibras permaneceram ancoradas na matriz. O que pode sugerir que, embora a adesão seja um desafio, elas contribuíram para a absorção de energia do impacto. Tratamentos superficiais das fibras podem melhorar a interação química com a matriz. Melhor controle na etapa de cura da manufatura aditiva para minimizar vazios (39).



Figura 68 – Micrografia da superfície da fratura do corpo de prova de compósito com 1% de fração mássica de fibra após ensaio de velocidade residual 1000x.

## 5 CONCLUSÃO

Os compósitos foram desenvolvidos utilizando frações mássicas de fibras de 0,5%, 1%, 1,5% e 2%, sendo observada uma influência direta do carregamento de fibras na viscosidade da resina. O aumento na fração de fibras resultou em um incremento significativo da viscosidade, o que limitou a fração mássica máxima a 2%. Apesar desse desafio, foi possível produzir todos os corpos de prova necessários para as análises propostas, garantindo a realização das caracterizações e a avaliação do impacto da fração mássica de fibras nas propriedades dos compósitos.

Os ensaios de tração mostram que a resina pura apresentou a maior resistência (33,02MPa), enquanto a adição de fibras reduziu essa propriedade, especialmente em frações de 1,5% e 2%, devido a má dispersão e falhas na interface fibra-matriz. O módulo de elasticidade teve variação limitada (1,12GPa a 1,20GPa), sem aumento significativo de rigidez com a adição de fibras. O método de manufatura aditiva gerou microdefeitos, como bolhas e descontinuidades, comprometendo o desempenho mecânico. A análise estatística indicou que não há diferenças significativas entre as médias com 95% de confiança, sugerindo que a variabilidade mascarou possíveis efeitos das fibras. As micrografias revelaram padrões de fratura frágil e falhas de adesão, com fibras parcialmente embutidas e áreas com descolamento. Esses resultados reforçam a necessidade de otimizar a interface fibra-matriz, por meio de tratamentos de superfície e ajustes no processo de fabricação, para melhorar a consistência e o desempenho dos compósitos.

Os ensaios de impacto realizados nos compósitos reforçados com fibras de linho e na resina fotossensível pura evidenciam que a adição de fibras não contribuiu para melhorar a resistência ao impacto do material. A resina pura apresentou a maior energia média absorvida  $(3,21 \text{kJ}/m^2)$ , enquanto os compósitos variaram de  $1,66 \text{kJ}/m^2$  a  $2,20 \text{kJ}/m^2$ , com uma redução significativa de desempenho em todas as frações mássicas analisadas. A análise de variância demonstrou diferenças estatisticamente significativas entre a resina pura e os compósitos, confirmando a perda de desempenho nos materiais reforçados com fibras.

As micrografias revelaram padrões de fratura mistos, com áreas lisas (indicativas de fratura frágil) e rugosas (sugerindo deformação plástica localizada). A presença de vazios, bolhas e porosidades reflete a formação de microdefeitos durante o processamento, que atuam como iniciadores de fratura. Observou-se fibras parcialmente embutidas na matriz, algumas com matriz residual aderida e outras completamente expostas, sugerindo adesão inconsistente e falhas de interação fibra-matriz.

Com base nos resultados analisados nos ensaios de flexão é possível concluir que a

resina pura apresentou uma maior resistência à flexão (65,09±16,60MPa) e um módulo elevado (739,55±220,37MPa), sugerindo que, sem a presença de fibras, a matriz polimérica oferece maior homogeneidade estrutural e maior resistência à propagação de defeitos sob carga de flexão. A adição de fibras reforçadas, de maneira geral, em uma redução na resistência à flexão, especialmente em frações maiores (1,5% e 2%). Isso pode ser atribuído a fatores como possíveis falhas na interface, como descolamento ou má adesão, limitando a transferência de tensão da matriz para as fibras. O processo de fabricação aditiva pode ter gerado danos como bolhas, zonas não fotopolimerizadas ou maior dispersão de fibras, como observados nas micrografias obtidas por MEV. O composto com 1% de fibras apresentou uma leve melhoria no módulo de flexão (813,41±194,38GPa).

O comportamento apresentado sugere que a adição de fibras, especialmente em frações maiores, não foi capaz de melhorar as propriedades de flexão do material devido a problemas de adesão e homogeneidade. Seria necessário melhorar a interface fibra-matriz, possivelmente utilizando tratamentos superficiais nas fibras, como tratamentos químicos, para aumentar a compatibilidade. Ajustes no método de fabricação aditiva poderiam reduzir a presença de microdefeitos e melhorar a dispersão e orientação das fibras.

Foi conduzida uma análise termogravimétrica (TGA) tanto da resina acrílica fotossensível quanto dos compósitos reforçados com fibra de linho em frações mássicas de 0,5%, 1%, 1,5% e 2%. O experimento revelou que a perda de umidade nos compósitos representou de 5,94% a 12,64% da massa total perdida, enquanto na resina isolada essa perda correspondeu a 5,79%. A temperatura de início da degradação principal diminuiu nos compósitos em 8°C a 42°C, indicando uma redução na estabilidade térmica com a incorporação das fibras na matriz acrílica.

No final da degradação principal, a perda de massa permaneceu similar nos compósitos, variando entre 95% e 98%, enquanto na resina foi de 95%. Ademais, nos compósitos, a degradação se completou aproximadamente 9°C mais cedo nos compósitos de 1% e 1,5%, e 20°C mais tarde nos compósitos de 0,5% e 2%. Os picos de ombro observados são atribuídos à degradação dos elementos estruturais da fibra, como a hemicelulose, até cerca de 200°C, a celulose, até cerca de 400°C, e a lignina, um pouco acima de 500°C. Uma temperatura máxima de início de degradação de 160°C pode ser considerada como um limite prático para o uso da fibra de linho como reforço na matriz acrílica fotossensível.

As amostras de resina fotopolimerizável pura e com 0%, 0,5%, 1%, 1,5% e 2% de fibra de linho foram fabricadas e submetidas a análise termomecânica, onde, observou-se um aumento no módulo de armazenamento inicial (E') entre as amostras de 0% e 2%, atingindo valores de 2041 MPa e 2083 MPa, respectivamente. O módulo de perda (E") foi de 214 MPa a 45° e 176 MPa a 58°, e a temperatura de transição vítrea (Tg) foi de 80°C e 88°C, respectivamente. Em comparação com outros compósitos, foi observada uma redução de até 59% no módulo de armazenamento; Houve uma redução significativa no pico do módulo de perda (E") de 18% entre a resina acrílica fotopolimerizável pura e o compósito com 2%; Os compósitos apresentaram picos mais acentuados no gráfico de tan  $\delta$  em comparação com a resina pura. Além disso, o compósito com uma fração mássica de 2% demonstrou um aumento de 8°C na temperatura de transição vítrea (Tg) em relação à resina pura. Os demais compósitos mantiveram-se dentro da faixa de temperatura de transição vítrea entre 72°C e 76°C.

Os resultados dos ensaios balísticos demonstraram que a energia absorvida pelos compósitos diminuiu com o aumento da fração mássica de fibras, indicando que o reforço proporcionado pelas fibras foi ineficiente para melhorar a resistência ao impacto. O compósito com 0,5% de fibras apresentou a maior média de energia absorvida, possivelmente devido à matriz frágil e à geração de superfícies de fratura após o impacto. A influência do aumento da viscosidade da resina, causada pela adição de fibras, pode ter prejudicado a precisão do processo de impressão e contribuído para a presença de defeitos como vazios e bolhas, que atuam como iniciadores de trincas.

As amostras mostraram comportamento predominantemente frágil, com fragmentação após o impacto. A análise da interface fibra-matriz revelou falhas de adesão e destacamento das fibras, que contribuíram para o desempenho limitado dos compósitos. A propagação de trincas em formato de concha nas regiões da matriz reforça o comportamento típico de materiais frágeis submetidos a altas taxas de deformação. A análise de variância (ANOVA) confirmou diferenças significativas na energia absorvida entre os compósitos, com o percentual de fibras influenciando diretamente a absorção de energia.

Uma possível abordagem para melhorar o desempenho dos compósitos seria a adoção de tratamentos superficiais nas fibras, com o objetivo de otimizar a interação química com a matriz, aliada a um controle mais rigoroso no processo de fabricação para minimizar a formação de vazios e bolhas. Essas medidas poderiam aumentar a eficiência do reforço e potencialmente melhorar a resistência ao impacto, aproximando os resultados das expectativas de desempenho para materiais compósitos reforçados.

# REFERÊNCIAS

1 BHATIA, A.; SEHGAL, A. K. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 81, p. 1060–1067, 2023.

2 CHAUDHARY, R.; FABBRI, P.; LEONI, E.; MAZZANTI, F.; AKBARI, R.; ANTO-NINI, C. Additive manufacturing by digital light processing: a review. *Progress in Additive Manufacturing*, Springer, v. 8, n. 2, p. 331–351, 2023.

3 RAMÍREZ, I. S.; MÁRQUEZ, F. P. G.; PAPAELIAS, M. Review on additive manufacturing and non-destructive testing. *Journal of Manufacturing Systems*, Elsevier, v. 66, p. 260–286, 2023.

4 ADAPA, S. K.; JAGADISH. Prospects of natural fiber-reinforced polymer composites for additive manufacturing applications: a review. *Jom*, Springer, v. 75, n. 3, p. 920–940, 2023.

5 VOLPATO, N. Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.

6 WONG, J.; ALTASSAN, A.; ROSEN, D. W. Additive manufacturing of fiber-reinforced polymer composites: A technical review and status of design methodologies. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 255, p. 110603, 2023.

7 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: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320388337">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320388337</a>>.

8 AMINI, A.; GUIJT, R. M.; THEMELIS, T.; VOS, J. D.; EELTINK, S. Recent developments in digital light processing 3d-printing techniques for microfluidic analytical devices. *Journal of Chromatography A*, Elsevier, v. 1692, p. 463842, 2023.

9 JAFFERSON, J.; CHATTERJEE, D. A review on polymeric materials in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 46, p. 1349–1365, 2021.

10 VENKATEGOWDA, T.; MANJUNATHA, L.; ANILKUMAR, P. Dynamic mechanical behavior of natural fibers reinforced polymer matrix composites–a review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 54, p. 395–401, 2022.

11 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*, Elsevier, 2024.

12 NETO, J.; QUEIROZ, H.; AGUIAR, R.; LIMA, R.; CAVALCANTI, D.; BANEA, M. D. A review of recent advances in hybrid natural fiber reinforced polymer composites. *Journal of Renewable Materials*, Tech Science Press, v. 10, n. 3, p. 561, 2022.

13 JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, Elsevier, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.

14 SOUTO, A. P. Linho. Ideal Artes Gráficas, 2009.

15 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.

16 KAR, S.; PATTNAIK, S.; SUTAR, M. K. Ballistic performance of green woven fabrics-a short review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 62, p. 5965–5970, 2022.

17 PAI, A.; RODRIGUEZ-MILLAN, M.; BEPPU, M.; VALVERDE-MARCOS, B.; SHE-NOY, S. Experimental techniques for performance evaluation of shielding materials and configurations subjected to blast and ballistic impacts: A state-of-the-art review. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, v. 191, p. 111067, 2023.

18 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.

19 LIRA, V. M. Processos de fabricação por impressão 3D: Tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.

20 [S.l.: s.n.].

21 NUNES, E. d. C. D.; LOPES, F. R. S. Polímeros: conceitos, estrutura molecular, classificação e propriedades. *São Paulo, SP: Érica*, 2014.

22 JR, S. V. C. Ciência dos polímeros. Artiliber editora, São Paulo, v. 24, 2002.

23 HUANG, J.; KOGBARA, R. B.; HARIHARAN, N.; MASAD, E. A.; LITTLE, D. N. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 305, p. 124685, 2021.

24 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.

25 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.

26 HARIS, N. I. N.; HASSAN, M. Z.; ILYAS, R.; SUHOT, M. A.; SAPUAN, S.; DOLAH, R.; MOHAMMAD, R.; ASYRAF, M. Dynamic mechanical properties of natural fiber reinforced hybrid polymer composites: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 19, p. 167–182, 2022.

27 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*, Elsevier, 2024.

28 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.
29 KABIR, M.; WANG, H.; LAU, K.; CARDONA, F. Chemical treatments on plantbased 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: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812002922">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812002922</a>>.

30 ELFALEH, I.; ABBASSI, F.; HABIBI, M.; AHMAD, F.; GUEDRI, M.; NASRI, M.; GARNIER, C. A comprehensive review of natural fibers and their composites: An ecofriendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, v. 19, p. 101271, 2023. ISSN 2590-1230. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023003985">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023003985</a>>.

31 PEZZOLO, D. B. *Tecidos: história, tramas, tipos e usos.* [S.l.]: Editora Senac São Paulo, 2021.

32 GAZETA, R. *Produção de linho movimenta economia de cidades no norte da Rússia desde o Império.* 2019. 20 de junho de 2023. Disponível em: <a href="https://br.rbth.com/economia/82059-producao-linho-economia-norte-russia">https://br.rbth.com/economia/82059-producao-linho-economia-norte-russia</a>>.

33 GAZETA, R. Produção de linho movimenta economia de cidades no norte da Rússia desde o Império. 2019. 20 de junho de 2023. Disponível em: <a href="https://br.rbth.com/">https://br.rbth.com/</a> economia/82059-producao-linho-economia-norte-russia>.

34 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: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X19300670">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X19300670</a>>.

35 FAZER, S. *DA MACERAÇÃO DO LINHO (PT1)*. 2023. 22 de junho de 2023. Disponível em: <a href="https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho>">https://www.saberfazer.org/research/2017/7/6/macerar-o-linho</aberfazer.org/research/2017/7/%</aberfazerazera/">https://wwww

36 JUNIOR, W. D. C.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. *Rio de Janeiro: LTC*, v. 589, p. 249, 2002.

37 MOHAMMED, M.; JAWAD, A. J. M.; MOHAMMED, A. M.; OLEIWI, J. K.; ADAM, T.; OSMAN, A. F.; DAHHAM, O. S.; BETAR, B. O.; GOPINATH, S. C.; JAAFAR, M. Challenges and advancement in water absorption of natural fiber-reinforced polymer composites. *Polymer Testing*, Elsevier, p. 108083, 2023.

38 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: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353805003076">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353805003076</a>>.

39 WU, Y.; LI, C.; CHEN, T.; QIU, R.; LIU, W. Photo-curing 3d printing of microscale bamboo fibers reinforced palm oil-based thermosets composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 152, p. 106676, 2022.

40 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATEIALS: ASTM INTERNATIONAL. ASTM D256-10: Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. West Conshohocken, 2018. 42 HASAN, A.; RABBI, M.; BILLAH, M. M. Making the lignocellulosic fibers chemically compatible for composite: A comprehensive review. *Cleaner Materials*, Elsevier, v. 4, p. 100078, 2022.

43 MAJHI, S.; PRADHAN, S.; PRAKASH, V.; ACHARYA, S. K. Influence of fiber surface modification on impact strength behaviour of agave lechuguilla fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, 2023.

44 DIZON, J. R. C.; JR, A. H. E.; CHEN, Q.; ADVINCULA, R. C. Mechanical characterization of 3d-printed polymers. *Additive manufacturing*, Elsevier, v. 20, p. 44–67, 2018.

45 TURJO, S. K. S.; HOSSAIN, M. F.; RANA, M. S.; FERDOUS, M. S. Mechanical characterization and corrosive impacts of natural fiber reinforced composites: an experimental and numerical approach. *Polymer Testing*, Elsevier, v. 125, p. 108108, 2023.

46 SAFAEE, S.; CHEN, R. K. Development of a design and characterization framework for fabrication of functionally graded materials using magnetic field-assisted digital light processing stereolithography. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 67, p. 314– 324, 2021.

47 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.

48 LIZ-BASTEIRO, P.; SANZ-HORTA, R.; REVIRIEGO, F.; MARTÍNEZ-CAMPOS, E.; REINECKE, H.; ELVIRA, C.; GALLARDO, A. High resolution molds, sacrificial in aqueous media, obtained by vat photopolymerization 3d printing. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 75, p. 103758, 2023.

49 REHBEIN, T.; JOHLITZ, M.; LION, A.; SEKMEN, K.; CONSTANTINESCU, A. Temperature-and degree of cure-dependent viscoelastic properties of photopolymer resins used in digital light processing. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 6, n. 4, p. 743–756, 2021.

50 BHAGAT, A. B.; GHOSH, A. K. Estimation of rheological percolation threshold and influence of fibre length on properties of polypropylene/sisal fibre composites having near critical fibre length. *Polymer*, v. 258, p. 125304, 2022. ISSN 0032-3861. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386122007911">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386122007911</a>.

51 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: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542300323X">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542300323X</a>>.

52 SÆLEN, R. L.; HOPPERSTAD, O. S.; CLAUSEN, A. H. Mechanical behaviour and constitutive modelling of an additively manufactured stereolithography polymer. *Mechanics of Materials*, Elsevier, v. 185, p. 104777, 2023.

53 LV, D.; SHI, P.; CHEN, M.; LIU, D.; CHEN, G.; ZHU, Y.; ALI, I. Effects of fiber orientations on fracture mechanisms in rotary ultrasonic drilling of carbon fiber reinforced plastic laminates. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 105, p. 199–212, 2023.

54 ZHANG, X.; HU, J.; QIAN, R.; WANG, Y.; YU, S.; HUANG, Y.; CHEN, Z.; CHEN, D.; ZHANG, S.; ESHUN, F. T. et al. Experimental and numerical research on opening size effect of novel short fiber reinforced composite laminates. *Results in Physics*, Elsevier, v. 46, p. 106303, 2023.