

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Andrea Del Pilar Fabra Rivera

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS
PARA USO EM PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA**

Belo Horizonte

2024

Andrea Del Pilar Fabra Rivera

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS
PARA USO EM PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA**

Versão final de tese de doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio

Coorientador: Prof. Dr. Frederico De Castro Magalhães.

Belo Horizonte

2024

R621c	<p>Rivera, Andrea Del Pilar Fabra. Caracterização experimental de compósitos termoplásticos para uso em processos de manufatura aditiva [recurso eletrônico] / Andrea Del Pilar Fabra Rivera. – 2024. 1 recurso online (146 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Juan Carlos Campos Rubio. Coorientador: Frederico de Castro Magalhães.</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 134-146.</p> <p>Bibliografia: f. 119-133.</p> <p>1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Compósitos poliméricos – Propriedades mecânicas – Teses. 3. Termoplásticos – Teses. 4. Manufatura aditiva – Teses. 5. Resistência de materiais – Teses. I. Campos Rubio, Juan Carlos. II. Magalhães, Frederico de Castro. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

“*CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS TERMOPLÁSTICOS EM PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA*”

ANDREA DEL PILAR FABRA RIVERA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos **professores: Dr. Juan Carlos Campos Rubio (orientador – Departamento de Engenharia Mecânica UFMG), Dr. Frederico de Castro Magalhães (coorientador – Departamento de Engenharia Mecânica UFMG), Dra. Adriana Silva Franca (Departamento de Engenharia Mecânica UFMG), Dr. Wanderson de Oliveira Leite (Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG), Dr. Paulo Eustáquio de Faria (Departamento de Engenharia de Produção da UFMG), Dr. Juan Carlos Horta Gutierrez (Departamento de Engenharia Mecânica UFMG), Dr. Luciano Machado Gomes Vieira (Universidade Federal de São João del-Rei) e o pesquisador Dr. Júlio Cesar dos Santos (Universidade Federal de São João del-Rei)**, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica, na área de concentração de "Engenharia de Manufatura e Materiais".

Tese aprovada no dia 18 de julho de 2024.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Juan Carlos Campos Rubio, Professor do Magistério Superior**, em 23/07/2024, às 22:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico de Castro Magalhaes, Professor do Magistério Superior**, em 24/07/2024, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Silva Franca, Professora do Magistério Superior**, em 25/07/2024, às 10:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Júlio Cesar dos Santos, Usuário Externo**, em 25/07/2024, às 10:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juan Carlos Horta Gutierrez, Professor do Magistério Superior**, em 25/07/2024, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Eustaquio de Faria, Professor do Magistério Superior**, em 25/07/2024, às 21:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wanderson de Oliveira Leite, Usuário Externo**, em 26/07/2024, às 07:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Machado Gomes Vieira, Usuário Externo**, em 30/07/2024, às 13:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3359996** e o código CRC **6CA103A3**.

Dedicado à minha família, Luís José, Carlina e
minha avó Clementina (in memoriam) por todos
os seus ensinamentos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar a paciência e a força necessárias para completar esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, pelo apoio e amor incondicional que sempre me deram, pelas palavras que me motivam a ser uma pessoa melhor e por ser meu grande exemplo a seguir.

Ao meu irmão, que sempre me dá o melhor dele para me ajudar a cumprir todos os meus objetivos e sonhos.

Ao professor Juan Carlos Campos Rubio, pela confiança depositada em mim para realizar este trabalho e por todas as orientações dadas ao longo do doutorado, tanto pessoal quanto acadêmicas.

Aos Professores Frederico Castro e Paulo Eustaquio Faria, pelo conhecimento e orientação compartilhados ao longo deste trabalho. Igualmente, pelo fornecimento de ferramentas técnicas, equipamentos e máquinas.

A Karen Ariza pelo apoio emocional e companhia que me proporcionou ao longo do doutorado.

Aos meus colegas do laboratório LEPAM e GITEM, que me deram apoio nos aspectos motivacionais e técnicos para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos pelo apoio e por me acompanharem nesse caminho.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo outorgada para o desenvolvimento das pesquisas realizadas neste projeto de doutorado.

Agradecimentos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento.

Resumo

Neste trabalho, estudou-se a influência do reforço e da orientação de impressão no comportamento mecânico dos corpos de prova manufaturados com filamentos de PLA/20% em peso de Al (micropartículas de alumínio), PLA/20% em peso de FC (Fibra curta de carbono) e PLA/ 20% em peso de FV (Fibra curtas de vidro). Os corpos de prova foram manufaturados usando-se a tecnologia de modelagem de deposição fundida (FDM). Foram realizados ensaios para analisar o comportamento mecânico dos materiais estudados, em tração, compressão e flexão em quatro pontos. Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos dos corpos de prova manufaturados com materiais compósitos foram comparados com os resultados do comportamento mecânico do PLA puro, revelando que a influência do tipo de reforço, nomeadamente fibras curtas ou micropartículas, é significativa. A maior resistência à tração foi observada para o PLA puro, com uma orientação de impressão de $45^{\circ}/-45^{\circ}$ (50,83 MPa), e o maior módulo de elasticidade para o PLA-Al, com uma orientação de impressão de $0^{\circ}/90^{\circ}$ (3,25 GPa). O PLA puro $0^{\circ}/90^{\circ}$ apresentou a maior resistência à compressão (65,55 MPa) e o maior módulo de elasticidade (1,53 GPa). O maior valor de resistência à flexão pode ser observado para os corpos de prova de PLA-FV com orientação de impressão $0^{\circ}/90^{\circ}$ (17,79 MPa). Houve evidência de um aumento na resistência à flexão para os corpos de prova de PLA-FV $0^{\circ}/90^{\circ}$ de 24,23% e 18,52%, em comparação com para os corpos de prova de PLA puro $0^{\circ}/90^{\circ}$ e PLA-FC $0^{\circ}/90^{\circ}$, respectivamente. Além disso, os tipos de fratura e o comportamento das partículas de alumínio, das fibras de carbono e das fibras de vidro, na matriz de PLA, foram avaliados por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura. A deformação dos corpos de prova manufaturados de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-Al foram analisada mediante a aplicação da técnica de correlação digital de imagem (CDI), e os resultados adquiridos por meio da técnica CDI foram comparados com valores obtidos dos ensaios de flexão em quatro pontos.

Palavras chave: Manufatura aditiva, FDM, fibras curtas, PLA, compósitos poliméricos reforçados com fibras, CDI.

Abstract

In this work, was studied the influence of reinforcement and printing orientation on the mechanical behavior of specimens manufactured with filaments of PLA/20 wt% Al (aluminum microparticles), PLA/20 wt% FC (short carbon fiber) and PLA/20 wt% FV (short glass fiber). The specimens were manufactured using fused deposition modeling (FDM) technology. Tests were carried out to analyze the mechanical behavior of the materials studied, in tensile, compression and flexion at four points. The results obtained in the mechanical tests of the specimens manufactured with composite materials were compared with the results of the mechanical behavior of pure PLA, revealing that the influence of the type of reinforcement, namely short fibers or spherical microparticles, is evident. The highest tensile strength was shown for pure PLA, with a print orientation of $45^\circ/-45^\circ$ (50.83 MPa), and the highest Young's modulus for PLA-Al, with a print orientation of $0^\circ/90^\circ$ (3.25 GPa). Pure $0^\circ/90^\circ$ PLA had the highest compressive strength (65.55 MPa) and the highest Young's modulus (1.53 GPa). The highest flexural strength value can be observed for PLA-FV specimens with $0^\circ/90^\circ$ (17.79 MPa) print orientation. There was evidence of an increase in flexural strength for $0^\circ/90^\circ$ PLA-FV samples of 24.23% and 18.52%, compared to $0^\circ/90^\circ$ pure PLA and $0^\circ/90^\circ$ PLA-FC samples, respectively. Furthermore, the fracture types and behavior of aluminum particles, carbon fibers, and glass fibers in the PLA matrix were evaluated by scanning electron microscopy analysis. The deformation of the specimens manufactured from pure PLA, PLA-FV, PLA-FC, and PLA-Al was analyzed using the digital image correlation (DIC) technique. The results obtained by DIC were compared with values obtained from four-point bending tests."

Keywords: Additive manufacturing, FDM, PLA, Polymer composites, DIC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Fabricação de peça usando a tecnologia de modelagem por deposição fundida...	25
Figura 2.2- Exemplo de estruturas metálicas impressas em 3D a. ferramenta de corte, b. quadro de bicicleta, c. recuperador, d. componentes biomédicos	27
Figura 2.3- Exemplo de estruturas impressas em 3D com materiais cerâmicos. a. restauração dentária, b. Impulsor, c. matriz de micropilares, d. implante ósseo e e. estruturas macrocelulares com comprimentos de ligamentos variáveis	29
Figura 2.4- Esquema de fabricação do filamento compósito FCC/PC e uso em FDM.....	33
Figura 2.5- Técnica de fabricação de filamentos de material compósitos de matriz de PLA e reforço de grafite: a. fundição com solvente e b. mistura modificada	35
Figura 2.6- Curvas de tensão-deformação. a. Resistência à compressão e b. Resistência à tração	37
Figura 2.7- Imagem macroscópica.....	41
Figura 2.8- a. Curva tensão-deformação em relação à orientação de impressão (espessura da camada-200 μm , largura do raster 500 μm) b. Curva tensão-deformação em relação à espessura da camada. (Orientação de impressão - 0° , largura do raster - 500 μm) e c. Curva tensão-deformação em relação à largura do raster. (Orientação de impressão - 0° , espessura da camada - 300 μm).....	45
Figura 2.9- Variação das propriedades mecânicas com à orientação de impressão a) resistência à tração, b) módulo de elasticidade, c) resistência à flexão, d) módulo de flexão e e) tenacidade à fratura Modo I	46
Figura 2.10- a. Microestrutura dos materiais PLA e do PLA-Al. a. Altura da camada 0,3 mm (PLA natural) b. Altura da camada 0,4 mm (PLA natural) c. Altura da camada 0,3 mm (PLA - Al) d. Altura da camada 0,2 mm (PLA - Al)	49
Figura 2.11- Curva de tensão - deformação em relação ao porcentagem de preenchimento – Ensaio de flexão	51
Figura 2.12- Imagens MEV. a. PA6 - FC b. PA6-FV e c. PA6- FA	56
Figura 2.13- Microestrutura largura-espessura representativa dos corpos de prova manufaturados com baixo teor de umidade, temperatura de impressão de 270°C , velocidade de impressão de 20 mms e altura de camada de 2 mm. (a) microestrutura largura-espessura geral, microestrutura regional tem (b) menor fração de volume de vazios e (c) maior fração de volume de vazios	58
Figura 2.14- Microtopografia das superfícies de fratura dos corpos de prova manufaturados com orientação de impressão de 0° , temperaturas do bocal de (a) 270°C , (b) 280°C , (c) 290°C e (d) 300°C (Temperatura de plataforma de 225°C).....	59
Figura 2.15- a. Curva de tensão versus deslocamento do ensaio de compressão e b. Imagens capturadas durante diferentes intervalos de tempo no ensaio de compressão.....	60

Figura 2.16- a. flexão simétrica em quatro pontos para determinação da tenacidade à fratura modo I e b. flexão assimétrica em quatro pontos para determinação da tenacidade à fratura modo II.....	61
Figura 2.17- a. Flexão simétrica em quatro pontos, b. Flexão assimétrica em quatro pontos, c. Tenacidade à fratura KCI e d. Tenacidade à fratura KCII	62
Figura 2.18- Curva carga-deslocamento para ensaio de fratura por deformação plana e b. Comparação dos valores médios de tenacidade à fratura e energia de fratura.....	63
Figura 2.19- Modos de fratura: Modo I (A), Modo II (B) e Modo III (C).....	64
Figura 2.20- Modos de falha de compósitos unidirecionais sob carga de tração longitudinal. (a). Fratura frágil, (b). Fratura frágil com desprendimento de fibras (pullout) e (C). cisalhamento da matriz.....	65
Figura 2.21- Compósito sob carga de compressão longitudinal.....	66
Figura 2.22-Deslocamento dos blocos após a carga aplicada. a. Imagem de referência b. Imagem deformada	68
Figura 2.23- Deformação principal dos corpos de prova manufacturados de PE6-FC durante o ensaio de tração. (a)-(f). iniciação e propagação de trinca dos corpos de prova com concentração de fibra de carbono de 2,14% em peso, (g)-(h) corpo de prova com concentração de fibra de carbono de 8,3% em peso com fratura mais frágil e propagação de trinca mais rápida	71
Figura 2.24- Contornos de tensão térmica induzidos por expansão e contração térmica gerados pela técnica CID	72
Figura 2.25- a.Estrutura honeycomb auxética como núcleo para estruturas-sanduíche b. Resultados da distribuição da deformação adquiridos pela técnica CID e c. Comparação dos deslocamentos medidos pela máquina de testes e pela técnica CID.	73
Figura 3.1- Etapas usadas para a caracterização e fabricação dos materiais.....	74
Figura 3.2- Microestrutura. a. Partículas de alumínio na matriz de PLA b. Fibras curtas de carbono na matriz de PLA e c. Fibra curtas de vidro na matriz de PLA.....	75
Figura 3.3- Dimensões em mm dos corpos de prova para ensaios mecânicos. a. Tração b. compressão e c. flexão em quatro pontos.	76
Figura 3.4- Impressora 3D Graber I3 - Tec 3D.	77
Figura 3.5- a. Esquema de impressão dos corpos de prova b. Corpo de prova de compressão b. corpo de prova de tração e d. corpo de prova de flexão em quatro pontos.	78
Figura 3.6- Representação gráfica do planeamento do estudo.	79
Figura 3.7- Posicionamento do corpo de prova no ensaio de tração.	80
Figura 3.8- Posicionamento do corpo de prova no ensaio de compressão.....	81
Figura 3.9- Posicionamento do corpo de prova no ensaio de flexão em quatro pontos.....	82

Figura 3.10- Distribuição das linhas de força concentradas no corpo.....	84
Figura 3.11- a. Preparo do corpo de prova b. Pontos localizados na região de interesse.	87
Figura 3.12- Montagem do teste para captação de imagens 2D - CID.....	87
Figura 4.1- Gráfico de análises de Termogravimetria (TGA).	88
Figura 4.2- Espectro de absorção no infravermelho dos corpos de prova de PLA-FV, PLA-AI e PLA-FV.....	89
Figura 4.3- Módulo de elasticidade para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45° - ensaio de tração.	91
Figura 4.4- Resistência à tração para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de tração.	91
Figura 4.5- Força máxima para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de tração.....	92
Figura 4.6- Curvas de tensão-deformação obtidas no ensaio de tração para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com uma orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°.....	93
Figura 4.7- Reorientação das fibras curtas de carbono na matriz PLA após o ensaio de tração.	93
Figura 4.8- a. Fibras curtas de carbono na matriz de PLA e b. Fibra de vidro na matriz de PLA.	94
Figura 4.9- Partículas de Al na matriz PLA após o ensaio de tração. a. heterogeneidade das partículas de alumínio na matriz polimérica, b. o mapa da distribuição das partículas de alumínio na matriz de PLA e c. Partículas de alumínio.	95
Figura 4.10- Microestrutura da fratura dos corpos de prova manufaturados de PLA-FC e PLA-FV no ensaio de tração.....	97
Figura 4.11- Módulo de elasticidade para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-AI e PLA-FC com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de compressão.....	98
Figura 4.12- Resistência à compressão para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-AI e PLA-FC com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de compressão.....	99
Figura 4.13- Curvas de tensão-deformação obtidas no ensaio de compressão para corpos de prova manufaturados de PLA-PLA-AI e PLA-FC com orientação de impressão 0°/90° e 45°/-45°.	100
Figura 4.14- Formação de vazios entre as camadas que compõem a estrutura. a. PLA-AI e b. PLA-FC.	101

Figura 4.15- Modulo de flexão para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de flexão em quatro pontos.	103
Figura 4.16- Resistencia à flexão para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de flexão em quatro pontos.	103
Figura 4.17- Força máxima media corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de flexão em quatro pontos.	103
Figura 4.18- Curvas tensão-deformação de flexão em quatro pontos para os corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-FC e PLA-FV com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°.	106
Figura 4.19- Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos para os corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°. <i>KIC</i>	107
Figura 4.20- a. PLA puro 0°/90° b. PLA puro 45°/-45°	109
Figura 4.21- a. PLA-FC-0°/90° b. PLA-FC-45°/-45° C. Fibras de carbono.	109
Figura 4.22- a. PLA-FV-0°/90° b. PLA-FV-45°/-45° C. Fibras de vidro.	110
Figura 4.23- CDI do corpo de prova manufaturado de PLA puro com orientação de impressão de 0°/90°	111
Figura 4.24- CDI do corpo de prova manufaturado de PLA puro com orientação de impressão de 45°/-45°.	111
Figura 4.25- CDI do corpo de prova manufaturado de PLA-FC com orientação de impressão de 0°/90°	112
Figura 4.26- CDI do corpo de prova manufaturado de PLA-FC com orientação de impressão de 45°/-45°.	112
Figura 4.27- CDI do corpo de prova manufaturado de PLA-FV com orientação de impressão de 0°/90°	113
Figura 4.28- CDI do corpo de prova manufaturado de PLA-FV com orientação de impressão de 45°/-45°.	113
Figura 4.29- Tendência da fratura mostrado na imagem de correlação digital nos corpos de prova manufaturados pela técnica FDM.	114
Figura 4.30- CDI do corpo de prova manufaturado de PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90°	114
Figura 4.31- CDI do corpo de prova manufaturado de PLA-AI com orientação de impressão de 45°/-45°.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Comparação das propriedades mecânicas dos polímeros termoplásticos	31
Tabela 2.2- Resultados do módulo de elasticidade médio (MPa), da resistência máxima (MPa), o coeficiente de Poisson e a tenacidade à fratura ($MPa \sqrt{m}$) para todos os materiais usados neste estudo	40
Tabela 2.3- Resistência à tração média e rugosidade dos corpos de prova de PLA natural e composto PLA-Al	50
Tabela 3.1- Dados técnicos da impressora 3D Graber I3-Tec 3D.....	77
Tabela 3.2- Parâmetros de impressão 3D para a fabricação dos corpos de prova.	78
Tabela 4.1- Resultados da análise ANOVA – ensaio de tração	90
Tabela 4.2- Resultado das propriedades de tração.....	96
Tabela 4.3- Resultados da análise ANOVA – ensaio de compressão	98
Tabela 4.4- Resultado das propriedades de compressão	101
Tabela 4.5- Resultados da análise ANOVA – ensaio de flexão em quatro pontos.	102
Tabela 4.6- Resultado das propriedades de flexão em quatro pontos.	104
Tabela 4.7- Resultados da análise ANOVA – ensaio de flexão em quatro pontos - (KIC)... ..	106
Tabela 4.8- Valores de KIC - ensaio de flexão em quatro pontos.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
FDM	Fused Deposition Modeling
FC	Fibra de carbono
PLA	Ácido polilático
ABS	Acrilonitrila Butadieno estireno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PTU	Poliuretano Termoplástico
PE6	Poliamidas
DCM	Diclorometano
HIPS	Poliestireno de alto impacto
PETG	Polietileno
PVA	Poli ácido vinílico
PC	Policarbonato
ABS/PC	ABS com policarbonato
TPE	Termoplástico elastômero
MA	Manufatura Aditiva
TGA	Termogravimetria
DSC	Calorimetria de varredura diferencial
CDI	Correlação digital de imagem
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
Al	Alumínio
FC	Fibra de carbono
FV	Fibra de vidro
Pc	Percentual de contribuição
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

LISTA DE NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

ε	Deformação máxima
F	Carga máxima
A_0	Área da seção transversal
σ_t	Resistência à tração
ΔL	Deslocamento do corpo de prova
L_0	Comprimento inicial do corpo de prova
E	Módulo de elasticidade
$\sigma_2 - \sigma_1$	Diferencia de tensão
$\varepsilon_2 - \varepsilon_1$	Diferença de deformação
σ_c	Resistência à compressão
$\sigma_{c2} - \sigma_{c1}$	Valores de tensão de compressão na curva linear
R_1	Raio da borda de carregamento
R_2	Raio de suporte
h	Espessura do corpo de prova,
l	Comprimento do corpo de prova
L	Comprimentos entre os suportes.
σ_f	Resistência à flexão
b	Largura dos corpos de prova
S_i	Valor de deflexão
ε_{fi}	Deformação de flexão correspondente
σ_{f1}	Tensão de flexão
K	fator de intensidade de tensão
K_{CI}	Fator de intensidade de tensão – K crítico
a	Comprimento do entalhe
w	Altura do corpo de prova
$f_l\left(\frac{a}{w}\right)$	Função que corrige o fator de intensidade de tensão para dimensões finitas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Justificativa.....	21
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivo geral.....	22
1.2.2 Objetivo específico	22
1.3 Estrutura do trabalho	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Manufatura aditiva por FDM	25
2.1.1 Materiais usados na manufatura aditiva por FDM	26
2.1.1.1 Materiais metálicos.....	26
2.1.1.2 Materiais cerâmicos.....	27
2.1.1.3 Materiais poliméricos	29
2.1.1.4 Materiais compósitos.....	31
2.2 Processo de fabricação de filamentos para uso na FDM	32
2.3 Materiais usados como reforço no processo FDM	38
2.4 Influência dos parâmetros do processo FDM no comportamento mecânico	44
2.5 Técnicas de pós-processamento de FDM	52
2.6 Microestruturas de materiais usados no processo FDM	55
2.7 Estudos de ensaio de flexão em 4 pontos de peças fabricadas por FDM	59
2.8 Mecanismos de falha.....	63
2.8.1 Mecanismos de falha em materiais compósitos.....	65
2.9 Técnica de correlação digital de imagem (CDI).....	67
3 MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.1 Fabricação dos corpos de prova	74

3.2	Caracterização mecânica.....	79
3.2.1	Ensaio de tração	79
3.2.2	Ensaio de compressão	81
3.2.3	Ensaio de flexão em quatro pontos	82
3.3	Análise de variância (ANOVA).....	85
3.4	Técnica de Correlação Digital de Imagem (CDI).....	86
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
4.1	Análise de termogravimetria (TGA).....	88
4.2	Análise infravermelho.....	89
4.3	Ensaio de tração	90
4.4	Ensaio de compressão	97
4.5	Ensaio de flexão em quatro pontos	101
4.6	Correlação digital de imagem	110
5	CONCLUSÕES	116
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	118
	ANEXO A- RESULTADO DO ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA - ENSAIO DE TRACÇÃO.	134
	ANEXO B- RESULTADO DO ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA - ENSAIO DE COMPRESSÃO.	138
	ANEXO C- RESULTADO DO ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA- ENSAIO DE FLEXÃO EM QUATRO PONTOS.	141
	ANEXO D- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRACÇÃO, COMPRESSÃO E FLEXÃO EM QUATRO PONTOS DOS CORPOS DE PROVA DE PLA PURO, PLA-FV, PLA-FC E PLA-AI.	146

1 INTRODUÇÃO

A alta demanda na fabricação de produtos e o aumento da competitividade entre as empresas têm exigido alterações no processo de desenvolvimento de produtos, visando à redução de custos e tempo de fabricação e à melhoria da qualidade dos itens fabricados. Desse modo, a manufatura aditiva permite obter peças com geometrias complexas, de forma rápida e com materiais poliméricos de baixo custo, os quais permitem fabricar peças leves e resistentes (Yadav et al., 2021).

A técnica de modelagem por deposição fundida é aplicada para a fabricação de peças tridimensionais desenhadas previamente usando um *software* CAD (Rarani et al., 2019). Para a fabricação das peças pela técnica FDM, o material é depositado na base da impressora camada por camada (Kamaal et al., 2021) (Fabra et al., 2023). A deposição do material é executada de acordo com os comandos estabelecidos antecipadamente no arquivo do código G (Maqsood & Rimašauskas, 2021).

A técnica FDM fornece vantagens como a viabilidade de produção de projetos complexos, alto custo-benefício, prazos de entrega curtos e repetibilidade (Rahim et al., 2019). Devido a essas vantagens, essa técnica é usada na indústria médica, aeroespacial, automotiva e engenharia. Na engenharia aeroespacial, podem ser manufaturadas carcaças de suporte do compressor para um motor e lâminas de turbina; na biomedicina, próteses e órteses ortopédicas, próteses e implantes dentários; na indústria automotriz, carcaças da bomba de óleo e coletores de escape, entre outros (Rupinder et al., 2016) (Mohammadizadeh et al., 2019).

Segundo a literatura, a indústria aeroespacial tornou-se uma das mais beneficiadas pela técnica FDM. As peças manufaturadas convencionalmente podem ser substituídas por peças mais leves e flexíveis, reduzindo o consumo de combustível e de desperdício de material (Kumar & Nair, 2017).

No entanto, as propriedades mecânicas das peças manufaturadas pela técnica FDM difere das manufaturadas pelos processos convencionais (Hernandez et al., 2020). De acordo com o descrito na literatura, a presença de vazios e lacunas entre as camadas são os fatores principais que prejudicam as propriedades mecânicas das peças manufaturadas pela técnica FDM (Mei et al., 2019).

A geração desses vazios e a presença de lacunas nas peças manufaturadas podem ser atribuídas aos parâmetros de impressão determinados previamente, à força do motor de passo da impressora e às configurações de deposição do material (Türk et al., 2017) (Geng et al., 2019). O material extrudado pela técnica FDM é submetido a um resfriamento rápido, desde a temperatura de transição vítrea até a temperatura ambiente (Wang et al., 2021) (Vanaei et al., 2020) (Ding et al., 2019). O resfriamento rápido gera tensões internas, afetando a ligação entre as camadas. Esses fatores produzem uma deformação inter e intralaminar das camadas em forma de trincas, delaminação ou falha na fabricação da peça, interferindo nas propriedades mecânicas (Shanmugam et al., 2021) (Skhandesh & Keles, 2022).

Por conseguinte, estão sendo desenvolvidos diversos estudos a fim de analisar e compreender o comportamento mecânico das peças manufaturadas pela técnica FDM. Otimização de parâmetros de impressão, recozimento, snap-fitting, impressão em um ambiente livre de oxigênio, prensagem mecânica e compósitos poliméricos reforçados com fibras curtas e partículas metálicas são alguns métodos empregados para aumentar as propriedades mecânicas das peças manufaturadas pela técnica FDM (Wickramasinghe et al., 2020) (Prajapati et al., 2021).

Segundo a literatura, entre os materiais mais utilizados como matriz polimérica, encontram-se o ácido polilático (PLA), o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o polietileno tereftalato glicol (PETG) e, entre os materiais de reforço, os mais usados são as fibras de carbono e de vidro. Além das fibras usadas como material de reforço, são empregadas nanopartículas de alumínio, bronze e cobre (Vardhan, H; Kumar, R; Chohan, J., 2020) (García et al., 2022).

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras são caracterizados por terem alta rigidez, resistência mecânica e resistência à fadiga e à corrosão (Hofstatter et al., 2017). Sabe-se que o desempenho mecânico das peças manufaturadas pela técnica FDM, com material compósito polimérico reforçado, depende do tipo de fibra (contínua ou descontínua), da orientação da fibra na matriz polimérica e da fração de volume da fibra (Ismail et al., 2022). Além disso, é necessário aplicar a regra da mistura para um compósito, a fim de gerar uma ligação adequada entre as fibras e a matriz. Essa ligação adequada na interface fibra-matriz permite transferir cargas eficientemente, aumentando as propriedades mecânicas (Li et al., 2022) (De Toro et al., 2020). (Hou et al., 2020) (Liu et al., 2021).

Dessa forma, neste estudo, foram avaliados filamentos de materiais compósitos e a influência da orientação de impressão nas propriedades de tração, compressão e flexão em quatro pontos de corpos de prova manufaturados de filamentos de PLA-20% Al (micropartículas de alumínio), PLA-20% FV (fibra curta de vidro) e PLA-20% FC (fibra curta de carbono) usando-se a tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM). Os corpos de prova foram manufaturados com orientações de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e de $45^\circ/-45^\circ$. Os resultados dos ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão em quatro pontos e a análise microscópica da fratura de corpos de prova produzidos de PLA com reforço foram comparados com o comportamento mecânico do PLA puro.

1.1 Justificativa

Este trabalho visa analisar o comportamento mecânico de materiais compósitos poliméricos reforçados com partículas de alumínio, fibras curtas de carbono e fibras curtas de vidro manufaturados pela técnica FDM. Sabe-se que a manufatura aditiva permite o processamento de vários tipos de materiais, os quais permitem a fabricação de novos produtos para a aplicação em áreas como, na engenharia, na biomedicina, aeroespacial, na construção civil, na indústria automotriz, na engenharia de tecidos, entre outras (Rupinder et al., 2016). Na área aeroespacial, por exemplo, a manufatura aditiva é implementada para fabricar peças mais leves, que forneçam um comportamento mecânico similar ou superior comparado com as peças manufaturadas de forma convencional. Porém, existem fatores de fabricação que influenciam no comportamento mecânico das peças manufaturadas, tais como a velocidade de impressão, a densidade de preenchimento, o ângulo de deposição de material, a resolução, a presença de vazios na estrutura e a compatibilidade entre a matriz polimérica e o material de reforço (Shanmugam et al., 2020).

Nesse sentido, é importante o desenvolvimento de estudos que permitam analisar a influência dos parâmetros de impressão e dos materiais de reforço, na matriz polimérica, no comportamento mecânico na FDM. Segundo Tofail et al. (2018), para se realizar o estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos, deve-se focar, principalmente, no conhecimento das estruturas dos materiais e das propriedades mecânicas, físicas e químicas. As propriedades mecânicas podem ser alteradas durante o processo de fabricação, na manufatura aditiva, devido ao fato de que os materiais manufaturados estão submetidos, principalmente, a mudanças de temperatura (Singh et al., 2018). Da mesma forma, são relevantes o estudo e a caracterização mediante a execução de ensaios mecânicos e análises estruturais dos corpos de

prova manufaturados pela tecnologia FDM empregando materiais compósitos, tais como PLA puro, PLA-Al PLA-FV e PLA-FC. Igualmente, é necessário efetuar estudos que permitam entender o comportamento dos materiais de reforço na matriz polimérica, analisando, em especial, a ligação e a deposição de fibras curtas e partículas como reforços no material compósito.

Ressalta-se, também, que é importante compreender o comportamento intra e interlaminar das camadas que compõem a peça obtida por meio de manufatura aditiva. Neste sentido, pode-se afirmar que o comportamento mecânico do material pode ser afetado, de modo relevante, pela geração de vazios entre as camadas inerentes ao processo FDM, devido à presença de porosidade e à não homogeneidade nas estruturas. Isso ocorre por causa das mudanças de temperatura às quais os materiais são submetidos no processo de manufatura aditiva, produzindo, assim, defeitos na estrutura.

De acordo com o mencionado anteriormente, o presente trabalho analisou a influência da orientação de impressão ($0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$) e dos materiais de reforço (PLA-Al, PLA-FV e PLA-FC) no comportamento mecânico. No estudo, foram comparados os resultados dos ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão em quatro pontos dos materiais de reforço com uma matriz polimérica de PLA com o comportamento mecânico obtido de corpos de prova manufaturados de PLA puro por meio da modelagem por deposição fundida. Dessa forma, puderam ser avaliadas a distribuição e a ligação entre os materiais de reforço e a matriz polimérica. Além disso, foram caracterizados os materiais de PLA puro, PLA-Al PLA-FV e PLA-FC, a fim de estabelecer futuras aplicações dos materiais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudo do uso de compósitos de matriz termoplástica e da influência das variações dos parâmetros de fabricação no processo de modelagem por deposição fundida.

1.2.2 Objetivo específico

Para alcançar o objetivo geral diversas atividades, se fazem necessárias. A saber:

- Avaliar a influência dos tipos de reforço (partículas de alumínio, fibras curtas de vidro e fibras de carbono) e da orientação de impressão ($0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$) nas propriedades

mecânicas mediante a execução de ensaio de tração, compressão e flexão em quatro pontos.

- Caracterizar o comportamento mecânico dos materiais compósitos de PLA puro, PLA-AI, PLA-FV e PLA-FC, por meio de ensaios de tração, compressão e flexão em quatro pontos.
- Determinar a influência da adição de reforços nas temperaturas de transição por meio da análise de termogravimetria.
- Investigar por meio de análise de variância (ANOVA) a influência do material de reforço e dos parâmetros de impressão no comportamento mecânico.
- Determinar parâmetros de impressão para obtenção de peças com desempenho mecânico melhorado.
- Avaliar por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura os tipos de fratura e o comportamento dos diversos materiais.
- Validar o uso da técnica de correlação digital de imagem (CDI) no estudo de tensões e deformações.

1.3 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho é composta por cinco capítulos, que será brevemente descrita abaixo.

O capítulo 1 realiza uma contextualização do trabalho realizado, no qual, descreve a importância do estudo, as problemáticas apresentadas e os objetivos gerais e específicos determinados para a realização do projeto final.

No capítulo 2 uma revisão bibliográfica é apresentada. Foram mencionados estudos de caracterização de materiais compósitos mediante a execução de análises mecânicas usados na manufatura aditiva, relacionados com a pesquisa desenvolvida e que foram usados como base para o desenvolvimento do presente trabalho.

No capítulo 3, são descritos os materiais e métodos usados para a fabricação e a caracterização mediante a execução de ensaios mecânicos (ensaio de tração, compressão e flexão em quatro pontos) dos materiais que foram estudados PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI.

O capítulo 4 os resultados dos ensaios mecânicos e da análise de variância (ANOVA) são apresentados, no qual, foram discutidos e foi avaliado o comportamento obtido para cada um dos materiais estudados, baseado nos trabalhos encontrados na literatura.

Finalmente, no capítulo 5 as conclusões e contribuições do trabalho desenvolvido são descritas. Além disso, são apresentadas as recomendações para trabalhos futuros na mesma área do trabalho proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manufatura aditiva por FDM

A modelagem por deposição fundida (FDM) baseia-se na extrusão e deposição de material camada por camada, de forma cíclica, até obter um modelo tridimensional desenhado previamente em um *software* CAD (Liu G. et al., 2021). A manufatura aditiva por FDM tem popularizado o uso de diversos materiais, na sua grande maioria, polímeros, para a fabricação de vários produtos com uso em inúmeras áreas (Fasel et al., 2020) (Baptista & Guedes, 2021). Os materiais de maior destaque são os poliméricos termoplásticos, devido às suas vantagens intrínsecas, permitindo fabricação de formas e estruturas complexas (Bowoto et al., 2020). (Hernandez et al., 2020) ressalta o fato de materiais poliméricos tem uso difundido em aplicações de engenharia principalmente pela relação peso e resistência, o que torna a caracterização destes materiais de grande impacto no setor produtivo.

Saiba-se que no processo FDM o cabeçote de extrusão move-se nos eixos X e Y, e a plataforma de impressão move-se na direção Z. A alimentação do filamento realiza-se por um sistema de pressionamento para tracionar e retrair o filamento. Finalmente o filamento é extrudado e depositado na plataforma de impressão. Na Figura 2.1, pode ser visualizado o esquema da fabricação de uma peça usando-se a modelagem por deposição fundida (FDM) (Shanmugam et al., 2021).

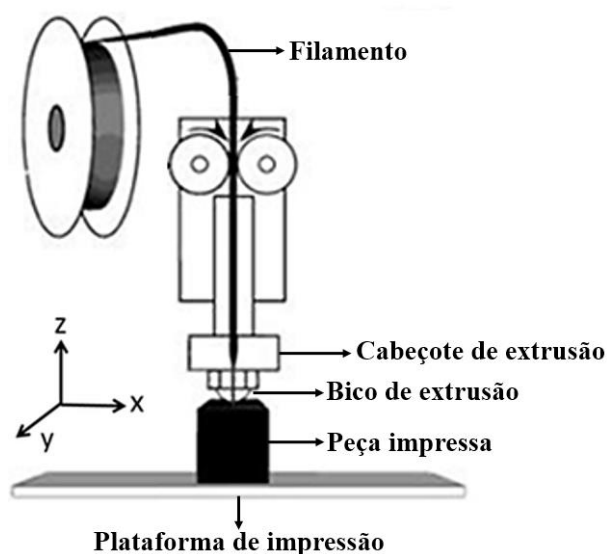


Figura 2.1- Fabricação de peça usando a tecnologia de modelagem por deposição fundida (Shanmugam et al., 2021).

2.1.1 *Materiais usados na manufatura aditiva por FDM*

A manufatura aditiva permite o uso de diversos materiais para a fabricação de peças, os quais são definidos de acordo com a aplicação dos diferentes processos e técnicas disponíveis, como por exemplo, a modelagem por deposição fundida, a sinterização seletiva a laser, a estereolitografia, entre outras, é possível o uso de materiais metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos, os quais serão descritos a seguir.

2.1.1.1 *Materiais metálicos*

Os materiais metálicos usados na FDM apresentam estruturas com boa resistência mecânica, mas também possuem desvantagens nas propriedades mecânicas, comparados com as peças que são fabricadas convencionalmente ou defeitos no acabamento final da peça, os quais são atribuídos à mudança de temperatura e às diferentes condições a que são submetidos no processo FDM (Mukherjee et al., 2018). Por isso, é necessário definir os parâmetros de impressão e determinar os processos adequados que devem ser aplicados depois de se ter a estrutura impressa. Os principais materiais utilizados na FDM são o alumínio, o cobre, o aço inoxidável, o cobalto, o cromo, o titânio e o tungstênio.

DebRoy et al. (2018) descreve os defeitos mais comuns na FDM com materiais metálicos. A porosidade é ocasionada pelas contrações no material durante o resfriamento ou pela falta de fusão; além disso, pode haver porosidade quando ocorrem problemas na deposição do material. Por outro lado, os poros esféricos podem ser produzidos por aprisionamento de gás, evaporação do material, dentre outros fatores. Segundo o autor, é necessário realizar processos depois da impressão, como a limpeza da superfície com álcool ou acetona e remoção mecânica de óxidos por escova rotativa ou desbaste. Mesmo assim, na deposição de ligas de Al, sugere-se a utilização de uma escova com cerdas de aço inoxidável, de uso exclusivo para estas ligas, a fim de evitar quaisquer tipos de contaminação (Mukherjee et al., 2018).

No caso das trincas, estas podem ser decorrentes da solidificação, da delaminação e do resfriamento. Esses tipos de trincas são atribuídos ao aporte de calor durante a transferência metálica, pois, quanto menor o aporte, menor será o grão e, conseqüentemente, menor a segregação dos elementos de baixo ponto de fusão. Da mesma forma, outra solução para minimizar a geração de trincas é diminuir a velocidade de deposição, pois o crescimento é acentuado quando se tem velocidade excessiva, favorecendo a segregação dos elementos de baixo ponto de fusão (Bourell et al., 2017).

Igualmente, nas peças impressas de material metálico, há distorção pelas tensões produzidas durante a obtenção da estrutura. Essas distorções podem ser originadas pela contração durante o resfriamento de regiões aquecidas e plastificadas, pelo resfriamento superficial acelerado e pelas transformações de fase. O grau de distorção também é ocasionado pelas propriedades físicas e mecânicas do material, como o coeficiente de expansão térmica, condutibilidade térmica, o limite de escoamento e o módulo de elasticidade (DebRoy et al., 2018).

De outro modo, pode-se encontrar oxidação das peças devido a altas temperaturas, as quais provocam reações de oxidação da superfície metálica, prejudicando as propriedades mecânicas. Para prevenir a ocorrência da oxidação, deve-se realizar uma proteção atmosférica adequada e aplicar um mínimo de energia aportada no processo. Assim, sabe-se que a maioria das estruturas impressas com materiais metálicos não apresenta um bom acabamento superficial (Mukherjee et al., 2018). Na Figura 2.2, podem ser visualizados exemplos de peças manufaturadas usando-se materiais metálicos.

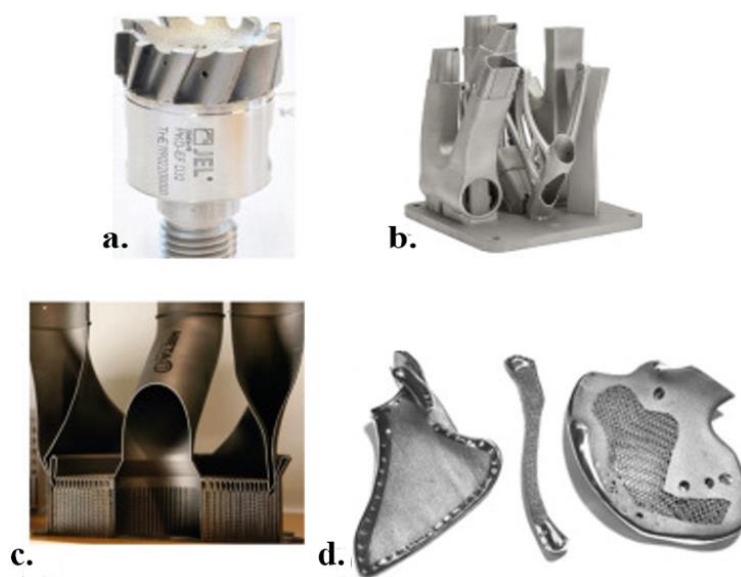


Figura 2.2- Exemplo de estruturas metálicas impressas em 3D a. ferramenta de corte, b. quadro de bicicleta, c. recuperador, d. componentes biomédicos (Uçak et al., 2022).

2.1.1.2 *Materiais cerâmicos*

O material cerâmico para a manufatura aditiva, normalmente, é usado em formato de pó, sendo produzidas estruturas pequenas, com alta resistência mecânica, indicadas para a

fabricação de moldes de um determinado processo ou uma determinada peça que será restaurada ou reproduzida.

A obtenção das peças impressas com materiais cerâmicos é dada pela deposição de uma camada de material na base da impressora e por meio de um laser de alta potência que sinteriza o pó, permitindo a geração de adesão entre as partículas e cada uma das camadas que constituem a peça final. Os principais materiais cerâmicos aplicados na manufatura aditiva são a hidroxiapatita, o fosfato de cálcio - óxido de silício (SiO_2) - óxido de zinco (ZnO), a sílica biocerâmica - carbonato de cálcio (CaCO_3) - SiO_2 -sol, a leucita – a cerâmica de vidro, a alumina, o da camada e o tempo de deposição das camadas (Hwa et al., 2017). Dessa forma, a composição físico-química e o pós-processamento são aspectos que devem ser compreendidos para se alcançar uma melhoria nas propriedades mecânicas. Nesse contexto, Butscher et al. (2012) realizaram um estudo sobre a fluidez e a estabilidade do pó, a capacidade de umedecimento das partículas do ligante e a reação entre o pó e o ligante. Para isso, os autores analisaram a influência desses materiais nas propriedades mecânicas resultantes e concluíram que, para obter resultados promissores, o estudo do material cerâmico em pó exigia caracterizações que eram importantes para bons resultados de impressão.

A primeira caracterização do pó foi o tamanho da partícula. A distribuição do tamanho das partículas e a microporosidade intrínseca do material cerâmico impresso devem ser analisadas, pois elas afetam os resultados na adesão entre as partículas. Para isso, é necessário realizar processos de peneiramento a fim de remover as partículas com um diâmetro maior, evitando a aglomeração. Da mesma forma, essas partículas com maior diâmetro não vão permitir uma propagação adequada, fazendo com que as peças não fiquem homogêneas e o ligante não possa aglutinar de forma eficiente, prejudicando a ligação entre as partículas e diminuindo a resistência na estrutura fabricada (Butscher et al., 2012).

Outro fator importante, que deve ser estudado, é o efeito da fluidez para determinar a capacidade do material cerâmico, em formato de pó, de se propagar. A propagação do pó pode ser determinada pelo tamanho, distribuição e rugosidade da superfície (Gailevičius et al., 2019). Os pós finos, geralmente, não fluem o suficiente para se espalharem em camadas sem defeitos; sua alta área de superfície causa aumento da resistência coesiva e diminuição da fluidez. Por fim, o efeito da molhabilidade das partículas de cerâmica, para a solução aglutinante, é um fator realmente importante na manufatura aditiva.

Diante do contexto apresentado, uma molhabilidade muito baixa vai gerar o rearranjo do pó fino, levando a uma integração fraca de pó aglutinante, e, uma molhabilidade muito alta, vai gerar uma reação lenta, com o pó diminuindo o tamanho das menores feições, dispersando o aglutinante (Bandyopadhyay & Heer, 2018). Desse modo, o volume de ligante distribuído dentro dos pós cerâmicos vai determinar as propriedades de resistência mecânica e a resolução da peça final. Na Figura 2.3, podem ser observados alguns exemplos de estruturas manufaturadas usando-se materiais cerâmicos.

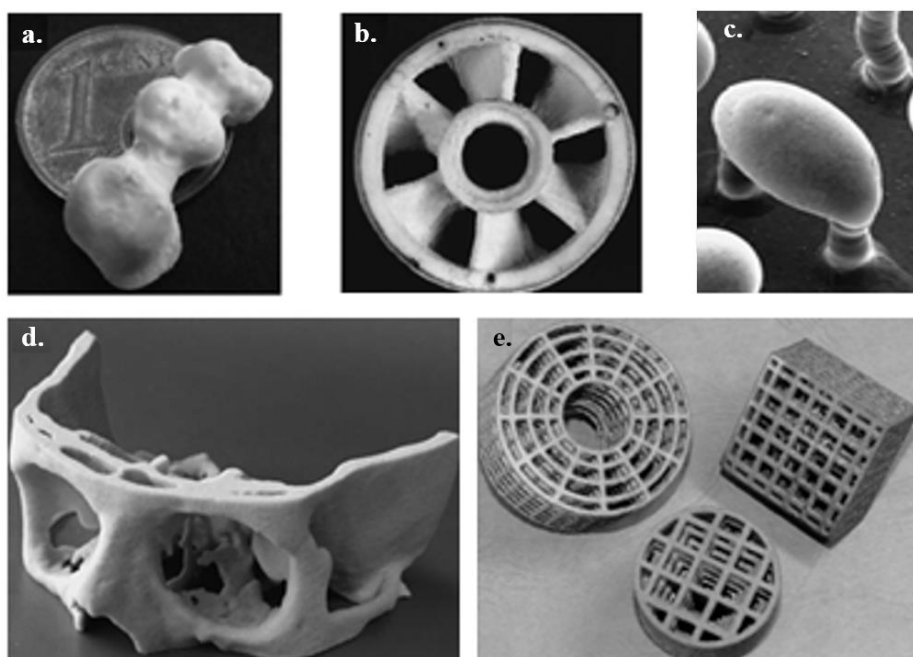


Figura 2.3- Exemplo de estruturas impressas em 3D com materiais cerâmicos. a. restauração dentária, b. Impulsor, c. matriz de micropilares, d. implante ósseo e e. estruturas macrocelulares com comprimentos de ligamentos variáveis. (Travitzky et al., 2014).

2.1.1.3 *Materiais poliméricos*

Segundo a literatura, a manufatura aditiva utiliza, principalmente, materiais termoplásticos como matéria-prima. Os polímeros termoplásticos são os materiais que, em temperaturas relativamente altas, tornam-se deformáveis ou flexíveis. Além disso, quando estão sendo aquecidos acima da temperatura de transição vítrea, e, ao entrarem em contato com a temperatura ambiente ou quando são resfriados, os materiais poliméricos solidificam (Serdeczny et al., 2020).

Os polímeros termoplásticos são compostos por duas fases, dependendo do grau intermolecular. A primeira é a estrutura amorfa, responsável pelas propriedades elásticas dos

materiais, e a segunda fase é a estrutura cristalina, responsável pelas propriedades mecânicas de resistência ao impacto e também às altas e baixas temperaturas (Hmeidata et al., 2020). Os materiais usados na manufatura aditiva são, principalmente, o ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno), o PLA (ácido polilático) e o PE (polietileno). O filamento de ABS é produzido a partir da transformação de substâncias derivadas do craqueamento do petróleo (Yuan et al., 2019). Este polímero é composto por três monômeros diferentes: acrilonitrila, que oferece boa resistência química e térmica e durabilidade; butadieno, que oferece boa resistência de impacto; e o estireno, que possui ótima resistência mecânica, fácil processamento e rigidez (Sikora et al., 2019).

Quando é utilizada no processo FDM, a temperatura de impressão do ABS se encontra a partir dos 210°C até 250°C. Além disso, é necessário que a base onde vai ser depositado o material na máquina FDM esteja em uma temperatura de 100°C, a fim de garantir que a peça fique colada na base (Blok et al., 2018). Outra condição é que, pelo fato de ser um material derivado do petróleo, ao ser fundido, gera um odor forte, podendo se tornar tóxico; portanto, é aconselhável fazer impressões em áreas ventiladas. O ABS se dissolve com a acetona e se deteriora quando é exposto à luz solar (Hu et al., 2018).

No caso do PLA (ácido polilático), trata-se de um polímero termoplástico biodegradável obtido a partir da fermentação de bactérias de vegetais ricos em amido, produzindo grandes quantidades de ácido lático que se unem em cadeias de repetições. Esse material trabalha com temperaturas mais baixas que o ABS, e suas características são a leveza, alta tenacidade e alta resistência ao impacto, embora não tanto quanto o ABS. As temperaturas de fusão estão em uma faixa de 170°C até 210°C. O PLA é um polímero que se resfria de forma lenta, necessitando de resfriamento constante enquanto a peça esteja sendo impressa (Vinyas et al., 2019).

O polietileno (PE) caracteriza-se por ser um material de baixo custo, por sua excelente resistência química e por sua flexibilidade para ser manipulado. O filamento de material de PE é composto por uma cadeia de átomos de carbono ligados a átomos de hidrogênio e possui duas fases. Uma com estrutura cristalina, que fornece as propriedades da estrutura, e outra com estrutura amorfa, que fornece as propriedades de flexibilidade (Vinyas et al., 2019).

Na Tabela 2.1, pode ser observada a comparação do desempenho mecânico entre os materiais de PLA (ácido polilático), ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno) e PE6.

Tabela 2.1- Comparação das propriedades mecânicas dos polímeros termoplásticos (Lima et al., 2021)

Valores médios / Material	PE6	ABS	PLA
Módulo de elasticidade (MPa)	774,23	1075,12	1761,07
Desvio padrão	16,8	8,34	6,76
Resistência à tração (MPa)	50,1725	30,9619	22,2613
Desvio padrão	3,99	2,25	1,84
Deformação total	75,17%	4,33%	1,40%
Desvio padrão	0,1046	0,0034	0,0011
Resistência à flexão (MPa)	45,2065	45,5864	18,6144
Desvio padrão	8,08	2,94	3,65
Deformação total	17,09%	4,82%	4,45%
Desvio padrão	0,0091	0,0041	0,0103

Além dos polímeros termoplásticos mencionados anteriormente, no processo FDM, também são usados o PEAD (polietileno de alta densidade), a PA6 (poliamida 6), o PSAI (poliestireno de alto impacto), PVA (poliácido vinílico), PC (policarbonato) Abs/PC (ABS com policarbonato), TPE (termoplástico elastômero), entre outros (Ahmad et al., 2020).

2.1.1.4 *Materiais compósitos*

Os materiais compósitos são cada vez mais utilizados na indústria, nomeadamente a aeroespacial, a mecânica, a civil e a eletrônica, devido às suas excelentes propriedades, como relação rigidez/peso, resistência à corrosão e a possibilidade de fabricar elementos de formas complexas (Gupta et al., 2020).

Os materiais compósitos são materiais multifásicos que possuem uma proporção significativa das propriedades de ambas fases constituintes. Alguns materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases; uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase denominada fase dispersa. Os materiais compósitos estão classificados em três principais divisões: os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais (Callister, Jr; Rethwisch, G., 2012). Segundo Awual et al. (2022) a função da matriz é suportar as fibras, a diminuição do peso e a absorção das deformações. Além disso, a matriz deve assegurar a resistência à estrutura, realizar a transferência de tensões ao longo das fibras, conferir estabilidade térmica e evitar a propagação de fissuras. Por outro lado, o material usado como reforço fornece a rigidez e a resistência, principalmente (Kandemir et al., 2020).

Os materiais compósitos podem ser classificados dependendo das características do reforço, da geometria e da orientação, sendo divididos em fibras contínuas ou fibras descontínuas com dimensões pequenas. Deste modo, cada tipo de configuração apresenta diferentes propriedades que levam à escolha do compósito, considerando, principalmente, a aplicação. Assim, pode se afirmar que um dos principais objetivos para se fabricar materiais compósitos é a melhoria destas propriedades físicas e/ou mecânicas tais como, o aumento da resistência mecânica, a diminuição do peso e a redução da densidade.

Ahmed et al. (2021) analisaram as propriedades de adição da sílica (5%, 10% e 15% em peso) em materiais poliméricos, como o polipropileno (PP), o acetato de polivinila (PVA), o ácido polilático (PLA) e a poliamida (PA), com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas e térmicas de materiais poliméricos utilizados na manufatura aditiva. Além disso, a morfologia foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram aumento na resistência à tração dos polímeros estudados, sendo que a adição de sílica no PP eleva ligeiramente a resistência à tração, de 6,96 MPa a 5%, em peso, para 7,15 MPa a 10% em peso. No caso do PVA, a resistência à tração aumentou consideravelmente, de 54 MPa para 76 MPa, com a adição de 5% em peso de sílica; porém, a resistência à tração diminuiu quando os teores de sílica aumentaram.

Os resultados da resistência à tração do PLA mostraram uma diminuição com o aumento da concentração de sílica até atingir 10% em peso. Finalmente, na PA, a resistência à tração diminuiu gradualmente, de 120 MPa, com uma concentração de 0% em peso de sílica, para 23 MPa, com uma concentração de 15% em peso de sílica. Os autores atribuíram a redução na resistência à tração à presença de aglomeração de partículas de sílica na matriz polimérica. Esses aglomerados atuam como defeitos e pontos de iniciação que podem causar falhas, e a geração de vazios nas matrizes também reduz a resistência à tração.

2.2 Processo de fabricação de filamentos para uso na FDM

Os filamentos manufaturados de material polimérico usados na FDM são obtidos por meio do processo de extrusão, o qual se inicia com a deposição, em grãos, do material polimérico na extrusora, onde é movimentado, ao longo de uma rosca, sendo fundido. Uma vez fundido o material polimérico, ele é empurrado através de um bico circular com diâmetros de 1.75 mm ou 3 mm (dimensões padrão usadas na FDM). Finalmente, o material é resfriado e

enrolado em bobinas para ser usado (Hemanth et al., 2014). Sabendo-se que cada material possui um comportamento diferente, alguns serão mais flexíveis; outros, mais rígidos.

Gupta et al. (2022) fabricaram um filamento compósito usando diferentes porcentagens, em peso (3%, 5% e 10%), de policarbonato (PC) reforçado com fibra curta de carbono (FCC). Inicialmente, foram misturados grânulos secos de PC e FCC (diâmetro = 7,2 μm e comprimento = 150 μm), e três misturas foram preparadas usando-se PC e FCC (em volume.). Para a primeira mistura, foram utilizados 97% PC + 3% FCC; para a segunda, 95% PC + 5% FCC, e, para a terceira, 90% PC + 10% FCC. O material compósito foi secado no forno a uma temperatura de 50°C por 4 horas, a fim de evitar a presença de umidade no processo de impressão. Uma vez realizado o processo de secagem, o FCC/PC foi depositado em uma extrusora, com uma única rosca, com movimento contínuo. O bocal de aço endurecido, com diâmetro de 2.85 mm da extrusora, se encontrava a uma temperatura de 270 °C. Finalmente, foi obtido o filamento compósito de FCC/PC e foram manufacturados os corpos de prova pela técnica FDM. O processo de fabricação do filamento compósito de FCC/PC pode ser observado na Figura 2.4.

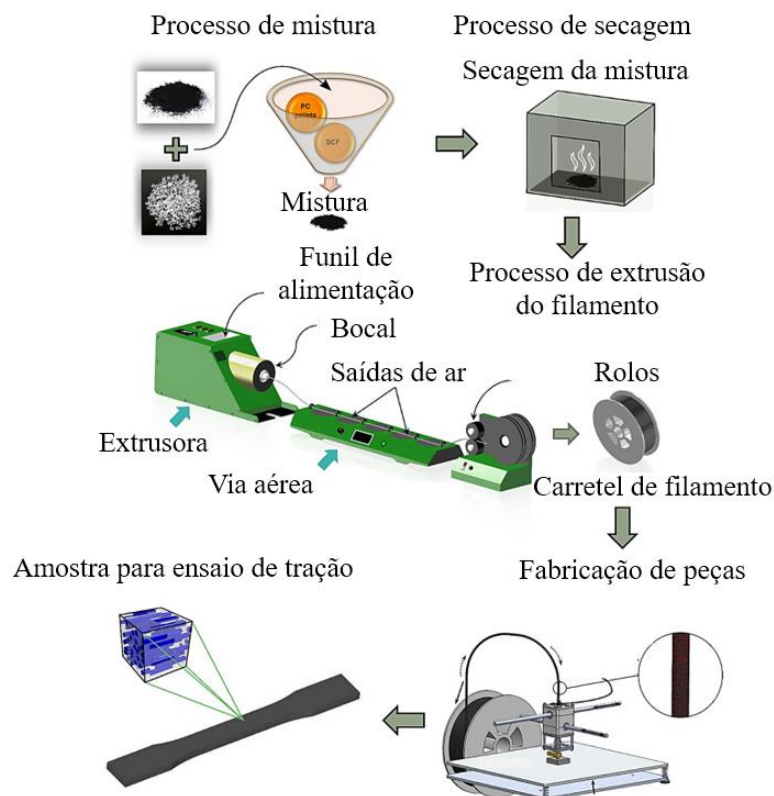


Figura 2.4- Esquema de fabricação do filamento compósito FCC/PC e uso em FDM (Gupta et al., 2022).

Existe um interesse no estudo e melhoria das propriedades mecânicas dos materiais poliméricos usados nos processos convencionais de fabricação, também há um grande interesse por melhorar as propriedades mecânicas dos materiais usados na manufatura aditiva e a influência dos parâmetros de deposição (Moradi et al., 2020) (Liao et al., 2020). Desse modo, é também importante estudar o processo de fabricação do filamento, assim como a influência do pós-processamento nos corpos de prova manufaturados realizando tratamentos químicos e térmicos que permitam melhorar a ligação entre a matriz e o material de reforço.

Nesse sentido, em um trabalho executado por Kumar et al. (2020), foi desenvolvido um filamento de material compósito de PLA (ácido polilático), poliamida (PA6) e óxido de titânio (TiO_2) para uso na tecnologia FDM. Inicialmente, os polímeros utilizados estavam em forma de grânulos e foram processados em uma extrusora de rosca dupla, para obtenção do filamento com diâmetros de $1,75 \pm 0,05$ mm. Dessa forma, com o filamento produzido, foram manufaturados corpos de prova para serem analisadas as propriedades de flexão e desgaste. Além disso, os autores estudaram a otimização dos parâmetros de impressão 3D para a tecnologia FDM (velocidade de preenchimento, tipo de preenchimento e combinação de camadas). No estudo, foram determinadas três combinações de camada de PLA-PA6/ TiO_2 (5:5, 6:4 e 7:3).

Os resultados do ensaio de flexão mostraram os maiores valores na resistência à flexão (95,91 MPa) nos corpos de prova manufaturados com uma velocidade de preenchimento de 90 mm/s, um tipo de preenchimento triangular e uma combinação de camadas de 5:5. Nos testes de desgaste, foi observado que o material de PLA puro revelou maior taxa de desgaste (1092 μm) em comparação com PA6/ TiO_2 (823 μm), e o coeficiente de atrito teve um comportamento similar para ambos os corpos de prova. Os autores afirmam que o PA6 tem maior resistência de ligação que o PLA puro, resultando, assim, em uma baixa taxa de desgaste abrasivo nos corpos de prova compostos de PA6/ TiO_2 .

Nos testes de porosidade, observou-se que os corpos de prova que obtiveram maior resistência à flexão apresentavam menor porosidade relativa (11,2%), e aqueles com menores valores na resistência à flexão evidenciaram um grande valor de porosidade relativa (23,58%), mostrando, assim, que a resistência à flexão está inversamente relacionada à porosidade dos corpos de prova. Finalmente, os resultados da análise MEV revelaram que durante o processo de solidificação entre camadas de material do reforço de acumularam apresentando trincas internas, significando que o PLA e o PA6/ TiO_2 não foram totalmente compatíveis entre si.

Por sua vez, Zerankeshi et al. (2022) compararam dois métodos para a fabricação de filamentos compósitos de PLA-grafite para uso na manufatura aditiva, a fim de avaliar a estrutura e a morfologia mediante a realização da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície dos filamentos extrudados. Além disso, a estrutura em corte transversal foi estudada, usando-se um microscópio ótico, e também foi executado um teste de difração de raios-X para avaliar a fase e a estrutura do material compósito exposto à radiação. Por fim, executaram-se ensaios de tração e compressão.

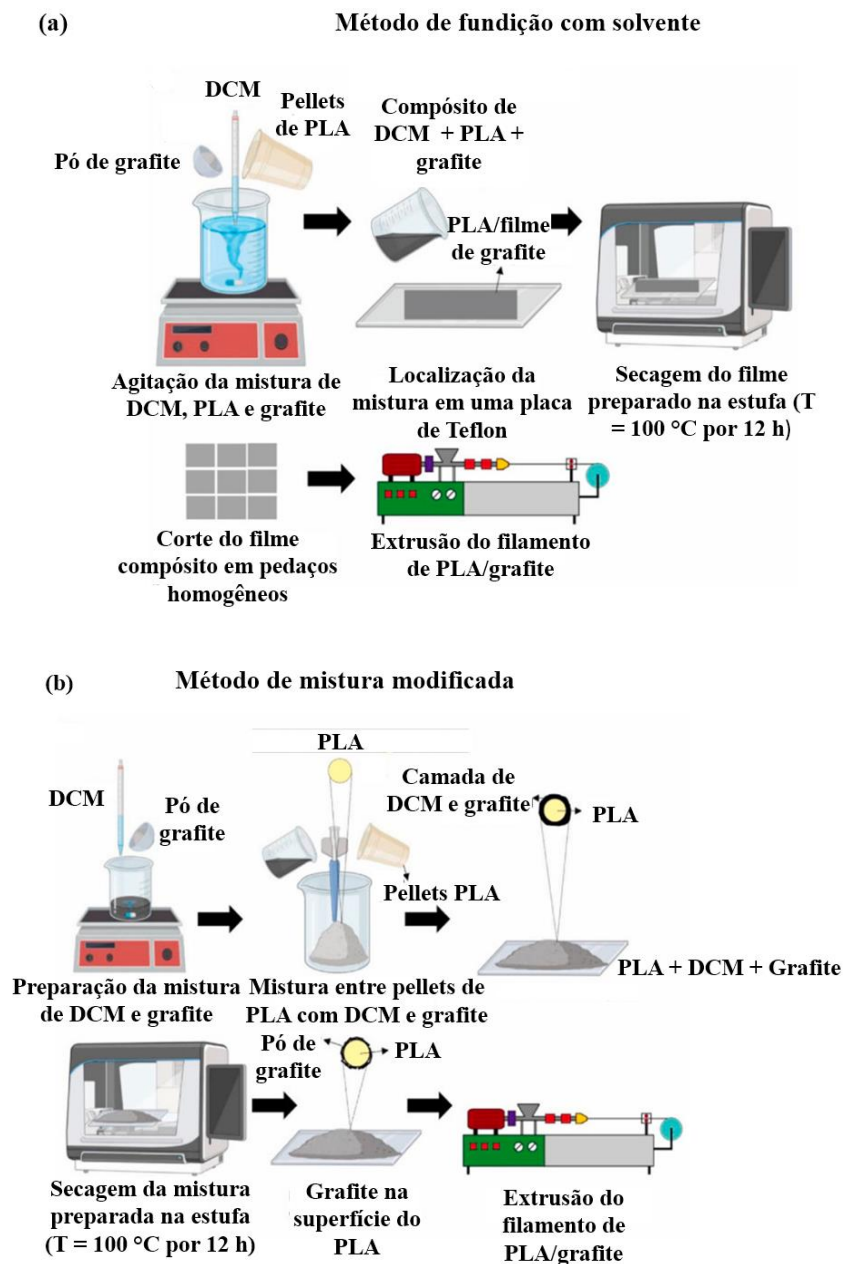


Figura 2.5- Técnica de fabricação de filamentos de material compósitos de matriz de PLA e reforço de grafite: a. fundição com solvente e b. mistura modificada (Zerankeshi et al., 2022).

A técnica de fabricação planteada pelos autores foi o método de fundição com solvente, que se baseia na dissolução parcial da superfície dos corpos de prova de PLA por diclorometano (DCM), gerando uma forte adesão dos pós de reforço (Figura 2.5a). Depois de obter o material compósito, este foi extrudado para a fabricação do filamento. Dessa forma, o método de mistura modificado foi também desenvolvido pelos autores, adicionando-se o pó de grafite ao diclorometano sob agitação mecânica. O resultado da mistura foi acrescentado ao PLA, obtendo-se uma mistura homogênea de PLA, grafite e diclorometano (Figura 2.5b). O material compósito resultante foi extrudado para se obter o filamento para uso em FDM (Figura 2.5). Os filamentos obtidos por meio da implementação dos métodos foram usados para a fabricação de *scaffold* 3D mediante a técnica FDM.

Nos filamentos fabricados de PLA-grafite por meio do método de fundição com solvente, apresentaram diâmetro inconsistente, desviando-se do valor nominal de $\pm 0,22$ mm registrando vazios na superfície. Além disso, a rugosidade superficial deste filamento é comparativamente alta e apresentou aglomeração de partículas. No que se refere ao filamento manufaturado pelo método de mistura modificado, o diâmetro apresentou menor variabilidade, com desvio dimensional de $\pm 0,06$ mm, demonstrando que a maior temperatura de transição vítrea e maior grau de cristalinidade afetam a qualidade geométrica do produto.

Por outro lado, o processo de fabricação do filamento pelo método de fundição com solvente mostrou uma estrutura mais heterogênea com baixa capacidade de resolução. Ao contrário das peças fabricadas pelo método de fundição por solvente, o método de mistura modificado revelou uma estrutura heterogênea e melhor acabamento. Os resultados dos ensaios de tração e compressão são mostrados na Figura 2.6. Observa-se que a resistência à tração e compressão aumentou com a adição de grafite, em comparação ao PLA puro. Igualmente, nota-se que o método de mistura modificado mostrou os maiores valores da resistência à tração e compressão.

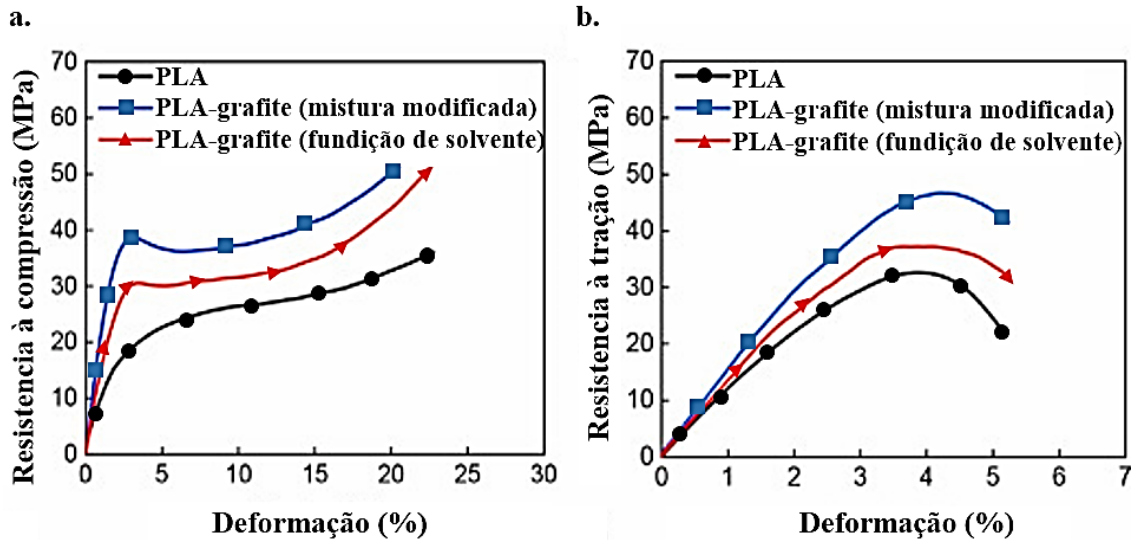


Figura 2.6- Curvas de tensão-deformação. a. Resistência à compressão e b. Resistência à tração (Zerankeshi et al., 2022).

Em um estudo desenvolvido por Vardhan et al. (2020), foi caracterizado um material compósito para uso na tecnologia FDM. Os corpos de prova foram manufacturados com adição de camadas alternadas de alumínio pulverizado e ácido polilático (PLA). No estudo, foram investigadas as propriedades de tração do material compósito e a interação com os parâmetros estabelecidos no processo, como o número de camadas de spray de alumínio (1,3 e 5), a porcentagem de preenchimento (40%, 70% e 100%) e a temperatura da base da impressora (60°C, 80°C e 100°C). O spray de alumínio usado apresentava uma espessura de camada seca de 0,05 mm e uma densidade de $1,15 \text{ mm/cm}^3$.

Os autores observaram que os corpos de prova manufacturados com camadas alternadas de alumínio pulverizado apresentaram maior resistência à tração que o PLA puro. O valor máximo na resistência à tração foi de 56,01 MPa, para os corpos de prova manufacturados com 100% de preenchimento e três camadas de spray de alumínio, mostrando, assim, que uma maior densidade e a deposição de camadas de metal pulverizadas fortalecem a estrutura interna das peças. Os autores afirmam que a adição do spray de alumínio gera uma resistência adicional contra a força de tração, devido ao fato de que o material de reforço preenche os pequenos vazios da estrutura manufacturada de PLA puro. Porém, quando o número de camadas de alumínio pulverizado aumenta, a resistência à tração diminui, porque a ligação entre as camadas de PLA puro é afetada pelo spray de alumínio, reduzindo a sua capacidade de suportar esforços trativos uniaxiais.

Asif et al. (2020) implementaram um novo processo de manufatura aditiva por fotopolimerização adicionando uma câmara que usa ondas estacionárias, com o objetivo de alinhar as fibras de carbono misturadas à resina fotocurável. Os autores testaram concentrações de fibra de carbono de 0,5%, 1%, 2% e 4% p/v, assim como direção do alinhamento paralelo e perpendicular, visando estudar a resistência à tração dos compósitos poliméricos.

A câmara foi fabricada com dois transdutores piezoelétricos opostos a refletores de vidro usados para gerar ondas acústicas em massa na matriz polimérica, a fim de alinhar as fibras de carbono dispersas aleatoriamente. Os autores observaram que as fibras se alinharam ao longo de planos paralelos ao transdutor, e as bandas próximas tinham uma separação correlacionada com a metade do comprimento de onda do ultrassom em todas as concentrações. Nos resultados dos ensaios de tração, os compósitos com 1% p/v mostraram o maior valor na resistência à tração (28%) devido ao alinhamento das fibras de carbono. Os autores afirmam que esse comportamento era o esperado pelo alinhamento das fibras de forma ótima.

Os autores testaram, igualmente, o grupo de concentração de 1% de fibra de carbono para avaliar o efeito do reforço e da orientação de impressão. Os autores avaliaram uma orientação de impressão de $0^{\circ}/0^{\circ}$ (Paralelo à direção da carga uniaxial) e de $(0^{\circ}/90^{\circ})$ na resistência à tração, avaliando, também, fibras distribuídas aleatoriamente e a resina sem reforço. Nos resultados, a orientação de impressão de $0^{\circ}/0^{\circ}$ apresentou a maior resistência à tração (2.95 MPa).

Conforme os autores, isso ocorre porque as fibras, nessa direção, foram orientadas ao longo da direção da carga de tração, aumentando o atrito interno geral entre elas durante o ensaio de tração, obtendo-se maiores valores na resistência à tração. Igualmente, a adição de fibras de carbono, distribuídas aleatoriamente (2.16 MPa), e a orientação de impressão de $0^{\circ}/90^{\circ}$ (2.36 MPa) evidenciaram maior resistência à tração em comparação à resina virgem (1.63 MPa). Assim, os autores concluíram que a organização controlada das fibras de carbono, dentro das resinas, por meio do processo de fotopolimerização por ultrassom, é efetiva para controlar o alinhamento dessas fibras, promovendo, desse modo, aumento na resistência à tração.

2.3 Materiais usados como reforço no processo FDM

Devido as características do processo de manufatura aditiva por modelado por deposição fundida (FDM), os materiais termoplásticos reforçados aparecem com uma opção. Base a isto, os tipos de reforço devem ser objeto de estudo para permitir a otimização de processo e

parâmetros de deposição. Existem diversos fatores que estão sendo estudados, tais como o fluxo do material, a orientação da fibra, o umedecimento do material, a formação de ligações entre grânulos, o comportamento de solidificação do material depositado, a geração de tensões internas e a deformação no processo de impressão (Brenken et al., 2018).

Vakharia et al. (2021) investigaram e caracterizaram filamentos compósitos produzidos com materiais de ácido polilático (PLA) reforçados com partículas de bronze (PLA-Br), cobre (PLA-Cu), ferro magnético (PLA-FM) e aço inoxidável (PLA-Ainox), variando a altura da camada (0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm e 0,4 mm). Os autores determinaram porcentagens de volume para cada material de reforço avaliado, sendo PLA-Br (36,02%), PLA-Cu (36,41), PLA-FM (11,05%) e PLA-AI (18,09%). No estudo, estabeleceram-se as respostas à tração e à tenacidade à fratura de acordo com a porcentagem de volume dos materiais metálicos de reforço e a espessura da camada.

Nos ensaios realizados, pôde ser observado que a resistência à tração e a tenacidade à fratura do PLA reforçado com ferro magnético (FM) e aço inoxidável mostraram comportamento semelhante ao do PLA puro, com uma leve diminuição na resistência à tração e na tenacidade à fratura, enquanto as partículas de bronze e cobre revelaram uma redução na resistência à tração e na tenacidade à fratura. Os resultados do módulo de elasticidade médio (MPa), da resistência máxima (MPa), o coeficiente de Poisson e a tenacidade à fratura ($\text{MPa}\sqrt{m}$), tanto para os materiais de reforço metálicos quanto para os corpos de prova manufaturados, variando a altura da camada de material PLA puro, são ilustrados na Tabela 2.2.

Como mencionado pelos autores, o PLA-Br e o PLA-Cu tinham maior porcentagem de volume que o PLA-FM e o PLA- aço inoxidável, sendo que essa adição alta de bronze e cobre transforma o PLA em um material estrutural significativamente mais dúctil, diminuindo a resistência à tração e a tenacidade à fratura, começando a se deformar plasticamente logo após a aplicação de uma tensão. No entanto, a adição de partículas metálicas na matriz de PLA pode produzir peças com melhores propriedades óticas, magnéticas, elétricas ou térmicas, sem afetar significativamente as propriedades mecânicas do polímero.

Tabela 2.2- Resultados do módulo de elasticidade médio (MPa), da resistência máxima (MPa), o coeficiente de Poisson e a tenacidade à fratura ($MPa \sqrt{m}$) para todos os materiais usados neste estudo (Vakharia, et al., 2021).

Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à máxima (MPa)	Coeficiente de Poisson	Tenacidade de à fratura ($MPa\sqrt{m}$)
PLA-Br (0,3 mm)	5401	17	0,29	2,0
PLA-Cu (0,3 mm)	4496	16	0,25	1,7
PLA-FM (0,3 mm)	3638	39	0,32	3,4
PLA- aço inoxidável (0,3 mm)	3910	38	0,33	3,1
PLA (0,1 mm)	3145	50	0,33	N/A
PLA (0,2 mm)	3110	51	0,34	N/A
PLA (0,3 mm)	2835	46	0,33	3,39
PLA (0,4 mm)	2925	51	0,34	N/A

Outros fatores de extremo interesse a serem avaliados são a adesão entre as camadas dos corpos de prova manufaturados em 3D e a ligação entre a matriz e o material de reforço, assim como o comportamento intra e interlaminar. Iragi et al. (2019) avaliaram o comportamento intra e interlaminar dos corpos de prova manufaturados de poliamida reforçados com fibra de carbono. No estudo, foram analisadas a resistência da camada e da interface e as características de fratura, além dos defeitos gerados pela deficiência no processo de fabricação de filamentos fundidos (FFF), incluindo a distribuição não homogênea das fibras, a alta presença de vazios intra e interlaminares e a fraca ligação entre as camadas.

Esses defeitos foram atribuídos à consolidação termomecânica deficiente do material processado, o qual tem grande influência no comportamento mecânico. Igualmente, notaram-se a presença de delaminações entre os pontos de carga e o apoio na área de máxima tensão de cisalhamento interlaminar. Da mesma forma, foi observado que o material apresentava comportamento frágil. Na Figura 2.7, pode ser visualizada a imagem macroscópica de vista lateral da fratura por compressão transversal, sendo possível observar as bandas de torção, as zonas de delaminação e a quebra de camada.

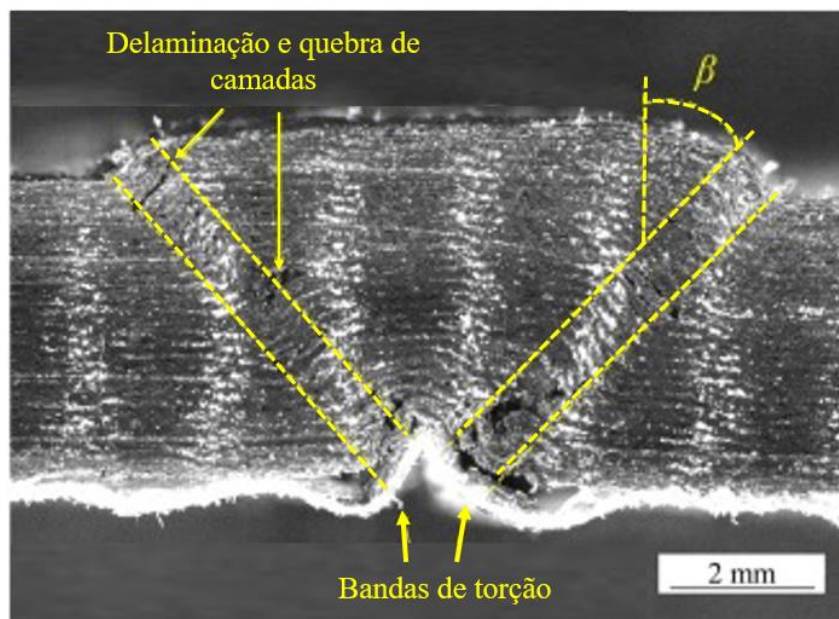


Figura 2.7- Imagem macroscópica (Iragi et al., 2019).

Kumar et al. (2022) analisaram as propriedades mecânicas (rugosidade e resistência à tração) de compósitos à base de ABS reforçado com 15% e 30% em peso de fibra curta de vidro (FCV) para uso na modelagem por deposição fundida, comparando-as com as propriedades mecânicas do ABS puro. Nos resultados obtidos, verificou-se um aumento de 57% na resistência à tração, para 30% em peso de fibra curta de vidro, em relação ao ABS puro. Também foi evidenciada diminuição de 40% na rugosidade da superfície, com a adição de 30% em peso de fibra curta de vidro. Igualmente, os resultados dados pelos corpos de prova feitos com 15% em peso de fibra curta de vidro apresentaram aumento na resistência à tração, mostrando, assim, que a adição de fibra curta de vidro na matriz de ABS melhora a resistência à tração.

Os autores atribuíram esse comportamento ao desempenho do reforço, o qual permite dissipar a maior parte da carga quando é submetida a esforços externos. Nesse sentido, a fibra curta de vidro possui alta resistência mecânica, e, dessa forma, espera-se que, ao ser depositada na matriz do ABS, melhore a resistência. A fibra curta de vidro tem alta temperatura de decomposição e uma excelente estabilidade química, sendo observado, ainda, que a ligação entre a FCV e o ABS foi adequada, revelando, igualmente, uma dispersão uniforme da FCV. Por fim, os autores não verificaram aglomerações na superfície dos corpos de prova e, ao mesmo tempo, não foram visualizadas fibras quebradas saindo da superfície ou presença significativa de poros.

Do mesmo modo, há interesse na incorporação de fibras naturais projetadas como reforço nos materiais compósitos e conseqüentemente fabricação de filamentos para uso na tecnologia de modelagem por deposição fundida (Yang & Yeh, 2020) (Bensalah et al., 2021). Esse interesse é gerado por diversos fatores, principalmente, por causa dos grandes desperdícios decorrentes da fabricação de produtos. A produção de filamentos com materiais biodegradáveis e o desenvolvimento de testes ecológicos e reciclados são estudos em andamento (Guen et al., 2019) (Cali et al., 2020). Os resíduos orgânicos mais utilizados são a madeira, a celulose e as fibras, e os filamentos podem ser empregados na modelagem por deposição fundida (FDM) e na fabricação de compósitos (Mazzanti et al., 2019). Além disso, os materiais compósitos reforçados com fibras naturais são atraentes devido ao seu baixo custo e baixo consumo de energia e também por serem ecologicamente corretos e apresentarem propriedades mecânicas específicas, entre outras vantagens (Chao et al., 2022).

Existem diversos estudos desenvolvidos para a obtenção desses materiais compósitos. Em um trabalho executado por Selvaraj et al. (2022), foram avaliadas as propriedades de tração e flexão de borracha natural reforçada com fibras de juta, como camadas de face, e borracha natural e cortiça como camadas de núcleo. Os resultados dos ensaios executados, para os compósitos reforçados com fibra de juta, apresentaram valor da resistência à tração de 54,98 MPa e um módulo de tração de 6,47 Gpa, e uma resistência à flexão de 51,09 MPa e módulo de flexão de 4,58 GPa.

É importante destacar que há outros materiais estudados, como no caso da fibra de linho. Em uma pesquisa desenvolvida por Betts et al. (2021), analisaram-se os resultados do ensaio de flexão pós-impacto de painéis-sanduiche com faces de polímeros reforçados com fibra de linho e núcleos de espuma de poliisocianurato. Os autores determinaram como parâmetros principais a espessura da face (uma, duas ou três camadas de tecido de linho), as densidades do núcleo, que foram de 32 Kg/m^3 , 64 Kg/m^3 ou 96 Kg/m^3 , além de três níveis de energia de impacto, os quais foram investigados (100% 75% e 50% de energia de falha).

Os resultados dos ensaios de flexão pós-impacto também foram comparados aos de flexão de três pontos dos corpos de prova intactos. De acordo com os resultados, os autores concluíram que a adição de fibra de linho como reforço nas faces poliméricas não teve efeito negativo em sua resistência à flexão e rigidez. Nesse sentido, os corpos de prova testados em níveis de energia mais altos (75% e 100% da energia resistida por corpos de prova intactos) exibiram leve aumento na resistência após o impacto. Por outro lado, em um estudo realizado

por Rodriguez *et al.* (2020), observou-se que a adição de $8\pm 1\%$ de fibras de madeira na matriz de PLA, para uso na manufatura aditiva, tem efeito prejudicial no desempenho à fadiga. Nesse sentido, os autores, por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura, verificaram que as fibras de madeira reduzem a adesão entre as fibras e aumentam os vazios entre elas. Isso porque os vazios que são produzidos atuam como pontos concentradores de tensão, reduzindo a eficiência da matriz; porém, evitam a geração de falhas nos planos perpendiculares à tensão aplicada. Dessa forma, as fibras de madeira aumentam o comportamento dúctil do PLA.

Igualmente, em um estudo efetuado por Morales *et al.* (2021), a adição de casca de arroz entre 5% a 10% em peso, na matriz de polipropileno reciclado, apresentou uma resistência à tração inferior à do polipropileno reciclado puro quando foi avaliada uma orientação de impressão de 0° . A resistência à tração, para o polipropileno puro, foi de 25,02 MPa, e os valores da resistência à tração, para a adição de fibra de carbono com 5% e 10% em peso, foram de 13,62 MPa e 13,78 MPa, respectivamente.

Segundo os autores, a adição da casca de arroz na matriz polimérica diminui significativamente a ligação entre as camadas. Nesse sentido, quando se usou uma orientação de impressão de 0° , os resultados do ensaio de tração mostraram que o polipropileno apresentava maiores rigidez e tenacidade. Por outro lado, os resultados do ensaio de tração, para um ângulo de impressão de 90° , com adição de casca de arroz com 5% em peso (7,92 MPa), revelaram maior rigidez e maior capacidade de absorção de energia que os do polipropileno (4,33 MPa) puro e da adição de casca de arroz com 10% em peso (5,66 MPa).

Diante das análises efetuadas, os autores concluíram que as propriedades mecânicas dos compósitos de polipropileno e casca de arroz foram inferiores às do polipropileno puro, pois a adição de casca de arroz diminui a deformação produzida durante o processo de impressão. A densidade do compósito diminui à medida que o peso da casca de arroz aumenta, devido à baixa densidade desta. Esses mesmos autores verificaram, mediante análise térmica, que os compósitos de polipropileno e casca de arroz eram degradados de forma mais rápida que os de polipropileno puro, por causa dos componentes lignocelulósicos da casca de arroz. Por outro lado, foi mostrado que a cristalinidade aumenta com a adição da casca de arroz, entre 5% e 10% em peso, pois os compósitos atuam como sítios de nucleação.

Finalmente, pode-se destacar, que a adição de reforços nos filamentos de FDM surgem como opção para melhorar as propriedades mecânicas das peças produzidas. Segundo a literatura, pode-se afirmar que o material mais utilizado como reforço na manufatura aditiva é

a fibra de carbono, devido à sua excelente resistência à fadiga mecânica e corrosão, absorção de impacto, resistência térmica, estabilidade dimensional e boa resistência elétrica (Bastos et al., 2018) (Bastos et al., 2018) (Zhao et al., 2018). Além disso, partículas de materiais metálicos e resíduos orgânicos, como madeira e casca de arroz, também surgem como possíveis reforços em matrizes poliméricas (Guen et al., 2019) (Yang & Yeh, 2020).

2.4 Influência dos parâmetros do processo FDM no comportamento mecânico

A influência dos parâmetros de impressão e das características do material das peças manufaturadas pela FDM tem impacto significativo no comportamento mecânico das peças impressas (Wang et al., 2020). Por sua vez, diversos aspectos interferem no comportamento mecânico dos materiais poliméricos processados pela tecnologia FDM (Vanaei et al., 2020).

Diversos autores têm mostrado que os corpos de prova manufaturados de materiais poliméricos por processos convencionais apresentam desempenho superior mecânico quanto à fadiga mecânica, em comparação com corpos de prova de materiais manufaturados pela tecnologia FDM (modelagem por deposição fundida) (Shanmugam et al., 2021). Conforme diversos estudos, a densidade de preenchimento é um dos elementos que afetam a estrutura da peça, fazendo com que diminuam as propriedades mecânicas (Khawaja et al., 2020). Outros dois fatores mencionados são a diferença da compacidade e da porosidade, devido aos grãos presentes na estrutura da peça (Wang et al., 2019).

Em um estudo realizado por Elmrabet et al. (2020) (Elmrabet & Siegkas, 2020), avaliaram-se a resistência à tração e a resistência à compressão dos corpos de prova manufaturados pela manufatura aditiva de materiais de PLA (ácido polilático) e TPU (poliuretano termoplástico). Foi analisada a influência da porcentagem de preenchimento de 20%, 60% e 100%, e os autores concluíram que as porcentagens de preenchimento avaliadas podem afetar significativamente o desempenho mecânico dos objetos manufaturados em 3D, podendo causar heterogeneidade entre as áreas de seção transversal da mesma peça. Segundo os autores os corpos de prova com porcentagem de preenchimento de 100% apresentaram os maiores valores na resistência à compressão, o que mostra que as cavidades e os vazios nos corpos de prova com menor porcentagem de preenchimento têm efeito significativo.

Da mesma forma, em um estudo efetuado por Harshit et al. (2020), analisou-se a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades de tração, observando-se, principalmente, a orientação de impressão (0° , 45° e 90°), a espessura da camada ($110 \mu\text{m}$, 200

μm e $300 \mu\text{m}$) e a largura do ângulo de raster ($500 \mu\text{m}$, $600 \mu\text{m}$ e $700 \mu\text{m}$) de corpos de prova manufaturados de PLA com resina mediante a técnica FDM. Uma análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para se estudar vários modos de falha. Nos resultados, a resistência à tração final média obtida foi de $52,65 \text{ MPa}$, sendo este um valor comparável com peças impressas em 3D com diferentes tipos de filamento de PLA disponíveis comercialmente e também com corpos de prova de PLA moldados por injeção (Harshit et al., 2020).

Segundo os autores, a orientação de impressão tem máxima influência na resistência à tração, seguido da espessura da camada. A resistência máxima à tração foi obtida para o corpo de prova impresso com uma orientação de impressão de 0° , apresentando, também, fratura frágil e alta rigidez (Figura 2.8a). Além disso, a resistência à tração diminui à medida que a orientação de impressão aumenta de 0° para 45° e 90° , e a resistência à tração eleva com o incremento da espessura da camada, sendo máxima para o corpo de prova manufaturado com espessura de camada de $300 \mu\text{m}$. A resistência à tração máxima foi observada para o corpo de prova construído com largura de raster de $500 \mu\text{m}$, notando-se, ainda, uma redução na resistência à tração (Figura 2.8).

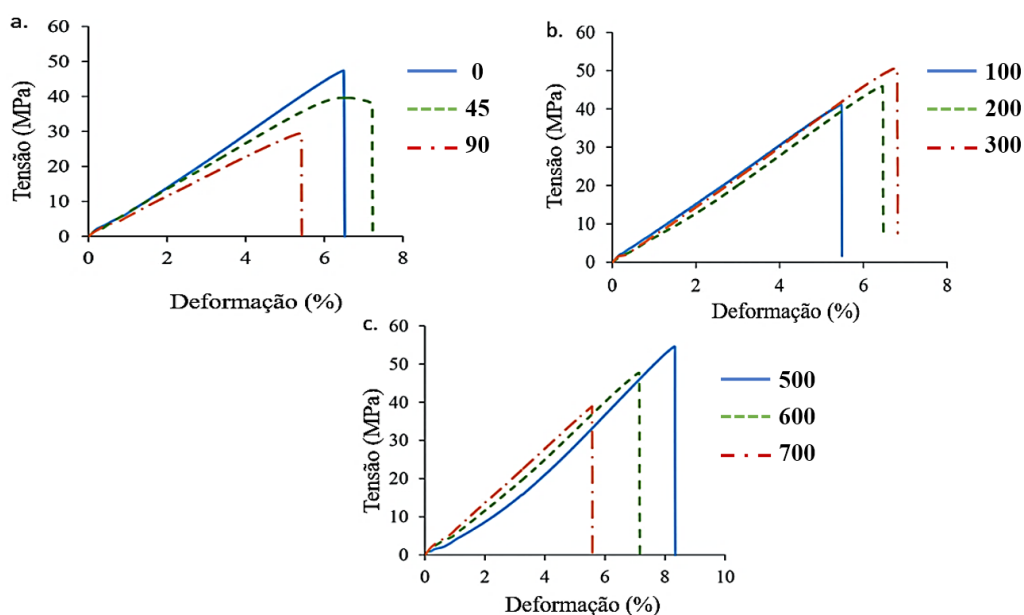


Figura 2.8- a. Curva tensão-deformação em relação à orientação de impressão (espessura da camada- $200 \mu\text{m}$, largura do raster $500 \mu\text{m}$) b. Curva tensão-deformação em relação à espessura da camada. (Orientação de impressão - 0° , largura do raster - $500 \mu\text{m}$) e c. Curva tensão-deformação em relação à largura do raster. (Orientação de impressão - 0° , espessura da camada - $300 \mu\text{m}$) (Harshit et al., 2020).

Iyer et al. (2022) analisaram o efeito da orientação de impressão no comportamento mecânico. Segundo os autores, a tecnologia de fabricação de filamentos fundidos (FFF) apresenta porosidade entre as camadas, reduzindo as propriedades mecânicas. Foi avaliado o comportamento mecânico mediante a realização de ensaios de tração e flexão de corpos de prova manufaturados de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) reforçados com 15% em volume de fibras de carbono curtas. Os autores também analisaram a influência da orientação de impressão com ângulos de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°. A resistência à tração diminuiu 22%, de 31,2 MPa para 24,6 MPa, assim como o módulo de elasticidade, que foi de 35%, resultando em 4,6 GPa para 3,0 GPa quando o ângulo de 0° foi mudado para 15°.

A resistência à flexão evidenciou uma redução de 15%, e o módulo de flexão, 17%, quando a orientação de impressão foi mudada de 0° para 15°. Finalmente, a resistência à fratura teve uma queda de 19% com a mudança do ângulo de 0° para 15°, e a tenacidade aumentou no ângulo de 60°. Na Figura 2.9, podem ser observados os valores obtidos da resistência à tração, do módulo de elasticidade, da resistência à flexão, do módulo de flexão e da tenacidade à fratura, Modo I, dos corpos de prova manufaturados de ABS reforçados com fibra de carbono, de acordo com a variação da orientação de impressão (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°).

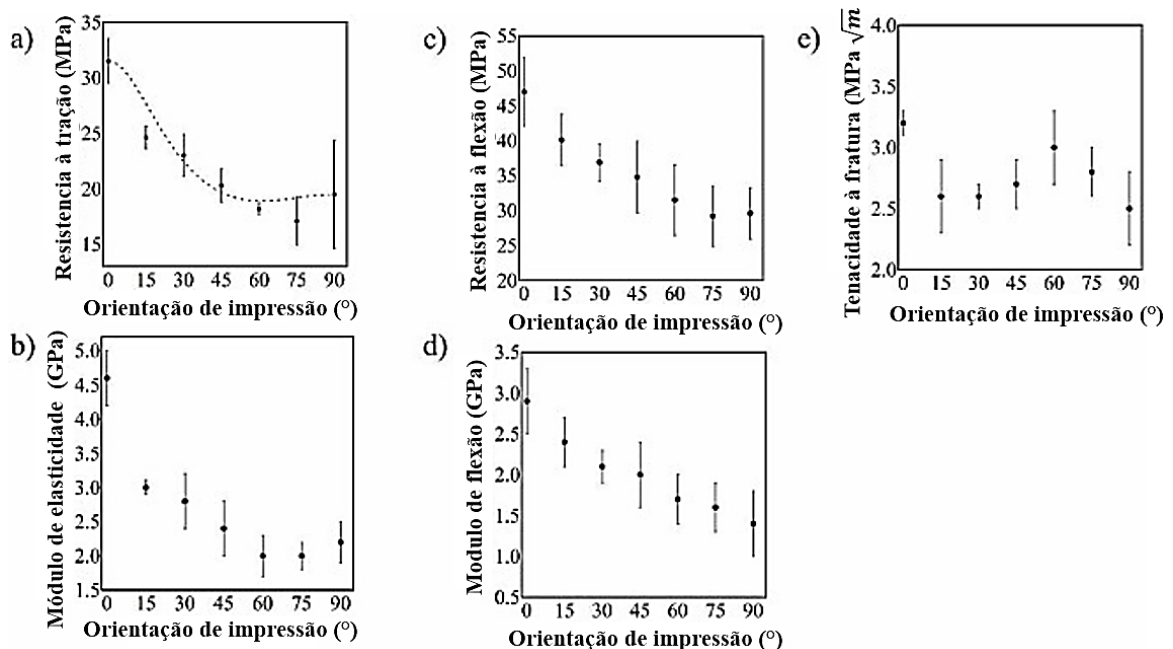


Figura 2.9- Variação das propriedades mecânicas com à orientação de impressão a) resistência à tração, b) módulo de elasticidade, c) resistência à flexão, d) módulo de flexão e e) tenacidade à fratura Modo I (Iyer & Keles, 2022).

Ahmed et al. (2021) fabricaram um compósito usando ABS e PLA reforçado com fibra de carbono (10% de carbono em massa e 6% de carbono em volume), no qual foi estudada a influência dos parâmetros de impressão, tais como velocidade de impressão, altura da camada e densidade de preenchimento, no comportamento mecânico, no ensaio de tração. Os materiais empregados foram colocados um sobre o outro, variando a porcentagem de material por volume (50% PLA/FC - 50% ABS, 63% PLA/FC - 37% ABS e 75% PLA/FC - 25% ABS), sendo denominados compósitos híbridos (compósito-H).

Desse modo, os valores máximos do módulo de elasticidade (22204,45 MPa) foram determinados para os corpos de prova manufaturados com velocidade de impressão de 80 mm/s, altura da camada de 0,10 mm, porcentagem de preenchimento de 60% e porcentagem de material por volume de 75% PLA/FC - 25% ABS. No caso da porcentagem de deformação, os valores mais altos foram dados para os corpos de prova manufaturados com velocidade de impressão de 80 mm/s, altura da camada de 0,10 mm, porcentagem de preenchimento de 100% e porcentagem de material por volume de 50% PLA/FC - 50% ABS. Os resultados dos valores máximos no ensaio de tração foram obtidos para os corpos de prova manufaturados com velocidade de impressão de 20 mm/s, altura de camada de 0,10 mm, porcentagem de preenchimento de 100% e porcentagem de material por volume de 75% PLA/FC - 25% ABS.

Conforme descrito pelos autores, por exemplo, os corpos de prova com uma porcentagem de preenchimento de 60% mostraram uma falha com delaminação no PLA/FC-ABS, seguida da ruptura do ABS. Este comportamento é devido ao fato de que, quando são usadas baixas porcentagens de preenchimento, os corpos de prova podem apresentar alta porosidade, gerando espaços de ar entre as camadas depositadas. Conseqüentemente, a ligação na interface diminui, aumentando a delaminação interfacial durante a aplicação da carga. Igualmente, o PLA/FC é frágil por natureza, não se quebrando em baixas tensões, enquanto o ABS é dúctil e tem maior capacidade para suportar maiores tensões. Essa discrepância nos materiais pode causar deslizamento na interface.

Em outro estudo, realizado por Algarni (2021), além de ser analisado o efeito da orientação de impressão de 0°, 45° e 90°, observou-se a influência da porcentagem de umidade (1%, 5% e 10%) na resistência à tração, tensão na fratura e o módulo de elasticidade do material PLA manufaturado por meio da técnica FDM. Os corpos de prova com 1% de umidade foram desumidificados em um secador elétrico em bobina, a 45°C, por 5 horas, e os corpos de prova com 5% e 10% de umidade foram desumidificados na mesma temperatura, por 3 horas e 1 hora,

respectivamente. A resistência à tração aumentou 36% para a orientação de impressão de 0°, na orientação de impressão de 90°, diminuiu 24,4% quando o teor de umidade reduziu de 10% para 1%. O maior valor de tensão na fratura foi dado pelos corpos de prova manufaturados com uma orientação de impressão de 90°C e 10% de umidade, aumentando 28% com a reorientação de 0° para 90°. Igualmente, o módulo de elasticidade aumentou 18% com a reorientação de 0° para 90° (Abeykoon et al., 2020)

Abeykoon et al. (2020) estudaram a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas do material PLA. Para isso, foram realizados ensaios de tração, flexão e compressão. Executaram-se análises por calorimetria de varredura diferencial (DSC), termogravimétrica (TGA), imagem térmica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os corpos de prova foram manufaturados variando-se o tipo de preenchimento, a porcentagem de preenchimento (25%, 30%, 40%, 50%, 70%, 90% e 100%), a velocidade de preenchimento (0 mm/s, 80 mm/s, 90 mm/s, 100 mm/s e 110 mm/s) e cinco tipos de materiais depositados (PLA puro, PLA reforçado com fibra de carbono, ABS puro, ABS reforçado com fibra de carbono e ABS reforçado com nanotubos de carbono).

Os resultados mostraram que as alterações na porcentagem de preenchimento modificam as estruturas das peças manufaturadas. Nesse sentido, o módulo de elasticidade, no ensaio de tração dos corpos prova manufaturados com porcentagem de preenchimento de 100%, obteve um valor de 1538,05 MPa, e os corpos de prova com porcentagem de preenchimento de 25%, de 861,78 MPa. Segundos os autores, a porosidade reduz com o aumento na porcentagem de preenchimento; portanto, a resistência da ligação mecânica entre as camadas também aumenta. Em relação à velocidade de impressão, o maior módulo de elasticidade no ensaio de tração foi de 1538,05 MPa, para uma velocidade de impressão de 90 mm/s. Diante disso, os autores afirmam que velocidades superiores a 90 mm/s podem influenciar a fusão do material, pois os materiais poliméricos não são bons condutores térmicos e, portanto, geram uma adesão inadequada entre as camadas, diminuindo a resistência. Para velocidades de impressão altas, o material pode não se degradar a uma taxa adequada e, da mesma forma, não realizar a ligação apropriada entre as camadas.

Entre os tipos de preenchimento estudados, o formato linear apresentou o maior módulo de elasticidade no ensaio de tração (990,5 MPa). Segundo os autores, o formato de deposição linear proporciona um melhor arranjo de camadas e um menor número de vazios. Dos materiais avaliados, o PLA reforçado com fibra de carbono (PLA-FC) foi o que obteve maiores valores

no módulo de elasticidade, nos ensaios de tração, compressão e flexão em três pontos. Na superfície de fratura do (PLA-FC) e do (ABS-FC), o ABS-FC revelou um nível mais alto de porosidade, enquanto ambos apresentaram superfícies mais ásperas que a dos materiais puros.

Em um trabalho efetuado por Rosli *et al.* (2021), o objetivo foi comparar o efeito da altura da camada na rugosidade superficial, na resistência e na porosidade em corpos de prova manufacturados de PLA puro e PLA reforçado com pó metálico de alumínio. O estudo mostrou que, embora o compósito de PLA com reforço de partículas de alumínio forneça a aparência de metal na peça, os corpos de prova de PLA puro evidenciaram maior resistência à tração que os compósitos PLA-Al (Tabela 2.3).

No mesmo estudo, verificou-se, também, que a porosidade era proporcional ao número de camadas (Figura 2.10), mas diminuía a resistência dos corpos de prova manufacturados (Tabela 2.3). Segundo os autores, a presença do alumínio tem impacto na redução da porcentagem de porosidade, porém não aumenta sua resistência, devido à diferença nas características elásticas do PLA e do Al, ocasionando adesão interfacial inadequada e compactação e ligação intercamada deficientes, fazendo com que a resistência mecânica seja reduzida para o compósito PLA-Al.

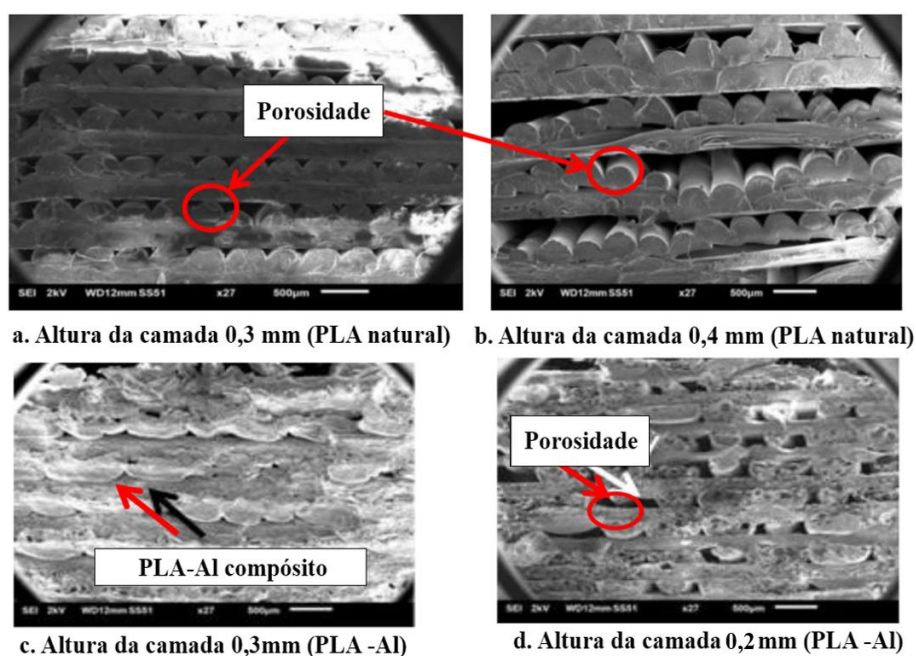


Figura 2.10- a. Microestrutura dos materiais PLA e do PLA-Al. a. Altura da camada 0,3 mm (PLA natural) b. Altura da camada 0,4 mm (PLA natural) c. Altura da camada 0,3 mm (PLA - Al) d. Altura da camada 0,2 mm (PLA - Al) (Rosli et al., 2021).

Tabela 2.3- Resistência à tração média e rugosidade dos corpos de prova de PLA natural e composto PLA-Al (Rosli et al., 2021).

Altura de camada (mm)	Resistência à tração média (MPa)		Valor de Rugosidade media Ra (μm)	
	PLA natural	Compósito PLA-Al	PLA natural	Compósito PLA-Al
0,1	33,91	25,15	2,56	4,93
0,2	46,34	26,34	2,69	5,3
0,3	42,79	28,91	3,28	5,69
0,4	35,21	25,61	3,81	5,79

Conforme já mencionado, pode-se afirmar que as propriedades no ensaio de tração são significativamente afetadas pelos parâmetros de impressão, como densidade de preenchimento, número de camadas, orientação de impressão, velocidade de impressão, entre outros (Wang et al., 2021). Nos trabalhos descritos anteriormente, o material de reforço utilizado foi o alumínio, porém existem diversos outros que também são usados como reforço, como no caso de um trabalho realizado por Camargo et al. (2019), no qual se analisaram as propriedades da resistência à tração, resistência à flexão e energia de impacto de peças impressas por FDM usando material compósito de PLA com reforço de grafeno.

No estudo, foram analisados parâmetros de impressão como o preenchimento e a espessura da camada, sendo que as peças foram manufaturadas com orientação de impressão no plano e padrão de preenchimento *honeycomb* completo. Nos resultados do trabalho, mostrou-se que a resistência à tração foi afetada pelo preenchimento e a espessura da camada. Além disso, o valor máximo da resistência à tração foi de 33,7 MPa, para uma espessura da camada de 0,27 mm e de preenchimento de 78%. Pôde-se concluir, ainda, que a resistência à tração aumenta à medida que a espessura da camada e do preenchimento aumenta.

A resistência à flexão foi influenciada significativamente pelo preenchimento e a espessura da camada, mostrando maior resistência à flexão para os parâmetros de espessura da camada de 0,27 mm e preenchimento de 78%, com um valor de 60,9 MPa. A resistência à tração e a resistência à flexão são proporcionais à espessura da camada e do preenchimento. A maior energia de impacto foi observada para os parâmetros de espessura de camada 0,20 mm e preenchimento de 50%, com um valor de 70,9 J/m. Os ensaios mostraram que a energia de impacto inicial diminuiu à medida que a espessura da camada e o preenchimento aumentam.

Segundo Hanon et al. (2021), a deposição de polímero fundido faz com que as peças fabricadas possuam um comportamento anisotrópico, devido ao qual é necessário estudar a peça com diferentes configurações (orientação de impressão e padrão de preenchimento). Os autores analisaram a resistência à tração dos materiais de ácido polilático (PLA) e PLA de alta temperatura (PLA-AT). Além disso, foram analisados parâmetros de impressão, tais como a orientação de impressão e a porcentagem de preenchimento. Os autores concluíram que os corpos de prova com 50% de preenchimento revelaram os menores valores na resistência à tração, e, entre os materiais estudados, os corpos de prova manufaturados de PLA-AT, com uma orientação de impressão de 45°/-45° e 100% de preenchimento, obtiveram a maior resistência à tração (59,7 MPa).

Aloyaydi et al. (2019) mostraram que a capacidade de absorção de energia de um corpo de prova impresso em 3D melhora significativamente à medida que a porcentagem de preenchimento aumenta, mediante a realização de um ensaio de flexão. De acordo com os autores, esse comportamento pode ser atribuído ao aumento na ligação entre as camadas que se cruzam, gerando uma redução dos vazios e fazendo com que uma maior energia seja dissipada pela estrutura impressa. No estudo, foi observado que a resistência à flexão do corpo de prova manufaturado com 100% de preenchimento aumentou aproximadamente 10 vezes em comparação com o corpo de 40% de preenchimento (figura 2.11).

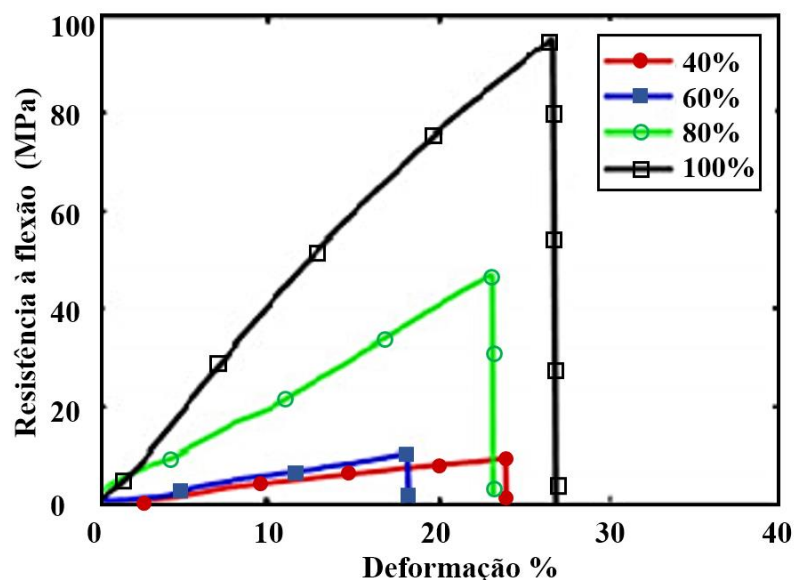


Figura 2.11- Curva de tensão - deformação em relação ao porcentagem de preenchimento – Ensaio de flexão (Aloyaydi et al., 2019).

2.5 Técnicas de pós-processamento de FDM

Conforme mencionado, os materiais são submetidos a gradientes de temperaturas, ocasionando modificações em sua estrutura quando são manufaturados mediante a técnica de modelagem por deposição fundida (Lee & Liu, 2019). No caso de materiais compósitos, pode-se gerar uma ligação fraca entre a matriz e o reforço, podendo fazer com que as propriedades mecânicas diminuam com o reforço quando se apresenta uma adesão inadequada. Nesse sentido, podem ser aplicados vários tratamentos ou métodos que permitam melhorar, principalmente, a adesão tanto entre as camadas impressas de material puro quanto entre a matriz e o material de reforço. Para isso, são aplicados tratamentos químicos e térmicos, processo de resfriamento, modificação nos parâmetros de impressão, entre outros (Avila et al., 2019).

Wang et al. (2021) investigaram os efeitos do tratamento térmico para materiais compósitos reforçados com fibra de carbono contínua manufaturados por FDM. A cristalinidade, a porosidade e a estabilidade dimensional do material foram discutidas, assim como a poliamida (PA6) reforçada com fibras curtas de carbono e fibras de carbono contínuas foi analisada. Os corpos de prova manufaturados foram submetidos a temperaturas de 50°C a 200 °C, com tempos de 30 minutos até 8 horas, resfriados em temperatura ambiente, e aqueles sem tratamento foram depositados numa caixa de secagem antes da caracterização.

Os autores determinaram que a condição de tratamento térmico que apresentou melhor desempenho mecânico e estabilidade dimensional foi observada para uma temperatura de 100°C, com 8 horas. O aumento nas propriedades mecânicas deveu-se à diminuição da porosidade, melhorando a ligação da interface e fazendo com que o início da fissura, durante o ensaio de flexão, pudesse ser retardado após o tratamento térmico de 100°C. Mesmo assim, os mecanismos de falha gerados entre as camadas da matriz diminuíram, e a adesão entre a matriz e as fibras foi melhorada pelo tratamento térmico. Porém, verificou-se que, com o aumento de temperatura, o desempenho mecânico reduziu nos corpos de prova submetidos a uma temperatura de 200°C, devido à formação de grandes poros entre as interfaces.

Guduru et al. (2020) analisaram a influência dos parâmetros de pós-processamento nas propriedades mecânicas do compósito de PLA reforçado com fibra de carbono (15%). No estudo, foram estabelecidos parâmetros de impressão 3D de 0,2 mm de espessura de camada,

orientação de impressão de 90° e temperatura de impressão de 220°C, aplicando-se duas técnicas de pós-tratamento (tratamento químico e tratamento térmico).

No tratamento químico, os corpos de prova foram imersos totalmente em uma concentração de 100% de acetona durante os tempos de 60, 100, 120, 180 e 220 segundos. Os autores concluíram que a natureza ácida da acetona faz com que as moléculas se aproximem, reorganizando as camadas e fechando os vazios, fortalecendo, assim, o material. Por outro lado, sabe-se que o material imerso em um tempo de 220 segundos começa a se degradar.

O tratamento térmico foi aplicado nos corpos de prova aquecidos a 80°C, 100°C, 120°C, 140°C e 160°C, com tempos de 60, 100, 120, 140 e 180 segundos. No entanto, foi observado que os corpos de prova aquecidos a 160°C, por 180 e 220 segundos, começaram a se contrair. Além disso, mostrou-se que a resistência à tração obteve melhores resultados no pós-processamento, aumentando de 45 MPa, para os corpos de prova de PLA puro, sem tratamento, para 80 MPa, no caso do tratamento químico, e de 74 MPa, para o tratamento térmico (Guduru & Srinivasu, 2020).

Por outro lado, a deformação gerada nas peças manufaturadas com o uso da técnica FDM continua sendo um grande problema para a aplicação industrial, principalmente em peças feitas de compósitos reforçados com fibras ou partículas (González et al., 2021). Em um estudo realizado por Yu et al. (2020), foi determinado que o aquecimento auxiliar e o ângulo de deposição na técnica de modelagem por deposição fundida são parâmetros dominantes nas propriedades de tração e deformação das peças. No estudo, uma placa auxiliar de aquecimento foi desenvolvida e montada no cabeçote da impressora 3D com técnica FDM, a fim de suprimir a deformação das peças feitas de compósitos de ABS reforçado com fibra de carbono.

A resistência à tração melhorou 31%, e a ductilidade, 439%, em comparação com a peça fabricada sem aquecimento auxiliar. Do mesmo modo, a fadiga cíclica e a anisotropia da peça impressa foram significativamente melhoradas, ressaltando-se que a temperatura de aquecimento auxiliar deve estar entre a temperatura de transição vítrea e a de degradação da matriz de ABS. Se a temperatura de aquecimento auxiliar excede a de degradação, a resistência à tração e a ductilidade diminuem (Yu et al., 2020).

Khosravani et al. (2020) estudaram o comportamento mecânico de corpos de prova manufaturados com materiais de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e acrilonitrila estireno acrilato (ASA), sendo que os corpos de prova foram desenhados com duas estruturas (hexagonal

e triangular). Levando-se em consideração que as peças podem experimentar diferentes temperaturas de tempo de serviço, foram analisados os efeitos térmicos nos quais os corpos de prova demonstraram envelhecimento térmico acelerado, passando de 22° C para 60° C. Os comportamentos de falha dos corpos de prova, com e sem tratamento térmico, foram avaliados com a execução de um teste de flexão de três pontos.

A maior resistência à flexão foi verificada para o material ASA com tratamento térmico, sendo 15% maior que a dos corpos de prova sem tratamento térmico. O núcleo com estrutura hexagonal mostrou maior capacidade de carga para os dois materiais, com e sem tratamento térmico. O tratamento térmico em temperaturas inferiores da transição vítrea do material aumentou a resistência máxima nos dois materiais - com estruturas hexagonal e triangular. Os autores atribuíram esse comportamento ao endurecimento produzido nas ligações entre as camadas durante o tratamento térmico.

Com a finalidade de reduzir vazios e melhorar a adesão entre as camadas, em um estudo realizado por Ueda et al. (2020), descreve-se a técnica de manufatura aditiva por compactação tridimensional de um filamento de poliamida reforçado com fibra de carbono contínua. O desenvolvimento da técnica consistiu na adequação de um rolo de compactação a quente em uma impressora 3D (FFF). A função do rolo foi pressionar o filamento contra a base da impressora imediatamente após a impressão.

Os vazios no espécime foram visualizados por microscopia eletrônica de varredura e tomografia computadorizada de raios-X. Os corpos de prova foram manufaturados, e as propriedades de tração e flexão, investigadas. Também se observou menor quantidade de vazios nos corpos de prova manufaturados por meio da técnica de compactação a quente, sendo que, ao contrário, nos corpos de prova produzidos sem a implementação da técnica, visualizou-se um grande número de vazios destruídos, de acordo com a orientação de impressão.

Foi possível notar uma melhoria de, aproximadamente, 26% no módulo de flexão, e, na resistência à flexão, 65%, em relação aos corpos de prova manufaturados pela tecnologia FFF convencional. Igualmente, a resistência à tração dos corpos de prova manufaturados por meio da técnica de compactação a quente foi aproximadamente 33% maior que a dos corpos de prova obtidos sem a técnica de compactação.

2.6 Microestruturas de materiais usados no processo FDM

A análise da microestrutura permite avaliar a interação entre os materiais de reforço e a matriz, a fim de serem compreendidos os resultados dos ensaios mecânicos. Dessa forma, em uma análise microestrutural, contemplando por exemplo, a orientação das fibras ao longo da direção de impressão, a presença de vazios entre as camadas e de espaços de ar e a redução do tamanho das fibras de reforço podem permitir a constatação de problemas de adesividade, descontinuidade, tipo de fratura, presença de vazios, entre outros. Para isto, pode ser usados análise eletrônica de varredura, a microtomografia computadorizada, entre outras (Somireddy et al., 2020).

Conforme mencionado anteriormente, os microvazios são gerados, principalmente, pela evaporação de contaminantes em temperaturas elevadas, durante o processo de cura, e pelo aprisionamento de ar em resinas altamente viscosas. Existem vazios interfibras, os quais são causados pela resina altamente viscosa que não flui entre as fibras e vazios de matriz. Experimentalmente, tem-se demonstrado que os microvazios têm efeito negativo no comportamento mecânico dos compósitos (Hyde et al., 2020).

Dessa forma, existem diversos estudos que mostram, por meio da análise estrutural, os efeitos da adesão de materiais de reforço nas propriedades mecânicas. Em uma pesquisa realizada por Mohammadzadeh *et al.* (2019), foram analisadas as propriedades mecânicas e estruturais de corpos de prova manufaturados com fibra de carbono (FC), fibra de vidro (FV) e fibra de aramida (FA) como material de reforço em uma matriz de poliamida (PA6).

Para a análise das microestruturas, utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura, verificando-se o mecanismo de fratura, a morfologia e a resolução da impressão. A análise microestrutural, realizada após os ensaios de tração, mostrou que os principais mecanismos de fratura foram a quebra, a descolagem e o arrancamento da fibra em todos os corpos de prova analisados (Figura 2.12). Segundo a conclusão dos autores, os modos de falhas apresentados nas estruturas dos corpos de prova podem ser gerados pelos vazios produzidos durante o processo de impressão 3D, os quais podem provocar nucleação e crescimento de trincas.

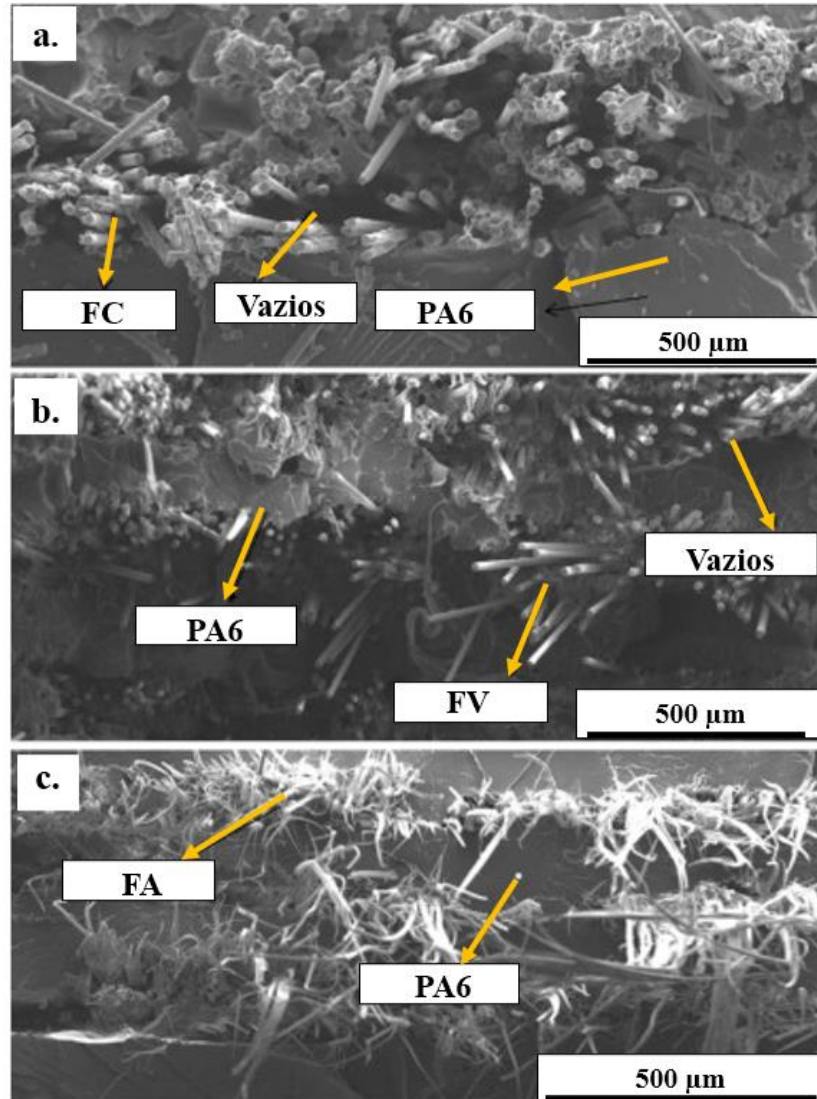


Figura 2.12- Imagens MEV. a. PA6 - FC b. PA6-FV e c. PA6- FA (Mohammadizadeh et al., 2019).

Sabe-se que um dos parâmetros que mais influenciam no comportamento mecânico das peças manufaturadas pela modelagem por deposição fundida é a orientação de impressão, pois as fibras são distribuídas de acordo com a orientação de deposição do processo, que deve ser analisado microestruturalmente, com a finalidade de identificar as fraturas e defeitos gerados na interface e nas superfícies externas das peças manufaturadas. Assim, em um estudo desenvolvido por Naveed, M (2020), analisaram-se diferentes orientações de impressão (0° , 30° , 60° e 90°) em peças fabricadas com PLA.

De acordo com as imagens obtidas pelo MEV, os corpos de prova com orientações de impressão de 0° , 30° e 60° mostraram maiores aberturas e trincas na face externa. Já os corpos de prova manufaturados com um ângulo de 60° revelaram-se mais propensos a se deformar

pelas tensões, as quais geraram grandes trincas e aberturas entre as camadas, em comparação com os ângulos de 0° e 30°.

Conforme descrito pelos autores, a capacidade do material para recuperar completamente sua forma ou dimensão original torna-se mais difícil quando ocorre a fusão com um ângulo de 60°. Além disso, no processo de impressão 3D, o rápido ciclo de aquecimento e resfriamento do material causa gradiente térmico não uniforme, gerando tensões térmicas no material e causando deformações ou trincas.

Por outro lado, os corpos de prova manufaturados com orientações de impressão de 45° e 90° apresentaram superfície externa com maior compactação, fornecendo melhor acabamento superficial e, conseqüentemente, melhores valores na resistência à tração. Porém, nas observações das imagens obtidas pelo MEV da interface de fratura, para todos as orientações de impressão em estudo, foi visualizada a presença de ar e de vazios entre as camadas ao longo da espessura dos corpos de prova.

Em um trabalho realizado por Pei *et al.* (2021), foi investigado o efeito microestrutural da adição de 20% em peso de fibra de carbono curta na poliamida para uso na manufatura aditiva. No estudo, analisaram-se a fração de volume de fibra, a fração de volume dos vazios e as distribuições espaciais. Na Figura 2.13a, podem ser observados os vazios presentes na estrutura, com cores escuras, e as fibras, com cores mais claras, sendo que a cor cinza representa a poliamida. É possível visualizar que algumas regiões da Figura 2.8c apresentam maior presença de vazios que aquelas mostradas na Figura 2.13b.

De acordo com o observado na microestrutura, os corpos de prova manufaturados com velocidade de impressão de 20 mm/s e altura de camada de 0,2 mm evidenciaram menos vazios que aqueles manufaturados com velocidade de 60 mm/s, altura de camada de 0,3 mm e umidade maior. Sabe-se que, para uma altura de camada de 0,2 mm, pode-se produzir uma maior pressão entre o bico de impressão e a camada depositada, proporcionando melhor adesão e diminuindo os vazios.

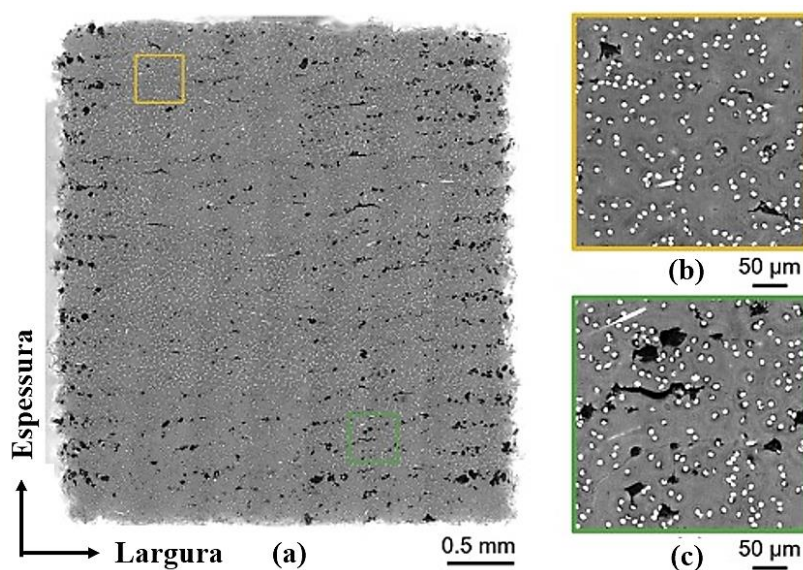


Figura 2.13- Microestrutura largura-espessura representativa dos corpos de prova manufacturados com baixo teor de umidade, temperatura de impressão de 270°C, velocidade de impressão de 20 mm/s e altura de camada de 2 mm. (a) microestrutura largura-espessura geral, microestrutura regional tem (b) menor fração de volume de vazios e (c) maior fração de volume de vazios (Pei et al., 2021)

Segundo os autores supracitados, a presença de umidade nos corpos de prova faz com que as moléculas de água substituam as ligações do hidrogênio na fase amorfa, separando as cadeias poliméricas, reduzindo a temperatura de transição vítrea e, em consequência, reduzindo a viscosidade do polímero. Além disso, diminuem, também, a pressão da matriz polimérica e, assim, a pressão dentro da água evaporada aumenta e se expande, formando vazios à medida que se produz o resfriamento na extrusão. No caso dos corpos de prova manufacturados com velocidade de impressão de 60 mm/s, estes não conseguem se resfriar antes da deposição da outra camada, produzindo vazios na estrutura. Por fim, os corpos de prova manufacturados com a temperatura mais alta (270°C) aumentam a taxa de reação para a polimerização em estado sólido induzida termicamente, resultando em uma maior quantidade de vazios.

Liao *et al.* (2021) estudaram a influência dos parâmetros de impressão de corpos de prova de poliamida 66 (PA 66) para uso na FDM, mediante análise das microestruturas e da cristalinidade dos corpos de prova manufacturados. Os resultados da avaliação de calorimetria diferencial de barrido dos corpos de prova manufacturados de PA 66 identificaram uma recristalização e fusão a 232°C e 265°C, respectivamente. Desse modo, os autores determinaram que, a 300°C, a PA 66 começa a se degradar. Da mesma maneira, foi analisado

que o material depositado não solidifica em temperaturas de plataforma maiores que 230°C, sendo a temperatura da base um parâmetro crítico no processo de manufatura do corpo de prova, pois afeta o desempenho da ligação entre a peça e a base de construção. Assim, conforme os autores, uma alta cristalinidade resulta de uma alta contração da peça manufaturada, induzindo a grandes deformações.

Na Figura 2.14, pode ser visualizada a morfologia da estrutura das peças impressas com temperaturas mais baixas, apresentando grandes lacunas e espaços nas microestruturas internas, indicando que o material não foi depositado adequadamente durante o processo de fabricação. Nota-se que os vazios tenderam a desaparecer para uma temperatura do bico de 290°C com uma temperatura da plataforma de 225°C. Entretanto, uma vez que a temperatura atinge um determinado valor-limite superior de temperatura, as propriedades mecânicas são comprometidas devido à degradação do material.

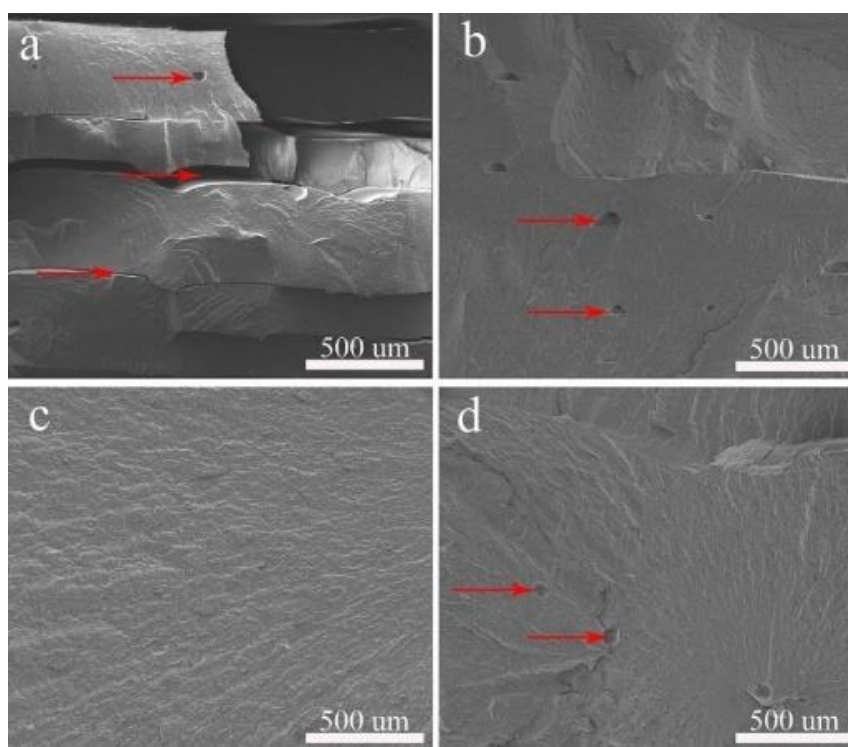


Figura 2.14- Microtopografia das superfícies de fratura dos corpos de prova manufaturados com orientação de impressão de 0°, temperaturas do bocal de (a) 270°C, (b) 280°C, (c) 290°C e (d) 300°C (Temperatura de plataforma de 225 °C) (Liao et al., 2022).

2.7 Estudos de ensaio de flexão em 4 pontos de peças fabricadas por FDM

Antony et al. (2020) avaliaram estruturas-sanduíche *honeycomb*, impressas em 3D, com 20-25% cânhamo e PLA. No estudo, foi caracterizado o comportamento mecânico mediante a

execução de ensaios de tração, compressão e flexão em quatro pontos. Focando-se nos resultados do ensaio de flexão em quatro pontos, pôde ser observada, inicialmente, uma interação entre as faces e o núcleo, gerando uma perturbação na parte linear da curva pela rigidez do núcleo, o qual apresenta uma ruptura total do corpo de prova ao atingir a tensão máxima (Figura 2.15a).

Além disso, foram capturadas imagens em vários intervalos de tempo durante o ensaio de flexão em quatro pontos. Nelas, foi visualizado que, em um deslocamento de 1,5 mm, o núcleo começa a se deformar levemente; de 3 mm, as faces começam a se separar do núcleo; e superiores a 4,5 mm e com aumento na tensão, as faces se separam completamente do núcleo até a estrutura falhar completamente (Figura 2.15b). Os autores concluíram que a resposta ao ensaio de flexão em quatro pontos das estruturas impressas com formato de *honeycomb* apresentou só dois estágios (elástico e ruptura).

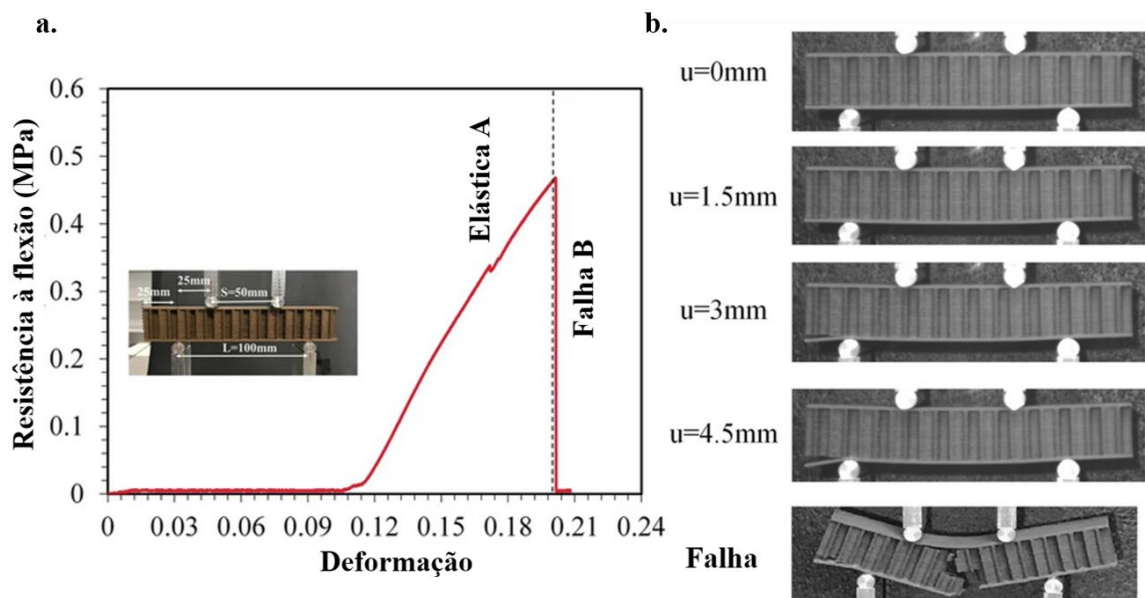


Figura 2.15- a. Curva de tensão versus deslocamento do ensaio de compressão e b. Imagens capturadas durante diferentes intervalos de tempo no ensaio de compressão (Antony et al., 2020).

Vălean *et al.* (2022) avaliaram a tenacidade à fratura dos modos I e II de corpos de prova manufaturados com o uso da técnica de modelagem por deposição com ácido polilático. O ensaio de flexão em quatro pontos foi executado para corpos de prova com entalhe de borda única - simétrico, para o modo I, e assimétrico, para o modo II. O entalhe foi realizado por impressão 3D e por fresagem, respectivamente. Para a impressão dos corpos de prova,

determinaram-se uma porcentagem de preenchimento de 100% e uma orientação de impressão de $\pm 45^\circ$, e, para a execução do ensaio de flexão em quatro pontos, foi estabelecida uma carga de 10 kN, com uma velocidade de carga de 2 mm/min, definindo-se duas configurações de carregamento (Figura 2.16).

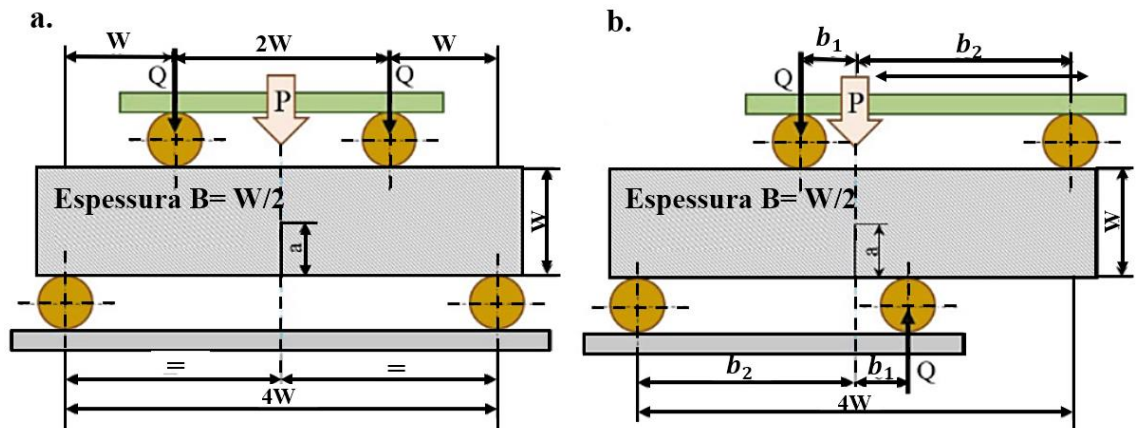


Figura 2.16- a. flexão simétrica em quatro pontos para determinação da tenacidade à fratura modo I e b. flexão assimétrica em quatro pontos para determinação da tenacidade à fratura modo II (Vălean et al., 2020).

Na Figura 2.17a, são mostrados os resultados obtidos do ensaio de flexão em três pontos, no qual se observou um comportamento quase frágil durante o ensaio mecânico. A força teve uma diminuição considerável após atingir o valor máximo da carga, principalmente no caso do carregamento assimétrico de quatro pontos. No que se refere aos resultados da tenacidade à fratura, foi evidenciado que a maior tenacidade à fratura, modo I, foi obtida para os corpos de prova com entalhe manufaturados em 3D ($6,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$), em comparação aos fresados ($5,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$) (Figura 2.17b). A tenacidade à fratura, medida no modo II, foi de $3,6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$, para os corpos de prova com entalhe impresso em 3D, e de $3,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$, para os corpos de prova com entalhe fresado, indicando menor influência do entalhe por usinagem para o modo II. De acordo com os resultados, a razão entre a tenacidade à fratura, do modo II e do modo I, foi de 0,55, para os corpos de prova com entalhe impresso em 3D, e de 0,59, para os corpos de prova com entalhe fresado.

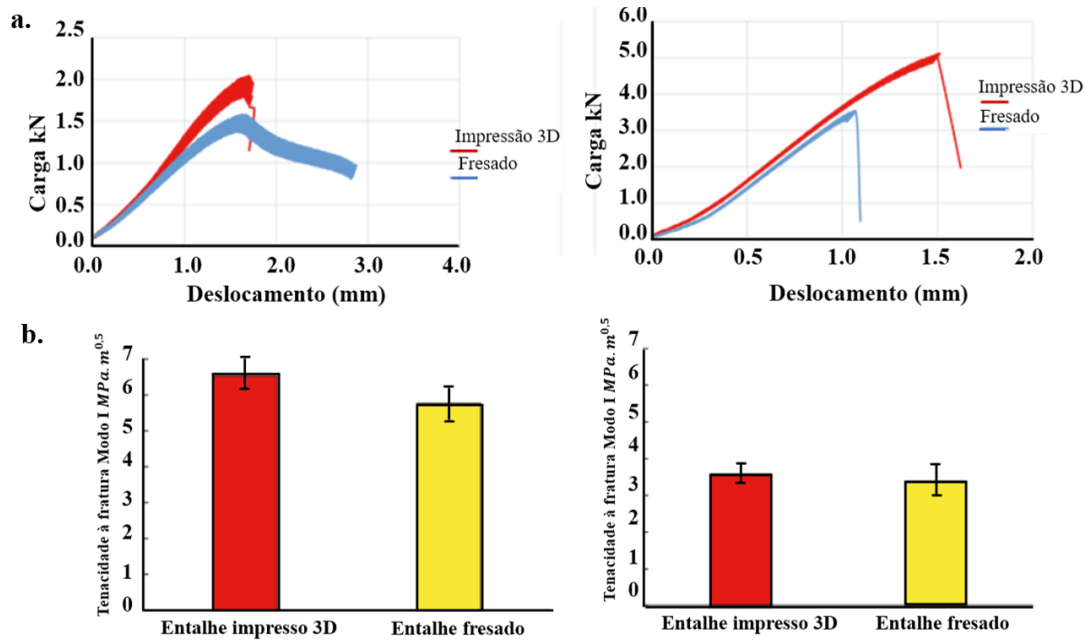


Figura 2.17- a. Flexão simétrica em quatro pontos, b. Flexão assimétrica em quatro pontos, c. Tenacidade à fratura K_{CI} e d. Tenacidade à fratura K_{CII} (Válean et al., 2020).

Em um estudo realizado por Singhal et al. (2022), avaliaram-se a influência da porcentagem de preenchimento (100% e 70%) e o padrão de preenchimento (alternativo linear - hexagonal, linear e hexagonal) nas propriedades mecânicas de corpos de prova manufacturados por meio da técnica FDM de PC-PBT (Policarbonato - Polibutileno Tereftalado). Foram realizados ensaios de tração, flexão e tenacidade à fratura (para corpos de prova com entalhe de borda única), aplicando-se o processo de recozimento nos corpos de prova. Na Figura 2.18a, pode ser observada a curva de carga-deslocamento dos corpos de prova com entalhe.

A maior carga foi obtida nos corpos de prova com 100% e 70% de preenchimento, com um padrão de preenchimento alternativo linear-hexagonal. Os valores médios, o desvio padrão da tenacidade à fratura e a energia de fratura são comparados na Figura 2.18b. A tenacidade à fratura dos corpos de prova com porcentagem de preenchimento de 100% e 70%, com padrão alternativo linear-hexagonal, foi 1,4 vezes maior que a dos outros corpos de prova em estudo. Segundo os autores, o recozimento nos corpos de prova com preenchimento de 100% e 70% aumentou a resistência de ligação interfilamento. O padrão de preenchimento alternativo linear-hexagonal está alinhado ortogonalmente ao plano da trinca; portanto, necessita-se de mais energia para gerar a propagação da trinca, aumentando, desse modo, a tenacidade à fratura, semelhantemente aos compósitos. De acordo com os resultados obtidos, o padrão de

preenchimento alternativo poderia ser usado para a impressão de componentes de automóveis e equipamentos de carcaças elétricas, melhorando as propriedades de fratura.

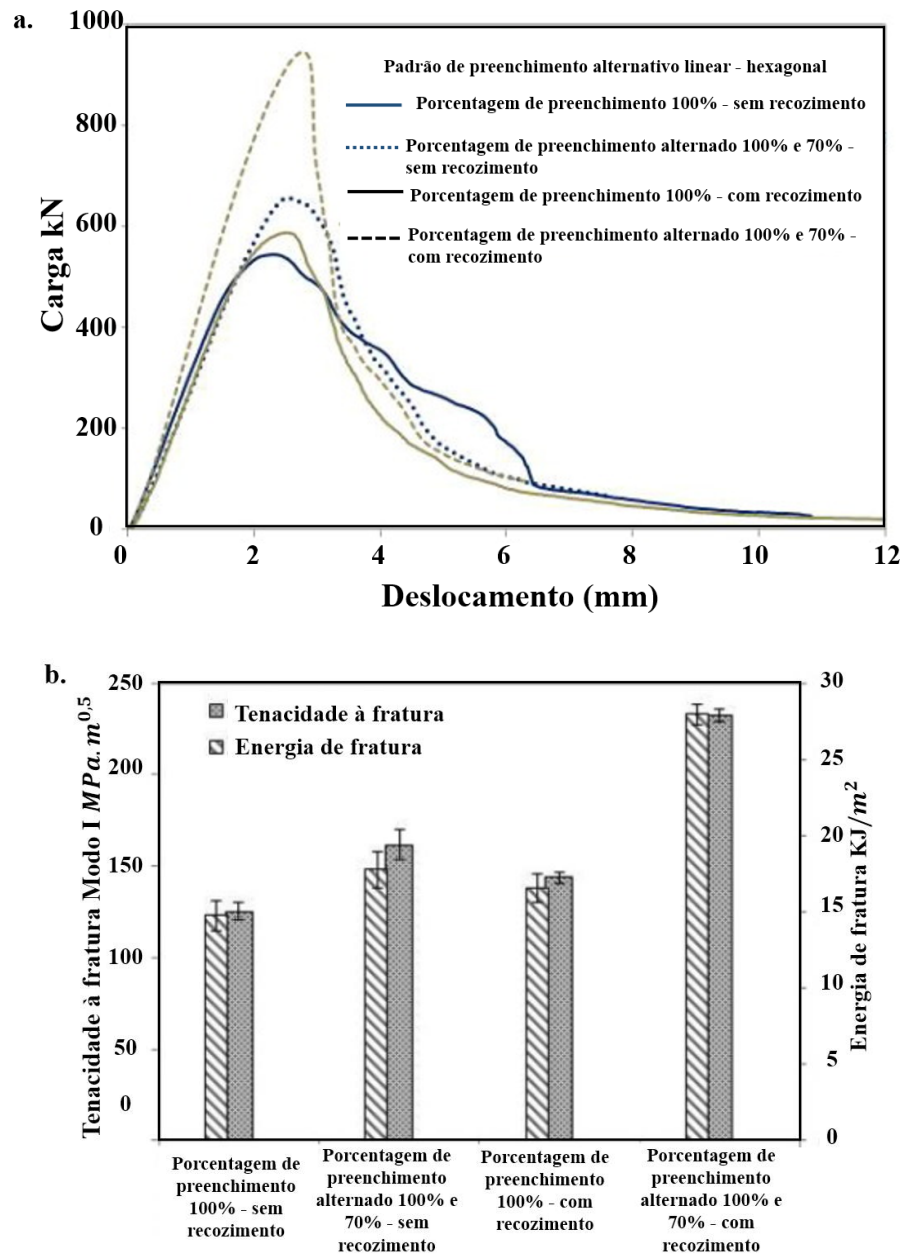


Figura 2.18- Curva carga-deslocamento para ensaio de fratura por deformação plana e b. Comparação dos valores médios de tenacidade à fratura e energia de fratura (Singhal et al., 2022).

2.8 Mecanismos de falha

Os mecanismos que causam falhas nos componentes estruturais podem ter origem na natureza do próprio material ou nas diversas condições que terão de suportar durante seu tempo de serviço, atuando sob cargas estáticas ou dinâmicas. Os principais mecanismos de falha são

as fraturas frágil e dúctil. Na fratura frágil, geralmente, se produz uma ruptura por clivagem devido à separação direta ao longo dos planos cristalográficos, gerando deformações plásticas em quantidades desprezíveis. Na fratura dúctil, o crescimento da trinca apresenta uma fase estável, e a região central inferior da superfície é irregular e fibrosa, indicando deformação plástica. Esse tipo de fratura possui grandes deformações plásticas macroscópicas e grande retração lateral do corpo de prova, ocasionando microvazios e rebarbas na região da fratura (Lui, 2005).

A mecânica de fratura está conformada por duas vertentes de estudo: a mecânica de fratura lineal elástica (MFLE) e a mecânica de fratura elastoplástica (MFEP). A MFEL avalia a magnitude e a distribuição do campo de tensões, para materiais com fratura frágil, por meio dos conceitos da teoria de elasticidade lineal. Essa magnitude do campo de tensões em torno da ponta da trinca é calculada pelo fator de intensidade de tensão, K , e pode ser comparada com a tenacidade à fratura do material, a fim de prever que um componente trincado possa gerar rompimento depois de estar sob carregamento (Lui, 2005). A MFEP é aplicada em materiais dúcteis, onde a zona plástica tem um tamanho significativo, predominando a deformação plástica na ponta da trinca em relação à espessura do corpo. Existem três modos de solicitação de fratura (Figura 2.19), que variam de acordo com os deslocamentos relativos das faces da fissura pela carga aplicada (Lui, 2005).

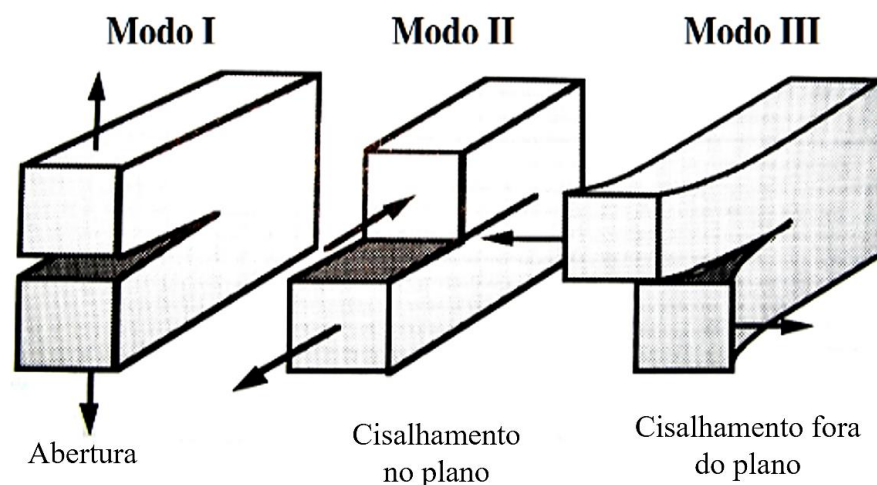


Figura 2.19- Modos de fratura: Modo I (A), Modo II (B) e Modo III (C) (Lui, 2005) .

No modo I, a carga de tração é aplicada ao plano da trinca, ocasionando a abertura desta; no modo II, a carga de cisalhamento aplicada no plano produz deslocamento em uma das faces

da trinca com relação à outra face; e, no modo III, as cargas de corte ou cisalhamento normais ao plano geram o deslocamento entre as superfícies da trinca de forma paralela (Lui, 2005).

2.8.1 Mecanismos de falha em materiais compósitos

As falhas em materiais compósitos podem ser produzidas inicialmente na estrutura interna, provocando uma alteração no comportamento mecânico da estrutura, de forma macroscópica. Essas falhas internas podem ser geradas de modo isolado ou simultâneo, ocasionando ruptura das fibras (transversal ou longitudinal), fissuras na matriz, separação na interface entre a fibra e a matriz e delaminação (separação entre as camadas do compósito e deformação das fibras submetidas a esforços de compressão) (Rahmatabadi et al., 2022).

Os tipos de modos de falha dos compósitos unidirecionais podem variar conforme as condições de carga. Por exemplo, uma carga de tração longitudinal, aplicada de forma progressiva, paralelamente às fibras, em geral, começa a se romper sob esforços inferiores a 50% da carga máxima e continua se rompendo com o aumento da carga aplicada (Zolfagharian et al., 2022). Esse rompimento das fibras gera deslocamento devido às concentrações de tensões, ocasionando a fratura de algumas seções transversais do compósito até produzir a fratura total do material. Fratura frágil com desprendimento de fibras (*pullout*) e cisalhamento da matriz são alguns modos de falha de materiais compósitos sob cargas de tração longitudinais (Figura 2.20) (Yao et al., 2020).

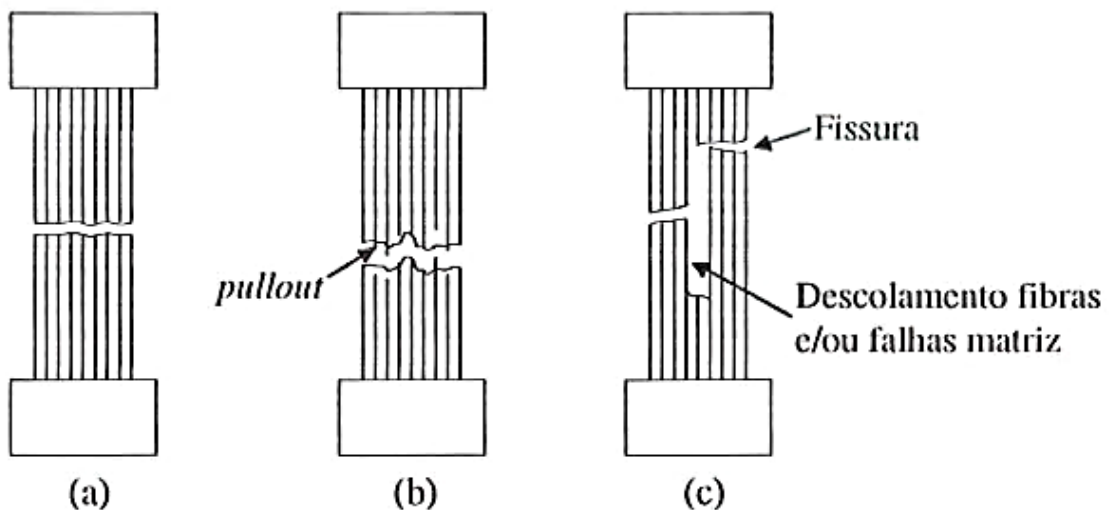


Figura 2.20- Modos de falha de compósitos unidirecionais sob carga de tração longitudinal.

(a). Fratura frágil, (b). Fratura frágil com desprendimento de fibras (*pullout*) e (C).
cisalhamento da matriz (Timbó et al., 2020).

A carga de tração transversal gera concentrações de tensões e deformações na matriz e na interface entre os constituintes. Essas fibras apresentam características mais frágeis e modos de falha de cisalhamento da matriz e descolamento entre as constituintes. As propriedades da matriz e da interface permitem a resistência ao cisalhamento no plano. A propagação da trinca é produzida pelo cisalhamento na matriz, devido às tensões associadas à presença de vazios e à resistência de adesão entre a matriz e a fibra (Marşavina et al., 2022).

Uma carga de compressão longitudinal gera microflambagens entre as fibras e depende, principalmente, da porcentagem de fibras presentes no compósito e das propriedades elásticas da matriz (Khosravani et al., 2021). O modo extensível é produzido quando existe uma fração volumétrica de fibras mínima no compósito, fazendo com que as fibras se movimentem independentemente ou de forma alinhada (Figura 2.21a e 2.21b). O modo cisalhante ocorre quando a fração volumétrica das fibras presentes na matriz é maior, e a flambagem das fibras é produzida pelo escoamento e microfissuras na matriz. As tensões de tração e compressão nas fibras geram áreas deformadas denominadas zonas de torção (Figura 2.21c), as quais causam deformações em fibras dúcteis e fraturas em fibras frágeis (Corvi et al., 2023).

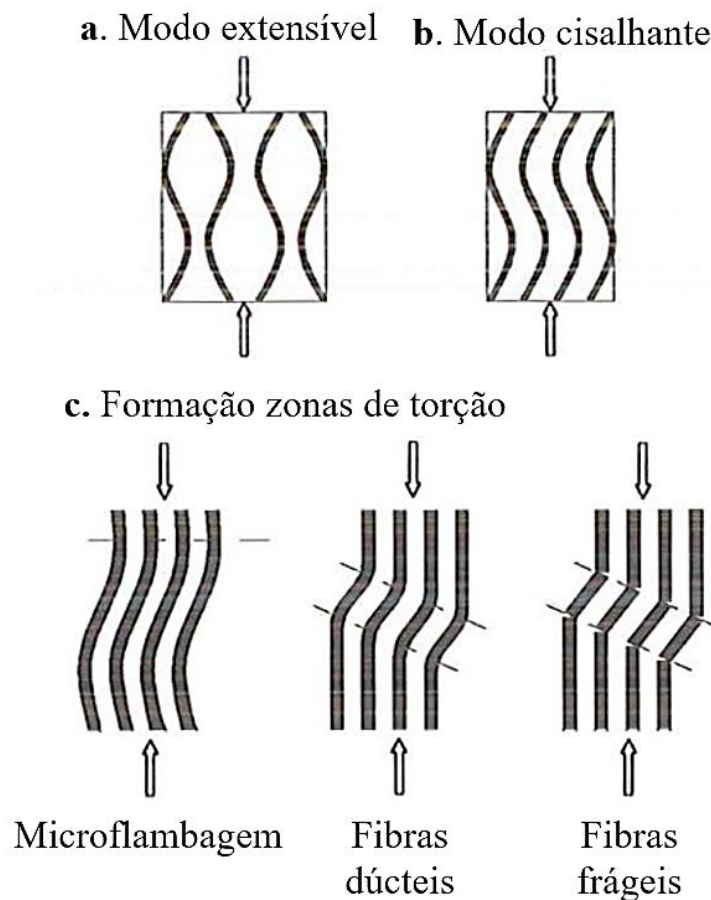


Figura 2.21- Compósito sob carga de compressão longitudinal (Timbó et al., 2020).

2.9 Técnica de correlação digital de imagem (CDI)

A técnica de correlação digital de imagem (CDI) é implementada em diferentes campos em que seja requerida a medição de deformação com alta precisão (Abdulqader & Rizos, 2020). No campo da engenharia civil, por exemplo, é aplicada para prever falhas de estruturas; na biomecânica, a CID analisa a estabilidade do movimento do corpo humano; na engenharia eletrônica, avalia a influência da temperatura nos circuitos integrados; nas engenharias mecânica e aeroespacial, permite caracterizar mecanicamente materiais que serão usados, por exemplo, para a fabricação de peças para veículos ou protótipos de aeronaves (Castillo et al., 2019) (Hassan, 2019). Além disso, a técnica CID tem sido empregada para realizar validações cruzadas experimentais (Teórico e experimental) (Quanjin et al., 2020).

No início, a correlação digital de imagem foi considerada uma técnica simples de se configurar e implementar, pois foi aplicada para medir deformações bidimensionais usando imagens em escala de cinza (Pan B. , 2018). Depois, a técnica CID foi estendida para medir deformações tridimensionais, usando câmeras estéreo ou múltiplas câmeras, e também foi aplicada para se trabalhar com imagens coloridas bidimensionais e digitalizações coloridas tridimensionais, melhorando a precisão no custo do tempo computacional (Cunha et al., 2021). Segundo Hassan (2021), a técnica CID é usada, principalmente, para medir deformações contínuas na superfície do corpo de prova.

A correlação digital de imagem é considerada uma técnica viável e econômica, sendo mais precisa que as técnicas de medição tradicionais. A técnica CID usa imagens eletrônicas tradicionais para medir a deformação, não sendo necessária uma iluminação especializada para se registrar as imagens (Pan & Li, 2011). Convencionalmente, o instrumento mais empregado para medir deformações é o extensômetro, o qual não gera mapas de deformações da estrutura analisada; por exemplo, na análise de fadiga, a CID fornece mais informações do que um extensômetro. As deformações de campo completo, obtidas pela técnica CID, podem ser adquiridas em micro e nanoescalas. Além disso, as deformações medidas podem ser relacionadas com as características microestruturais, a superfície de interação e os fenômenos de crescimento de trincas de fadiga (Hebert & KhonsarI, 2023).

A técnica de correlação digital foi aplicada para caracterizar visualmente o processo de fratura, em um estudo realizado por Sun *et al.* (2018), com o objetivo de investigar o efeito da espessura de quatro materiais usados como aderente (aço Q235, liga de alumínio 5182 e plástico

reforçado com fibra de carbono) e epóxi como agente adesivo. A técnica de correlação digital de imagem foi implementada, especificamente, para capturar a deformação fora do plano dos materiais aderentes, a distribuição da tensão e a tensão ao longo da ligação. Com a técnica CID, verificou-se que cada uma das juntas tem um gradiente de deslocamento próximo, independentemente da espessura do aderente e dos materiais aderentes. Além disso, o aumento da deformação dos materiais aderentes reduziu o momento fletor. Segundo os autores, a redução deste fez com que os aderentes se deformassem simetricamente em relação à linha central de sobreposição, e o deslocamento máximo foi registrado nas extremidades da região de sobreposição (Sun et al., 2018).

A CID é uma técnica óptica aplicada para medir a geometria, o deslocamento e a deformação de materiais ou estruturas sem necessitar de contato físico com o experimento (Liu Y. et al., 2019). A técnica emprega um sistema óptico de captura de imagens da área de interesse da superfície de estudo em diferentes intervalos de tempo (Kerekes et al., 2019). Na superfície da área de interesse, são localizados pontos aleatórios, e, uma vez capturadas imagens antes e após a deformação, elas são divididas em diversos blocos, analisando-se o deslocamento dos pontos por meio de um algoritmo de correlação (Hassan, 2021). Cada bloco é composto por um conjunto de pixels, e o algoritmo de correlação calcula o vetor de deslocamento dos blocos de uma imagem para outra, de acordo com os valores de intensidade desses pixels. Assim, a deformação é calculada na sequência da derivação dos campos de deslocamento (Figura 2.22). A técnica pode efetuar medições de deformações tanto no plano 2D quanto no 3D (Zhou et al., 2019).

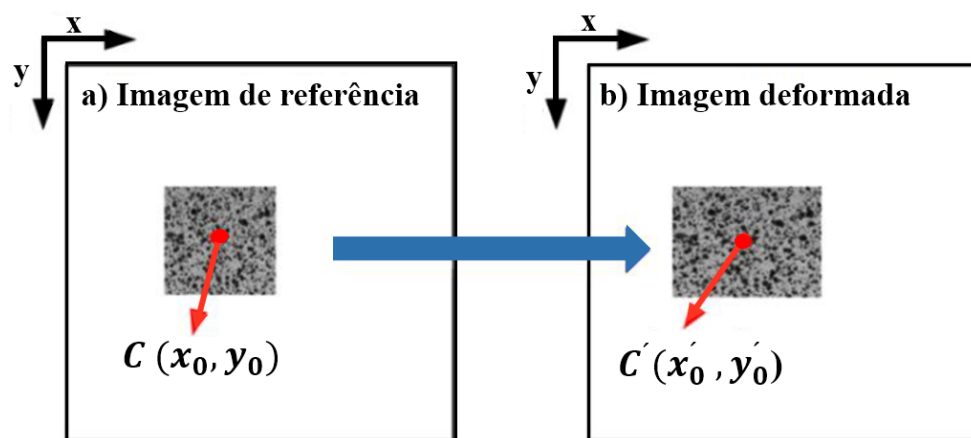


Figura 2.22-Deslocamento dos blocos após a carga aplicada. a. Imagem de referência b. Imagem deformada (Zhou et al., 2019).

É importante ressaltar que não deve haver mais que uma correspondência para um bloco, pois ele pode se deformar geometricamente, gerando um fenômeno de decorrelação no qual os deslocamentos medidos não são confiáveis. Para isso, é necessário preparar convenientemente o corpo de prova que será analisado aplicando-se um padrão aleatório de pontos com um alto contraste (Zhao et al., 2019).

Esse padrão de pontos pode ser aplicado com tinta na área de interesse da superfície, sendo que, em alguns casos, é necessário, também, preparar a superfície do corpo de prova com a aplicação de um spray de tinta. A preparação prévia da superfície é executada visando gerar um contraste que permita a máxima precisão dos algoritmos de rastreamento (Bahrami et al., 2020). Quando a superfície do corpo é fabricada por um material poroso, não é necessária uma preparação prévia, já que essa textura produz o contraste adequado para visualizar a deformação após a carga aplicada, calculada pelo algoritmo de correlação (Górszczyk et al., 2019).

Conforme descrito anteriormente, define-se uma imagem como uma função bidimensional $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas espaciais no plano e amplitude (f) em qualquer par de coordenadas (x, y) , denominadas de intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto. Quando os valores de intensidade são quantidades finitas e discretas, estes se referem a uma imagem digital, a qual é composta por um número de elementos finitos denominados pixels (Gehri et al., 2020).

Nesse sentido, existem diversos algoritmos de correlação de imagem para se obter as deformações das superfícies de interesse, sendo as principais: a correlação cruzada normalizada (NCC) (Equação 2.1), a soma dos quadrados das diferenças (SSD) (Equação 2.2) e a soma normalizada de diferenças quadradas (NSSD) (Equação 2.3) (Bornert et al., 2009).

$$NCC: C = 1 - \frac{\sum f(x, y) g(x', y')}{\sqrt{\sum f(x, y)^2 \sum g(x', y')^2}} \quad (2.1)$$

$$SSD: C = \sum [f(x, y)^2 - g(x', y')^2] \quad (2.2)$$

$$NSSD: C = \sum \left(\frac{\sum \sum f(x, y) g(x', y')}{\sum g(x', y')^2} g(x', y') - f(x, y) \right)^2 \quad (2.3)$$

Onde,

f = Função de imagem;

g = Função da imagem deformada;

(x, y) = Intensidade da escala de cinza para cada ponto.

Em um estudo realizado por Yu et al. (2019), implementou-se a análise de correlação digital de imagem, durante o ensaio de tração, para a medição da deformação 2D. Foram manufaturados corpos de prova por meio da técnica FDM, com um filamento compósito de fibra de microcarbono como material de reforço, e o PE6, como material de matriz (PE6-FC). Para a impressão desses corpos de prova, determinaram-se uma densidade de preenchimento de 100% e diferentes números de camadas de fibra de microcarbono (2, 4, 6 e 8).

Nas Figuras 2.23a e 2.23f, pode ser visualizada a principal deformação dos corpos de prova manufaturados com uma concentração de fibra de carbono de 2,14% em peso e duas camadas de fibra de carbono. Nas Figuras 2.23g e 2.23h, mostra-se o início da propagação de trincas dos corpos de prova manufaturados com uma concentração de fibra de carbono de 8,3% em peso e oito camadas de fibra de carbono.

No corpo de prova manufaturado com uma concentração de fibra de carbono de 2,14% em peso, observa-se um ângulo de fissura de 45° em relação à direção em que se apresenta a tensão máxima no ensaio de tração (Figura 2.23f). Segundo os autores, esses corpos de prova apresentaram maior ductilidade de acordo com as curvas de tensão-deformação, devido à sua baixa concentração em peso de fibra de carbono. Para os corpos de prova com uma concentração de 8,3% em peso de fibra de carbono, pôde ser observado que a propagação da trinca ocorre mais rapidamente que nos outros corpos de prova, evidenciando, assim, um comportamento frágil.

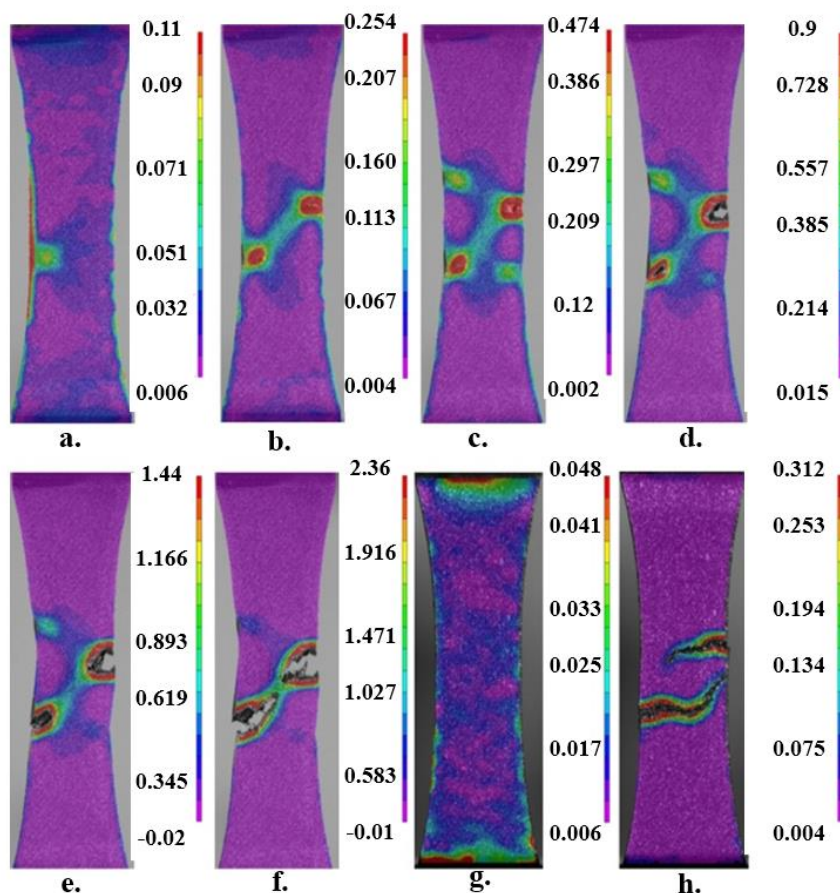


Figura 2.23- Deformação principal dos corpos de prova manufacturados de PE6-FC durante o ensaio de tração. (a)-(f). iniciação e propagação de trinca dos corpos de prova com concentração de fibra de carbono de 2,14% em peso, (g)–(h) corpo de prova com concentração de fibra de carbono de 8,3% em peso com fratura mais frágil e propagação de trinca mais rápida (Yu et al., 2019).

Luo et al. (2022) executaram ensaios de tração uniaxial de corpos de prova de PLA manufacturados com o emprego da técnica FDM sob diferentes taxas de deformação e temperaturas (45 °C, 35 °C, 25 °C, 0 °C, -20 °C e -40 °C). A tensão térmica superficial sob carga foi avaliada usando-se a técnica de correlação digital de imagem no polímero manufacturado. Além disso, foi identificada a localização de tensão térmica significativa induzida pela fragilização do PLA.

Na Figura 2.24, podem ser observados os contornos de tensão térmica induzidos por expansão e contração térmica gerados pela técnica CID. Nota-se que as tensões térmicas, nas direções x e y , são relativamente uniformes para temperaturas de 25°C e 35°C. Para 45°C, é visualizada uma distribuição desigual na tensão térmica, e, nas temperaturas de -40°C a 0°C,

mostra-se uma grande área de localização de tensão térmica. De acordo com os autores, a localização da tensão térmica aumenta com a diminuição das temperaturas, de 25°C para -40°C, ressaltando-se que esse aumento na tensão térmica, em temperaturas inferiores a 0°C, pode ocasionar falhas prematuras.

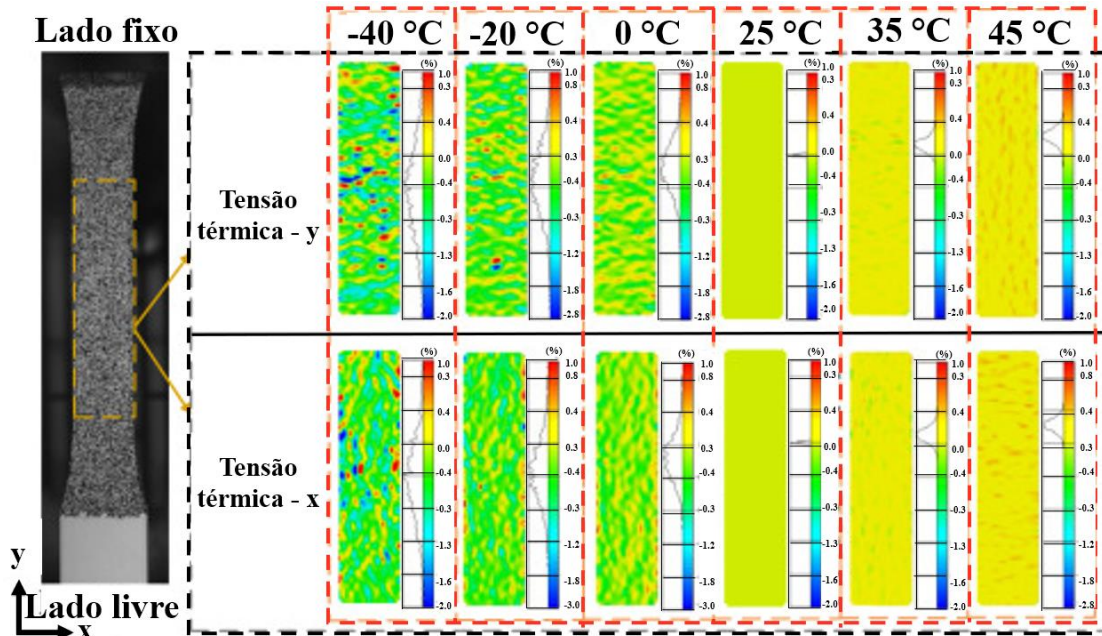


Figura 2.24- Contornos de tensão térmica induzidos por expansão e contração térmica gerados pela técnica CID (Luo et al., 2022).

Zamani et al. (2022) desenharam e manufaturaram uma estrutura *honeycomb* auxética como núcleo para estruturas-sanduíche mediante a técnica de modelagem por deposição fundida (Figura 2.25a). As deformações produzidas no núcleo e a análise de fratura sob condições de flexão em três pontos foram avaliadas por meio da análise de correlação digital de imagem (CDI). Para a execução da análise (CDI), os corpos de prova foram previamente pintados com cor branca, localizando-se, aleatoriamente, pontos na área de interesse. A Figura 2.25b mostra a comparação entre o deslocamento registrado pela máquina de teste universal e o deslocamento obtido pela técnica CDI. Na curva de carga-deslocamento, pode ser observada uma concordância dos resultados registrados pela máquina de teste e a técnica CDI.

A Figura 2.25b apresenta os resultados da distribuição da deformação adquiridos com o emprego da técnica CID, evidenciando-se o início das trincas na parte superior da camada do núcleo e entre os rolos dos suportes. Também se pode notar que, com o aumento da carga de flexão, o número de trincas e a propagação aumentam. No mapeamento da superfície, observa-se que as trincas são formadas na junção nas paredes do núcleo de estrutura *honeycomb*

auxética, e os picos no digrama da Figura 2.25c estabeleceram a posição das fissuras no comprimento do vão.

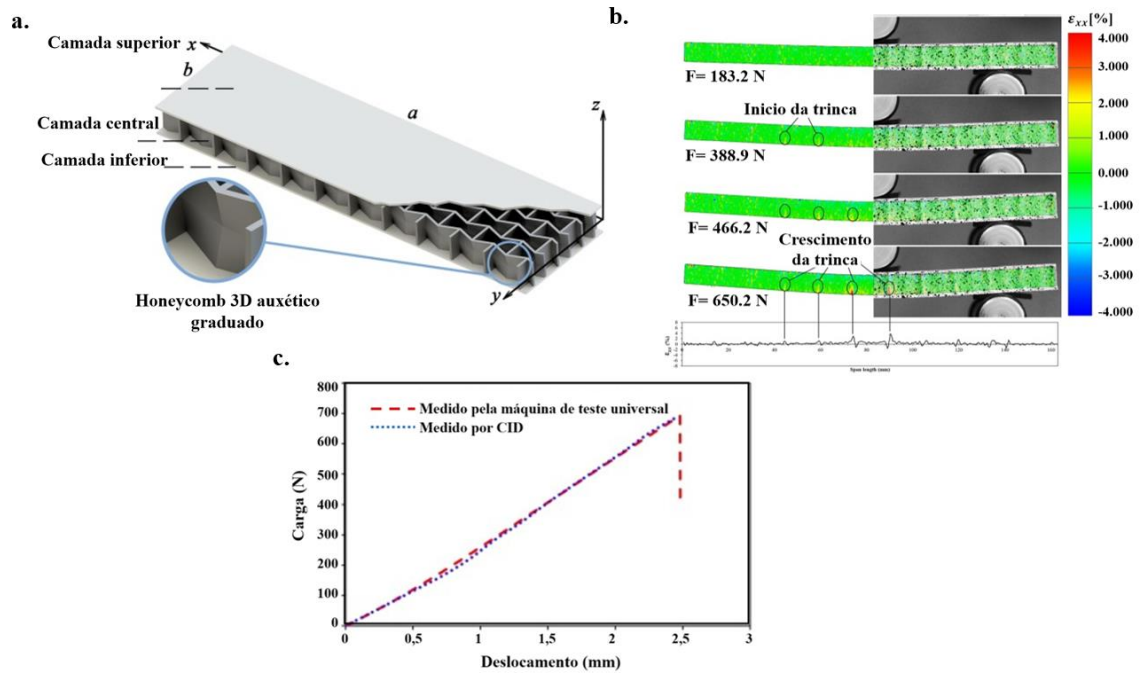


Figura 2.25- a.Estrutura honeycomb auxética como núcleo para estruturas-sanduíche b. Resultados da distribuição da deformação adquiridos pela técnica CID e c. Comparação dos deslocamentos medidos pela máquina de testes e pela técnica CID. (Zamani et al., 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, a caracterização dos materiais de PLA puro, PLA reforçado com fibras de vidro (PLA-FV), PLA reforçado com fibras de carbono (PLA-FC) e PLA reforçado com partículas de alumínio (PLA-AI) para uso na modelagem por deposição fundida mediante a realização de ensaios de tração, compressão e flexão em quatro pontos serão descritos. O capítulo apresentará o planejamento para a análise da influência da orientação de impressão e dos materiais usados como reforço na matriz termoplástica de PLA. O processo desenvolvido para a caracterização mecânica dos materiais de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI são compreendidos em quatro etapas, que podem ser visualizadas na figura 3.1.

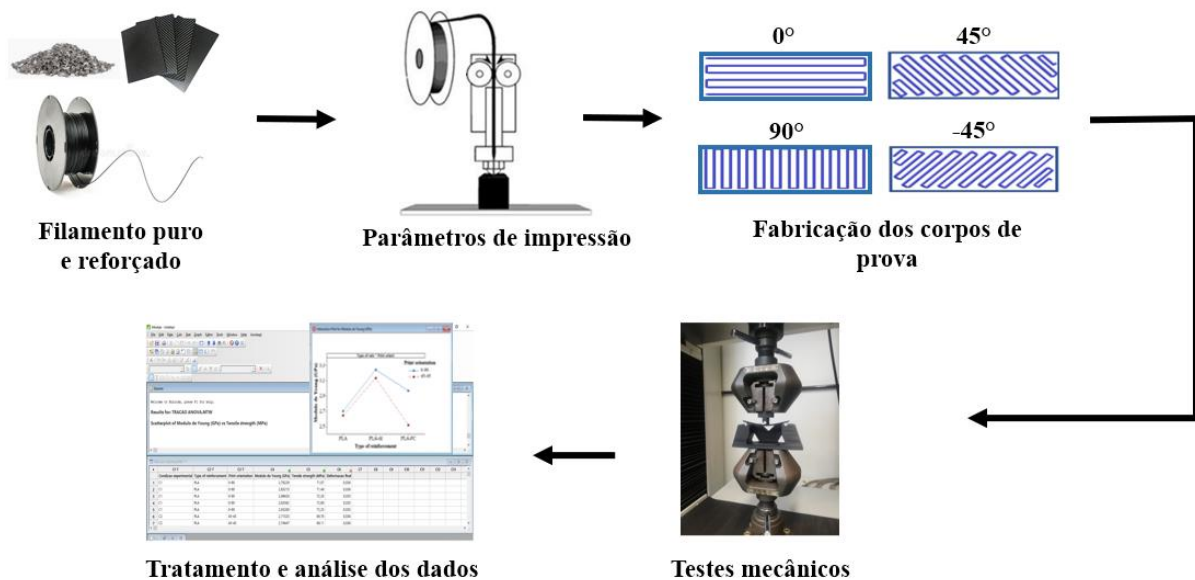


Figura 3.1- Etapas usadas para a caracterização e fabricação dos materiais.

3.1 Fabricação dos corpos de prova

Os filamentos de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI usados no planejamento experimental para a fabricação dos corpos de prova foram fornecidos pelo fabricante Voolt 3D. Os filamentos de PLA-AI foram produzidos pela empresa, a qual, utiliza uma extrusora adicionando partículas de alumínio com um tamanho de $9\ \mu\text{m}$ e 20% em peso do compósito. As partículas de alumínio na matriz de PLA podem ser observadas na figura 3.2a. Os filamentos de PLA-FV e PLA-FC foram produzidos adicionando fibras de vidro e fibras de carbono com tamanho de $60\ \mu\text{m}$ e 20% em peso do compósito. Na figura 3.2b e 3.2c pode ser visualizado as fibras de carbono e de vidro na matriz de PLA.

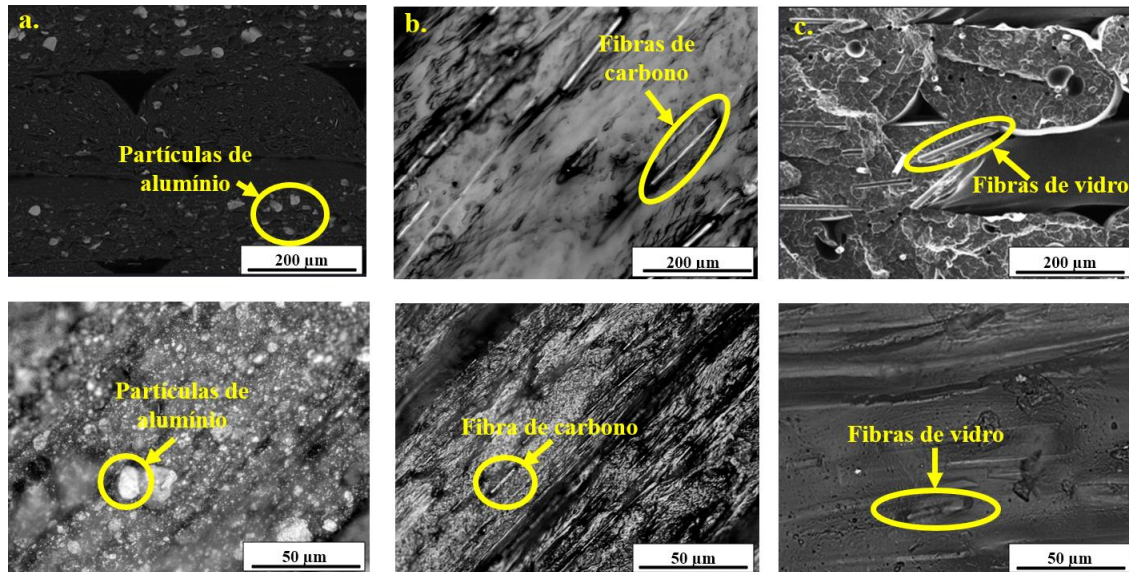


Figura 3.2- Microestrutura. a. Partículas de alumínio na matriz de PLA b. Fibras curtas de carbono na matriz de PLA e c. Fibra curtas de vidro na matriz de PLA.

Os corpos de prova foram desenhados no software SolidWorks® 2018 conforme a especificações da norma ASTM D638- tipo 1A para o ensaio de tração, ASTM D695 para o ensaio de compressão e a norma BS EN ISO 178:2003 para o ensaio de flexão em três pontos e foram manufacturados mediante a técnica FDM. Os desenhos dos corpos de prova são mostrados na figura 3.3. Foram usados cinco corpos de prova para o ensaio de tração, cinco corpos de prova para o ensaio de compressão e cinco corpos de prova para o ensaio de flexão em quatro pontos, sem replica.

Os parâmetros de impressão 3D (velocidade de impressão, porcentagem de preenchimento, orientação de impressão, espessura da camada, temperatura ambiente, temperatura da plataforma e temperatura do bico) foram programados no software Ultimaker Cura 4.2.1. e os corpos de prova foram manufacturados na impressora 3D Graber I3 - Tec 3D (Figura 3.4), usando um filamento de 1,75 mm de diâmetro de cada material em estudo, o qual, foi aquecido e extrudado utilizando um bico de 0,4 mm de diâmetro. A temperatura de impressão para cada um dos corpos de prova de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-Al foi de 210 °C. Na tabela 3.1 são mostrados os dados técnicos da impressora 3D Graber I3- Tec 3D.

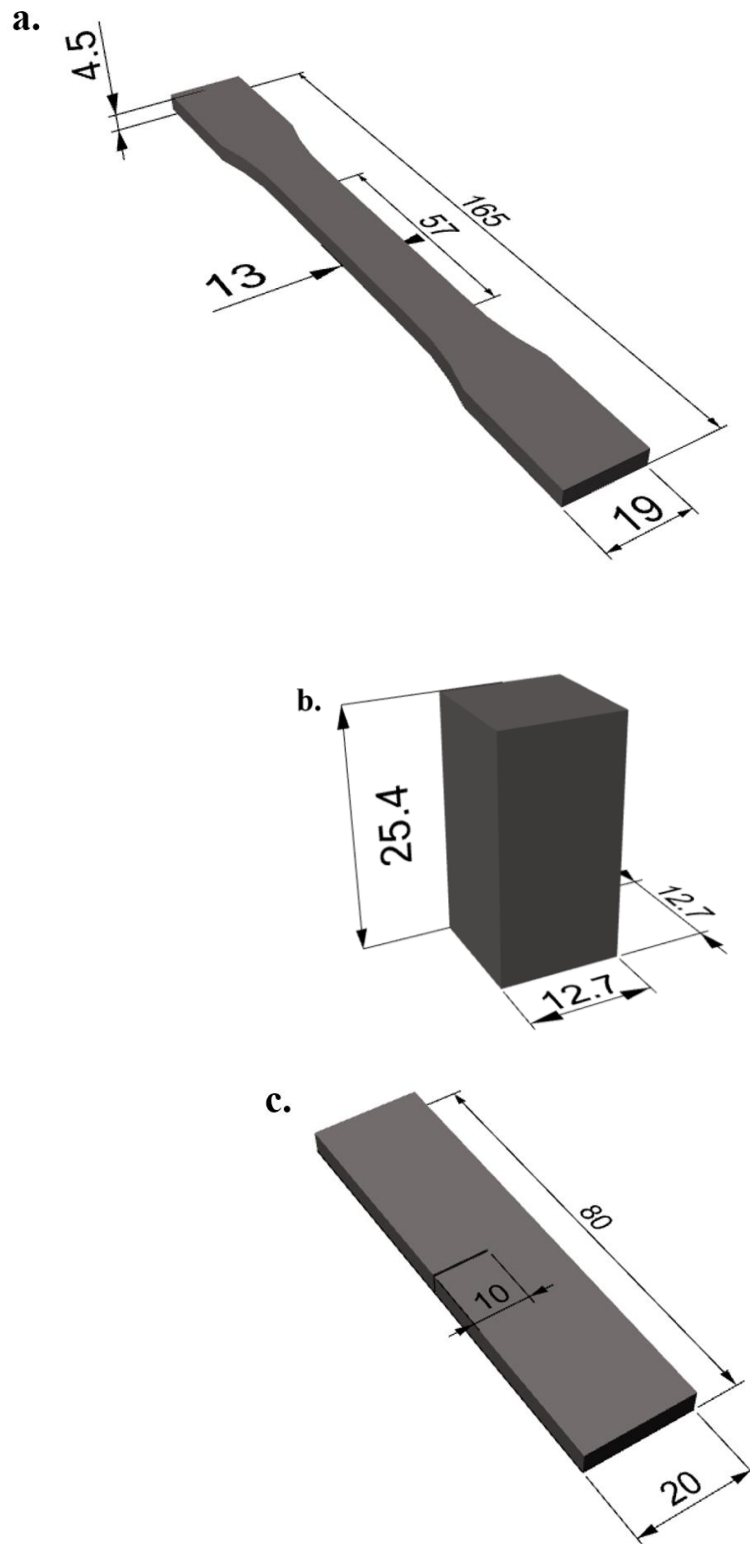


Figura 3.3- Dimensões em mm dos corpos de prova para ensaios mecânicos. a. Tração b. compressão e c. flexão em quatro pontos.

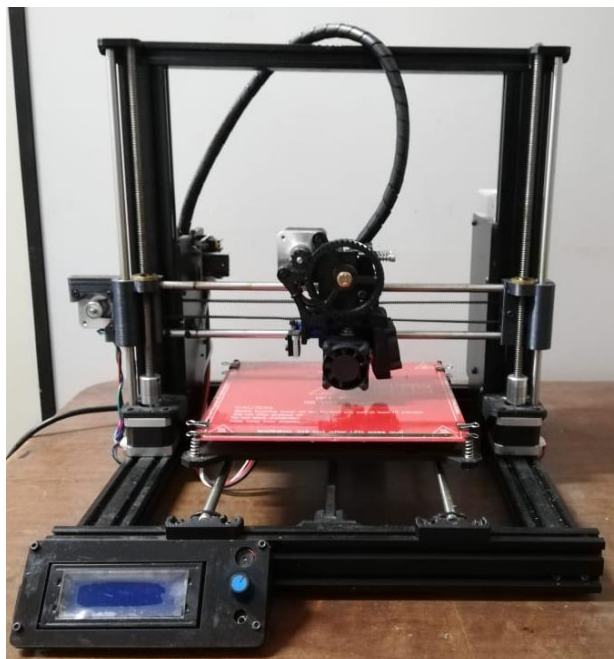


Figura 3.4- Impressora 3D Graber I3 - Tec 3D.

Tabela 3.1- Dados técnicos da impressora 3D Graber I3-Tec 3D.

DADOS TÉCNICOS DO EQUIPAMENTO	
Volume de impressão	200 x 200 x 190 mm
Temperatura da plataforma	115° Max
Temperatura do bico	270° Max
Velocidade de impressão	80 mm/s Max
Velocidade de deslocamento	150 mm/s Max
Tensão/Potência	110/220 V - 360 W (bivolt)

Na tabela 3.2, podem ser observados os parâmetros de impressão 3D determinados para manufaturar os corpos de prova. Foram determinados os parâmetros e condições usados para a impressão do PLA. Os parâmetros de impressão foram estabelecidos igualmente para os corpos de prova de PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI, a fim estudar apenas a influência dos materiais de reforço e a orientação de impressão.

Tabela 3.2- Parâmetros de impressão 3D para a fabricação dos corpos de prova.

Parâmetros	Valor
Velocidade de impressão	15 mm/s
Porcentagem de preenchimento	100%
Orientação de impressão	-45°/45° - 0°/90°
Espessura da camada	0,16 mm
Temperatura ambiente	23°C
Temperatura do bico	210 °C
Temperatura da plataforma	50°C

Na figura 3.5 a, pode ser observado o esquema de impressão implementado para obter os corpos de prova. Os corpos de prova foram manufacturados no centro da plataforma de forma individual. Na figura 3.5b, observe-se os corpos de prova manufacturados mediante a técnica da modelagem por deposição fundida (FDM).

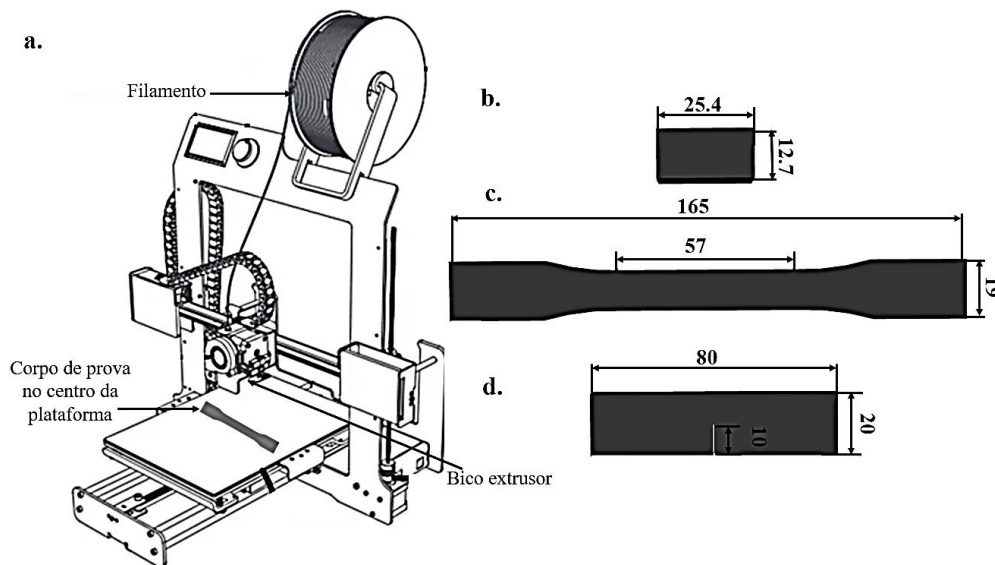


Figura 3.5- a. Esquema de impressão dos corpos de prova b. Corpo de prova de compressão b. corpo de prova de tração e d. corpo de prova de flexão em quatro pontos.

Na figura 3.6 pode ser observada a representação gráfica do planejamento do estudo para analisar a influência no comportamento mecânico dos tipos de materiais e a orientação de impressão mediante a execução de ensaios mecânicos e o tratamento e análise de dados.

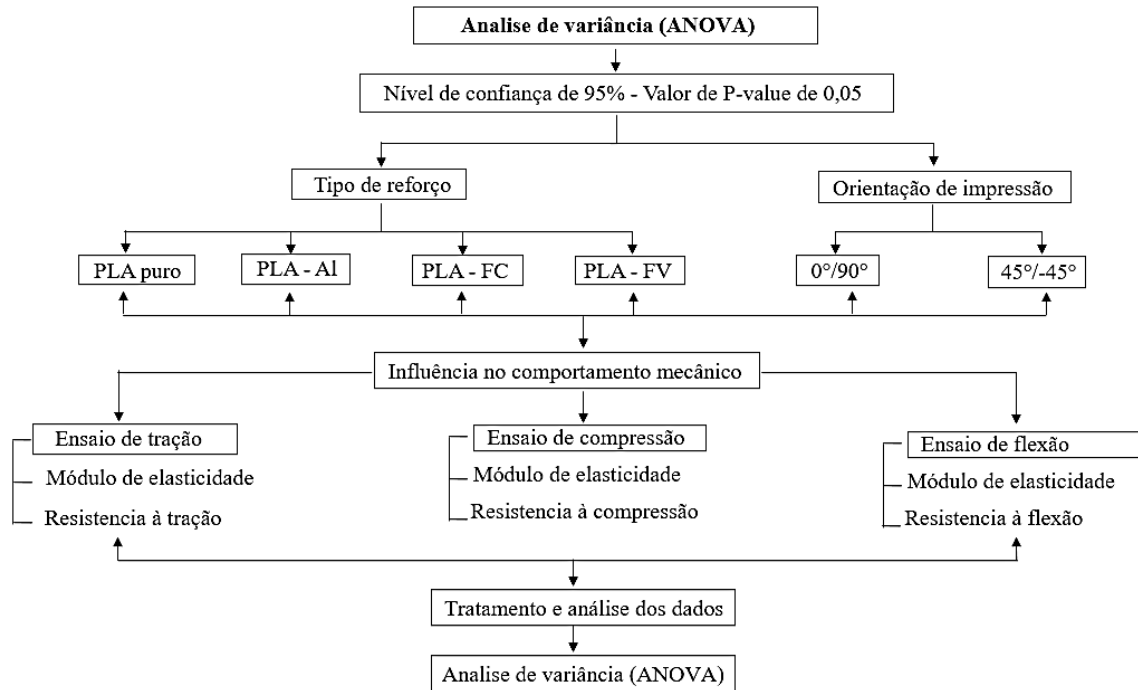


Figura 3.6- Representação gráfica do planejamento do estudo.

3.2 Caracterização mecânica

O desempenho mecânico dos corpos de prova de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-Al foi analisado com a execução de ensaios de tração, compressão e flexão em quatro pontos. Os ensaios mecânicos foram executados para estudar a influência dos materiais de reforço na matriz polimérica de PLA e a influência da orientação de impressão dos corpos de prova ($0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$) nas propriedades de tração, compressão e flexão. Os ensaios de tração, compressão e flexão em quatro pontos foram realizados na máquina universal AG-IS Shimadzu com uma célula de carga com capacidade de 100 kN mm a temperatura ambiente.

3.2.1 Ensaio de tração

A norma ASTM D638-14 permite obter valores de tração de materiais poliméricos reforçados e não reforçados. Os corpos de prova são analisados em condições definidas como temperatura, umidade e velocidade da máquina usada para a execução do teste.

O ensaio de tração foi realizado de acordo com a norma ASTM D638-14 com uma velocidade de ensaio de 3 mm/min. Os corpos de prova foram manufaturados de acordo com as dimensões estabelecidas pela norma com uma espessura de 4,5 mm, uma largura de 13 mm e um comprimento de 110. No ensaio de tração foram determinados o módulo de elasticidade,

a deformação máxima e a resistência à tração. O posicionamento do corpo de prova após de ser realizado o ensaio de tração na máquina pode ser observado na figura 3.7.



Figura 3.7- Posicionamento do corpo de prova no ensaio de tração.

A resistência à tração foi calculada pela divisão entre a carga máxima (F) suportada pelo corpo de prova em Newtons e área da seção transversal (A_0) original em mm^2 . O resultado da resistência à tração (σ_t) é expressado em megapascal. O mencionado anteriormente está de acordo com a equação 3.1.

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0} \quad (3.4)$$

A deformação máxima (ε) é definida pelo deslocamento do corpo de prova durante o ensaio de tração (ΔL) entre o comprimento inicial do corpo de prova (L_0) (equação 3.2). Neste estudo o comprimento do corpo de prova foi de 110 mm.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.5)$$

O módulo de elasticidade (E) é a relação existente entre a tensão aplicada e o deslocamento produzido na zona elástica do material. Dessa forma, o módulo de elasticidade, é calculado pela diferença de tensão ($\sigma_2 - \sigma_1$) corresponde a qualquer segmento da curva linear sob a diferença de deformação corresponde as tensões determinadas ($\varepsilon_2 - \varepsilon_1$) (equação 3.3).

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad [GPa] \quad (3.6)$$

3.2.2 Ensaio de compressão

A norma ASTM D695-15, fornece valores como, o módulo de elasticidade, a tensão de escoamento, a deformação do ponto de escoamento e a resistência à compressão para polímeros rígidos não reforçados e reforçados. O ensaio de compressão foi realizado segundo a norma ASTM D695-15 com uma velocidade de ensaio de 1,3 mm/min e com dimensões dos corpos de prova de 12,7 mm de largura, 12,7 de espessura e 25,4 mm de altura. A resistência à compressão e módulo de elasticidade foram determinadas. Na figura 3.8, pode ser observado o posicionamento do corpo de prova no ensaio de compressão.



Figura 3.8- Posicionamento do corpo de prova no ensaio de compressão.

A resistência à compressão (σ_c) foi determinada pela carga de compressão máxima suportada (F) pelo corpo de prova durante o ensaio sob a área da seção transversal inicial (A_0) do corpo de prova (equação 3.4).

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad [MPa] \quad (3.7)$$

O módulo de elasticidade (E) foi determinado traçando uma tangente a porção linear inicial da curva de deformação da carga. Dessa forma, foram determinados dois valores de tensão de compressão na curva linear ($\sigma_{c2} - \sigma_{c1}$) e foram divididos pela deformação correspondentes aos pontos selecionados ($\varepsilon_2 - \varepsilon_1$) (equação 3.5).

$$E = \frac{\sigma_{c2} - \sigma_{c1}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad [GPa] \quad (3.8)$$

3.2.3 Ensaio de flexão em quatro pontos

A norma ASTM D6272-2:2008 permite obter valores como a resistência a flexão de plásticos não reforçados e reforçados. Também, de materiais compósitos de alto módulo com formato de barra retangulares. A resistência a flexão, de acordo com a norma, não pode ser avaliada para materiais que não apresentam ruptura ou falhas nas fibras externas. Neste ensaio de flexão, utiliza-se um sistema de carregamento de quatro pontos aplicado a uma barra de seção transversal que é localizada sob dois suportes e é carregada em dois pontos.

Cada suporte tem uma distância igual do ponto de suporte adjacente. A distância entre as cargas aplicadas, é um terço ou metade do vão de suporte. O corpo de prova deve ser defletido até que ocorra ruptura nas fibras externas ou até a deformação máxima da fibra atinja o 5%. Na figura 3.9 pode ser observada a localização do corpo de prova no ensaio de flexão em quatro pontos.



Figura 3.9- Posicionamento do corpo de prova no ensaio de flexão em quatro pontos.

Foi considerado o valor crítico do fator de intensidade de tensão (K_{IC}) para a execução do ensaio de flexão em quatro pontos e foi calculado segundo a norma ASTM E399 (2012). A dimensão do entalhe foi de 10 mm e foi impresso em 3D. A distância entre os suportes superiores é de 40 mm e a distância entre os suportes inferiores de 80 mm. Foi determinada uma velocidade de ensaio de 2 mm/min. Foi usada a equação 3.6 para determinar a resistência a flexão.

$$\sigma = \frac{3FL}{4bw^2} \quad [MPa] \quad (3.6)$$

Onde:

σ_f = Resistência à flexão

F = Força aplicada em Newton

L = Comprimento entre os suportes em milímetros

b = Largura em milímetros dos corpos de prova

w = Espessura do corpo de prova em milímetros

Saiba-se que o comportamento da trinca durante a fase de propagação até a falha é quantificado pela mecânica de fratura. O fator de intensidade de tensão (K), dado em $(MPa \cdot m^{1/2})$ determina o comportamento estruturas e componentes com presença de entalhe onde é gerado um aumento das tensões nas regiões do entalhe (Figura 3.10). Esse aumento das tensões, também pode ser produzido pelas discontinuidades na geometria das estruturas, como furos, roscas, entre outros. O fator de intensidade de tensão é calculado para corpos elásticos lineares e isotrópicos com trincas estacionárias.

Como pode ser visualizado na figura 3.10 as linhas de tensão estão concentradas na região da discontinuidade da geometria formando uma tensão normal máxima (σ_{max}), sendo maior do que a tensão nominal no corpo (σ_{nom}). Assim, o fator concentrador de tensão (K_t) é calculo pela razão (equação 3.7)

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad [MPa] \quad (3.7)$$

O fator de concentração teórico (K_t), depende a penas da geometria da peça e o material utilizado para a fabricação da peça não tem efeito sobre o valor do fator de concentração teórico.

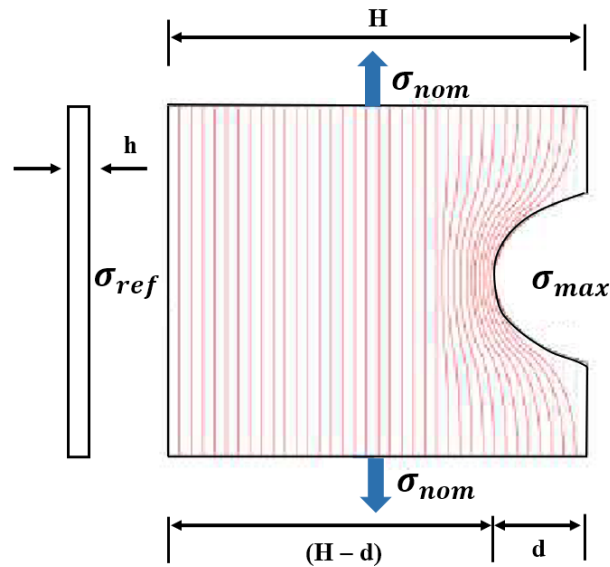


Figura 3.10- Distribuição das linhas de força concentradas no corpo.

No estado plano de tensão, o fator de intensidade de tensão está definido por um limite denominado como fator crítico (K_c) em função a espessura do material. O estado plano de deformação é atingido à medida que a espessura do material aumenta. Quando o fator de intensidade de tensões atinge o valor crítico (K_c), a velocidade de propagação da trinca aumenta significativamente ocasionando uma fratura instantânea. Se o valor crítico (K_c) é constante considere-se a tenacidade como uma propriedade própria do material. Quando os ensaios estão relacionados ao modo I, valor crítico (K_c) torna-se (K_{CI}) representando a resistência do material a falha na presença de trinca.

O valor crítico do fator de intensidade de tensão (K_{CI}) é um parâmetro que determina a tenacidade a fratura em materiais que se comportam de forma linear elástica antes da falha, fazendo com que a zona plástica não seja significativa em comparação as dimensões do corpo de prova. O valor crítico do fator de intensidade de tensão (K_{CI}) é calculado segundo a norma ASTM E399 (2012) (equação 3.8).

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} f_I \left(\frac{a}{w} \right) \quad [MPa] \quad (3.8)$$

Onde:

K_{IC} = Valor crítico do fator de intensidade de tensão.

σ = Tensão nominal crítica para corpo de prova de flexão em quatro pontos.

a = Comprimento da trinca

w = Altura do corpo de prova

$f_I\left(\frac{a}{w}\right)$ = Função que corrige o fator de intensidade de tensão para dimensões finitas.

A função $f_I\left(\frac{a}{w}\right)$ depende tanto do comprimento da trinca quanto da altura do corpo de prova. A função pode ser calculada usando a equação 3.9 para $0 \leq a/w \leq 0.7$.

$$f_I = 1.122 - 1.121\left(\frac{a}{w}\right) + 3.74\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 3.873\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 19.05\left(\frac{a}{w}\right)^4 + 22.55\left(\frac{a}{w}\right)^5 \quad (3.9)$$

3.3 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância ANOVA, permite realizar comparações simultâneas entre duas ou mais médias, ou seja, permite testar hipóteses sobre médias de distintas populações. Nesse sentido, existem dois tipos de hipóteses que podem ser determinadas. A hipótese nula (H_0), é determinada quando as médias populacionais são iguais e a hipótese alternativa (H_1), é determinada quando as médias populacionais são diferentes, ou seja, pelo menos uma das médias é diferente. A análise de variância, pode ser usada quando há mais de dois grupos que precisam ser comparados.

A análise de variância pode ser aplicada quando os sujeitos podem variar em uma ou mais características que afetem os resultados e seu efeito precise ser ajustado ou quando se quer estudar simultaneamente o efeito de dois ou mais tratamentos diferentes (Montgomery, 2009).

Neste estudo foram determinados dois fatores (tipo de reforço e orientação de impressão) e foram estudados a influência nos resultados dos ensaios de tração, compressão e flexão em quatro pontos. Foram estudados principalmente a resposta a resistência à tração, à compressão e à flexão. O módulo de elasticidade foi analisado para cada ensaio mecânico realizado. Igualmente, foram determinados quatro grupos para o fator de tipo de reforço, sendo, o PLA puro, o PLA reforçado com partículas de alumínio e o PLA reforçado com fibra de curta de vidro e fibras curtas de carbono. No caso do segundo fator (orientação de impressão) dois grupos foram estabelecidos ($0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$).

Para a execução de cada uma das análises de variância (ANOVA) foi considerado um nível de confiança de 95%, equivalente a um valor de P-valor de 0,05. Se o P-valor for maior

que 0,05 não deveria existir diferença significativa entre os valores das propriedades mecânicas influenciados pelos dois fatores em estudo considerados (tipo de reforço e orientação de impressão).

No caso do que o P-valor for menor que 0,05 é considerado estatisticamente que existe uma diferença significativa e uma influência dos fatores determinados nos resultados dos ensaios mecânicos. O percentual de contribuição de cada fator em estudo foi calculado de acordo com a equação 3.10 (Anexo A, B e C). O percentual de contribuição mede a proporção da variância total explicada por cada fator, indicando a magnitude do efeito de cada fator no experimento, independentemente, da variabilidade residual. Os valores de R^2 ajustado mostram ajustes satisfatórios dos dados ao modelo estatístico. O análise de variância (ANOVA) foi realizado no software Minitab versão 17.

$$P_c = \frac{Adj\ SS_1}{Adj\ SS_{total}} \quad (3.10)$$

3.4 Técnica de Correlação Digital de Imagem (CDI)

A técnica de medição ótica de correlação digital de imagem (CDI), foi implementada com a finalidade de obter medidas de deformação dos corpos de prova de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientações de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ-45^\circ$. A técnica CDI registra uma série de imagens a fim de medir os deslocamentos dos pontos na superfície do corpo de prova com distribuição aleatória. Os pontos na superfície deformam-se junto com o material. Para corpos de prova PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientações de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$ foi avaliada a deformação (ϵ_{xx}).

Inicialmente, foi determinada a região onde os pontos foram desenhados. A região foi pintada com tinta spray branca para que os pontos pretos ficassem notáveis na superfície (Figura 3.11a). Os pontos desenhados nos corpos de prova em estudo foram realizados usando tinta spray espalhada diretamente sobre o corpo de prova com o auxílio de cerdas de uma escova de dente (Figura 3.11b).

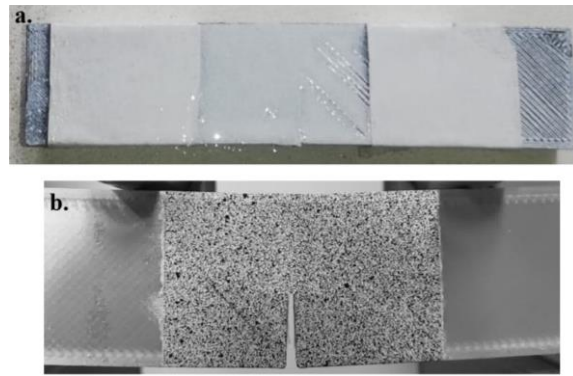


Figura 3.11- a. Preparo do corpo de prova b. Pontos localizados na região de interesse.

O software usado para executar a técnica de correlação de imagens digitais 2D de código aberto foi o Ncorr[®] (MATLAB). Na figura 3.12 pode ser visualizada a montagem aplicada para executar a captação de imagens em 2D dos corpos de prova de PLA puro, PLA-Al, PLA-FC e PLA-FV com orientações de impressão de 0°/90° e 45°/-45 no ensaio de flexão em quatro pontos. Para a montagem foi utilizado um tripé para ajustar adequadamente a altura e a distância entre a câmera e corpo de prova.



Figura 3.12- Montagem do teste para captação de imagens 2D - CID

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de termogravimetria (TGA)

Com objetivo de avaliar as possíveis mudanças térmicas pela adição das fibras curtas de carbono, das fibras curtas de vidro e das partículas de alumínio na matriz de PLA, os corpos de prova foram submetidos a análise de termogravimetria (TGA). Nos resultados da análise de TGA (Figura 4.1), pode ser observado que os corpos de prova de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI apresentam o início da perda de massa em temperaturas similares, indicando que a temperatura de extrusão determinada igual para cada um dos corpos de prova nos parâmetros de impressão, não tem influência nos resultados dos ensaios mecânicos executados no presente estudo. Além disso, pode se concluir que a temperatura de extrusão de 210°C é inferior à temperatura onde os materiais compósitos em estudo começam a se degradar.

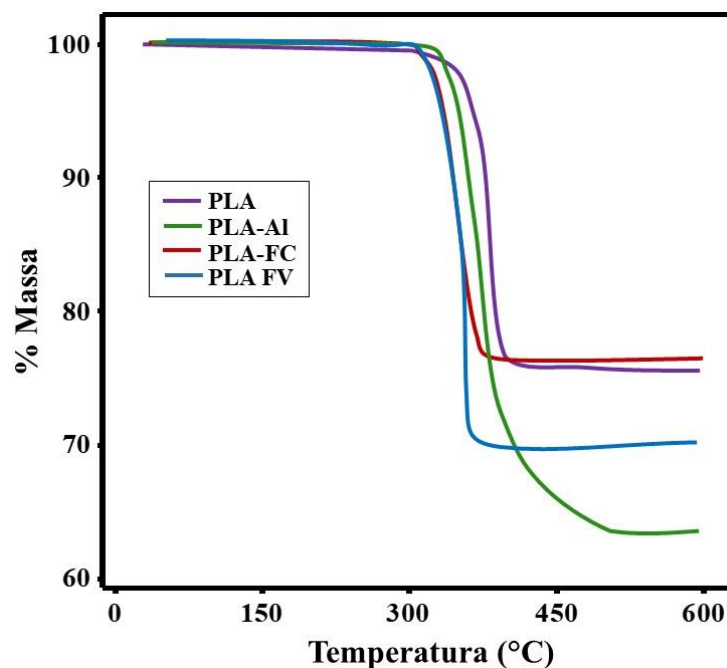


Figura 4.1- Gráfico de análises de Termogravimetria (TGA).

No gráfico de TGA, pode ser observado que nos corpos de prova de PLA-FC e PLA-FV a perda de massa começou em temperaturas de aproximadamente 315°C. No corpo de prova de PLA puro e PLA-AI a perda de massa iniciou-se em temperaturas de aproximadamente 340°C. No corpo de prova de PLA puro a taxa máxima de degradação foi mostrada em uma temperatura de aproximadamente 392°C. A temperatura onde foi dada a degradação total do corpo de prova de PLA-FC foi de aproximadamente 368°C e para o corpo de prova de PLA-

FV de aproximadamente 375°C. O corpo de prova de PLA-Al devido à presença do metal alumínio na matriz polimérica de PLA apresenta uma maior perda de massa comparados com o PLA puro, PLA-FC e PLA-FV. Além disso, a presença de alumínio permite suportar maiores temperaturas antes de se degradar completamente comparados com os outros materiais compósitos em estudo. A temperatura de degradação máxima do corpo de prova de PLA-Al foi de aproximadamente 507°C.

4.2 Análise infravermelho

Com a finalidade de determinar se os materiais compósitos PLA-FV, PLA-Al e PLA-FC tinham as mesmas composições químicas foi realizada a análise infravermelho. Conforme o mostrado na figura 4.2 do espectro de absorção no infravermelho os corpos de prova de PLA-FV, PLA-Al e PLA-FC apresentaram semelhança no espectro com a presença dos picos nas mesmas regiões.

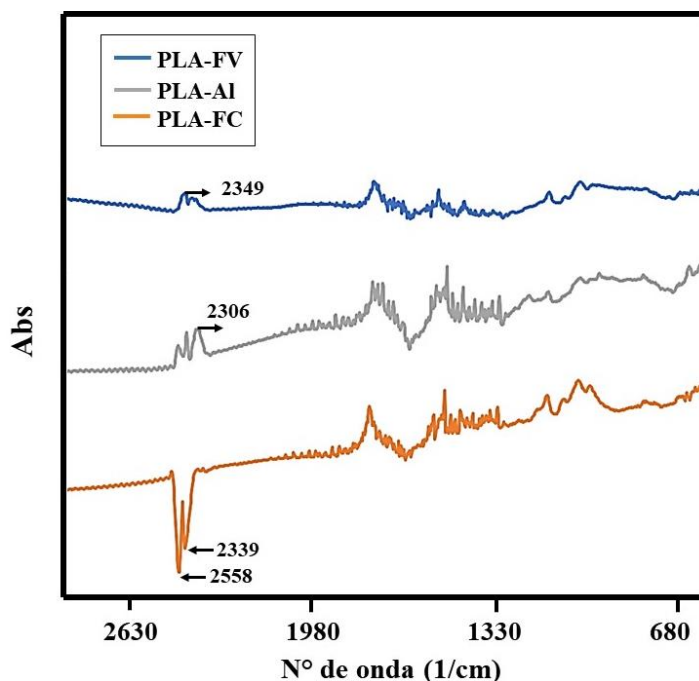


Figura 4.2- Espectro de absorção no infravermelho dos corpos de prova de PLA-FV, PLA-Al e PLA-FV.

Note-se que os maiores picos são mostrados nos pontos 2558 1/cm e 2339 1/cm dos corpos de prova de PLA-FC. Evidenciando assim, a presença de mais carbono, o que implica em interações químicas do tipo dipolo-dipolo ou dipolo induzido que podem favorecer para que o material seja mais flexível. Nos corpos de prova de PLA-FV e PLA-Al, o material é mais

dúctil por apresentar mais interações iônicas, metal Alumínio e o Silício que é de transição. Esse fenômeno pode ser observado no ensaio de tração (Figura 4.6), onde o corpo de prova apresentou o comportamento mais elástico comparado com o PLA puro, PLA-FV e PLA-Al.

4.3 Ensaio de tração

Os resultados obtidos da análise de variância no ensaio de tração para o módulo de elasticidade e a resistência à tração pode ser visualizados no ANEXO A. Os resultados mostraram valores inferiores ao valor de P-valor de 0,05 comprovando a diferença significativa entre as médias e a interação entre o tipo de reforço e a orientação de impressão nos resultados do ensaio (Tabela 4.1). No resultado do módulo de elasticidade no ensaio de tração o fator que apresentou uma maior influência foi o tipo de reforço de 89,36%, seguida da interação entre os dois fatores em estudo com 6,13% e por último orientação de impressão com 4,46%. Na resistência à tração o tipo de reforço mostrou uma maior influência de 91,54%, seguido da orientação de impressão com 6,25%. e da interação entre os dois fatores em estudo com 1,16%. Finalmente, na força máxima o tipo de reforço apresentou o maior valor na porcentagem de contribuição de 91,85%.

Tabela 4.1- Resultados da análise ANOVA – ensaio de tração

Fonte de variação	Módulo de elasticidade		Resistência à tração		Força máxima	
	F-value	P-Valor	F-valor	P-Valor	F-value	P-Valor
Tipo de reforço	18838,30	0.000	939,22	0.000	941,66	0.000
Orientação de impressão	2818,75	0.000	192,43	0.000	193,70	0.000
Tipo de reforço *	1292,56	0.000	11,94	0.000	8,29	0.000
Orientação de impressão						
R ² (Ajustado)		99,94%		98,73%		98,73%

Valores em negrito indicam $p < 0.05$

Os gráficos dos valores médios dos materiais de reforço e a orientação de impressão no módulo de elasticidade, na resistência a tração e na força máxima são mostrados nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. Pode se analisar de acordo com o gráfico que os corpos de prova manufaturados PLA-Al mostraram os maiores valores no módulo de elasticidade e os corpos de prova manufaturados de PLA-FV apresentaram o menor módulo de elasticidade (Figura 4.3). Na figura 4.4 pode ser observado que a maior resistência à tração foi dada para o PLA puro

com orientação de impressão de 45°/-45° e a menor resistência à tração foi mostrada no PLA-FV com uma orientação de impressão de 0°/90°. O maior valor de força máxima foi obtido para o PLA puro para as duas orientações comparado com os outros materiais em estudo (Figura 4.5).

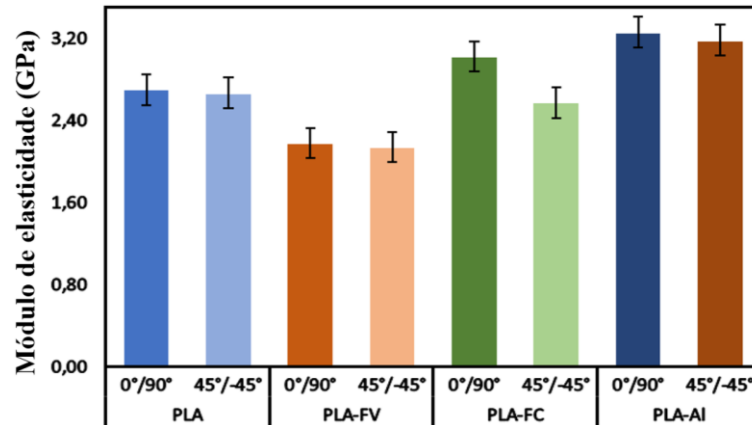


Figura 4.3- Módulo de elasticidade para corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45° - ensaio de tração.

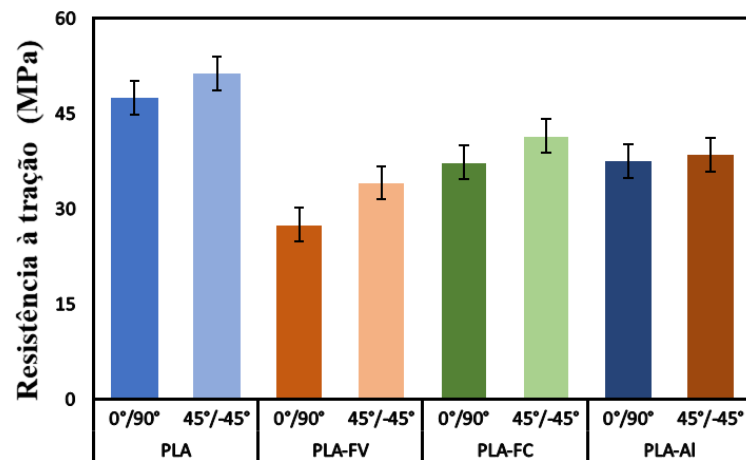


Figura 4.4- Resistência à tração para corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45° - ensaio de tração.

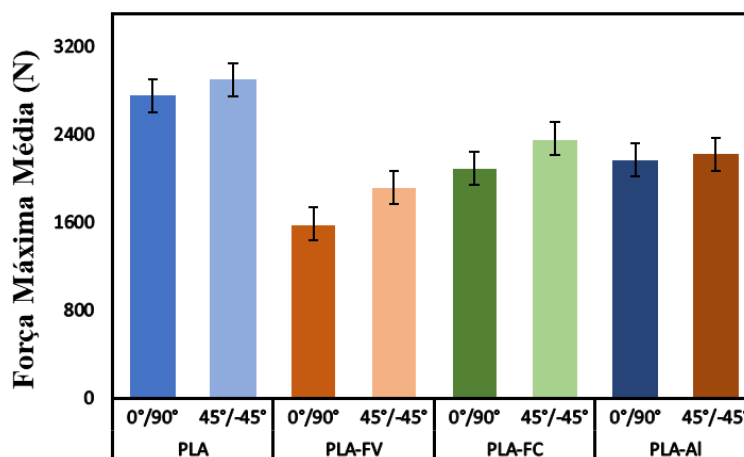


Figura 4.5- Força máxima para corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de tração

As curvas de tensão-deformação do ensaio de tração dos corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45° são apresentadas na figura 4.6. Observe-se que o comportamento inicial do PLA e seus materiais de reforço nas curvas de tensão-deformação, inicialmente seguem a lei de Hooke, mostrando uma deformação proporcional à tensão até o limite de escoamento. Note-se que os materiais estudados não apresentam uma deformação elástica significativa e sua deformação plástica é quase nula mostrando assim um comportamento frágil, excluindo os corpos de prova manufacturados de PLA-FC com uma orientação de impressão de 45°/-45°, os quais, apresentaram uma deformação plástica superior tendo um comportamento dúctil. Nos corpos de prova de PLA-FV com orientação de impressão de 45°/-45° também foi observado um aumento na deformação do que os outros materiais e orientações de impressão em estudo. Para os corpos de prova de PLA puro a orientação de impressão não teve uma influência significativa na resistência à tração e na deformação tendo valores próximos.

A adição das fibras curtas de carbono na matriz de PLA proporcionaram uma maior absorção de energia com uma orientação de impressão 45°/-45°. As fibras curtas de carbono adicionadas permitiram uma reorientação do ângulo de impressão e não permitiu que ocorresse uma rotura apresentando uma deformação plástica. Nesse sentido, pode-se observar que os corpos de prova com orientação de impressão de 45°/-45° mostraram um incremento na resistência à tração nos corpos de prova de PLA, PLA-AI, PLA-FV e PLA-FC. Esse aumento pode ser atribuído às camadas empilhadas de forma alternada com a orientação ideal que os corpos de prova com uma orientação de impressão de 45°/-45° para a direção da carga no ensaio de tração (Huang et al., 2018).

A resistência à tração e a deformação diminuíram para uma orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$. Segundo Dave et al (2020), os valores da resistência à tração podem variar de acordo com a orientação de impressão dos corpos de prova e da direção da carga aplicada, baseados nos modos de falha. Esses modos de falha podem ser entre dois ângulos individuais que se separam ou uma falha individual de cada angulo. Nesse sentido, a força aplicada é perpendicular à direção da orientação de impressão de 90° . A adesão da camada afeta a resistência à tração devido a que a maior parte da força é suportada pela ligação entre as camadas de impressão.

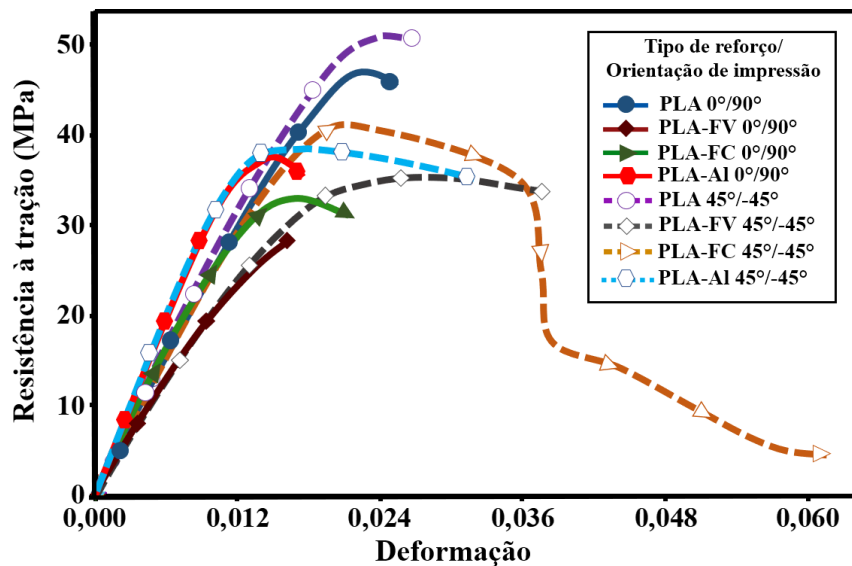


Figura 4.6- Curvas de tensão-deformação obtidas no ensaio de tração para corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com uma orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$.

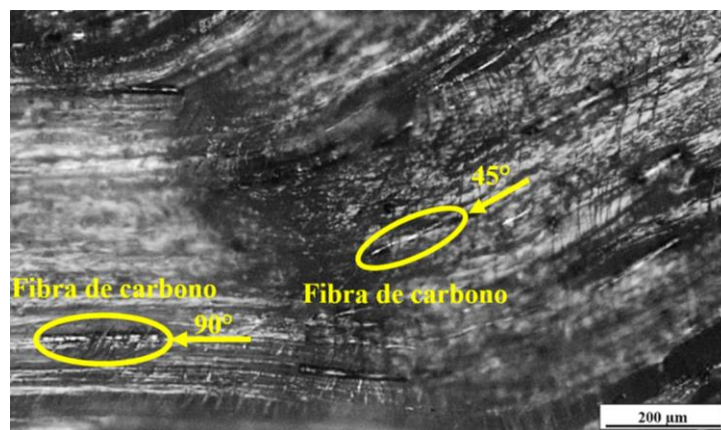


Figura 4.7- Reorientação das fibras curtas de carbono na matriz PLA após o ensaio de tração.

Na figura 4.7, Observe-se como as fibras curtas de carbono mudam o ângulo de 45° para 90° . Goh et al. (2018) afirmam que, inicialmente as fibras curtas não estão alinhadas totalmente

no filamento obtido no processo de extrusão. No entanto, as forças de cisalhamento entre as fibras curtas e as paredes do bocal gera o alinhamento durante o processo de manufatura.

Espera-se que exista uma ligação forte entre a matriz polimérica e às fibras curtas para transferir a carga através do compósito a fim de aumentar suas propriedades mecânicas. No entanto, no processo de modelado por deposição fundida, essa adesão pode ser afetada pelo tratamento térmico que é submetido a matriz de PLA junto com as partículas de alumínio e as fibras de carbono e as fibras de vidro que são adicionadas, quando o filamento de material compósito está sendo extrudado. Igualmente, a resistência à tração pode ser afetada pela composição molecular e morfológica da matriz termoplástica. Além disso, o grau de cristalinidade poderia ter uma influência significativa (Adeniran et al., 2022). Na figura 4.8a e 4.8b pode ser visualizado a presença de vazios na matriz polimérica e a separação da fibra de carbono e de vidro da matriz polimérica sem apresentar ruptura das fibras. Exibindo assim, a falta de ligação entre a matriz polimérica e as fibras curtas de carbono e as fibras curtas de vidro.

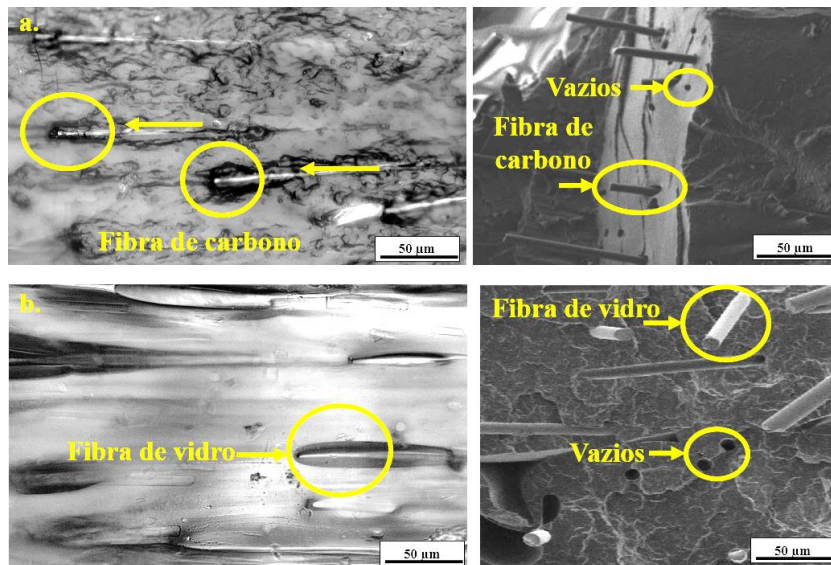


Figura 4.8- a. Fibras curtas de carbono na matriz de PLA e b. Fibra de vidro na matriz de PLA.

Os corpos de prova de PLA, PLA-Al, PLA-FV e PLA-FC foram manufaturados pela técnica FDM sendo constantemente submetido a mudanças drásticas de temperatura. Essas mudanças de temperatura geram uma heterogeneidade prejudicando a ligação entre as camadas levando a uma contração excessiva. Essa contração excessiva faz com que a rigidez dos materiais em estudo diminua (Vaes & Puyvelde, 2021).

Saiba-se que a distribuição e o tamanho não homogêneos das partículas de alumínio na matriz polimérica alteram na contração do compósito durante o seu resfriamento. Os vazios existentes entre as camadas de impressão também resultam nessa mudança no comportamento mecânico do compósito. Igualmente, nas peças manufaturadas pela técnica FDM com materiais metálicos, há uma distorção geométrica decorrente das tensões residuais de natureza térmica durante a fabricação dos corpos de prova.

O grau de distorção geométrica também é gerado pelas propriedades físicas, químicas e mecânicas do material metálico, como o coeficiente de expansão, a condutibilidade térmica, o limite de escoamento, o módulo de elasticidade, entre outros (DebRoy et al., 2018). Na figura 4.9a pode ser observado a heterogeneidade das partículas de alumínio na matriz polimérica. Na figura 4.9b, o mapa da distribuição das partículas de alumínio na matriz de PLA é mostrado e na figura 4.9c, as partículas de alumínio podem ser vistas com um zoom maior.

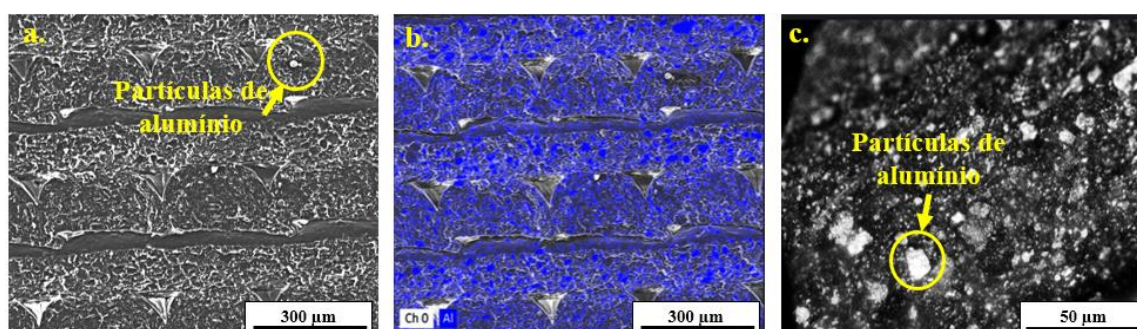


Figura 4.9- Partículas de Al na matriz PLA após o ensaio de tração. a. heterogeneidade das partículas de alumínio na matriz polimérica, b. o mapa da distribuição das partículas de alumínio na matriz de PLA e c. Partículas de alumínio.

Na tabela 4.2, são descritos os valores das médias obtidas e o desvio padrão dos resultados obtidos do ensaio de tração. Na resistência à tração os maiores valores foram obtidos nos corpos de prova de PLA puro com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ ($47,45 \pm 1,28$ MPa) e $45^\circ/-45^\circ$ ($50,83 \pm 0,92$ MPa). Pode ser analisado que a adesão de material de reforço na matriz polimérica de PLA não proporciona um ganho na resistência à tração.

Este comportamento pode ser atribuído ao fato que o material compósito possui uma heterogeneidade devido a distribuição das fibras curtas que são adicionadas quando é fabricado o filamento. Além disso, a ligação entre as camadas pode ser afetada pelas partículas de alumínio e as fibras de vidro e as fibras de carbono adicionadas na matriz de PLA fazendo com

que a aderência entre os materiais seja fraca e não permita uma adequada dissipação da energia para suportar maiores tensões.

Observe-se que com a adição das partículas de alumínio na matriz polimérica o módulo de elasticidade teve um aumento comparado com o PLA puro obtendo um valor de $(3,25 \pm 0,03$ GPa) para o PLA-Al com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$. Esse aumento deve-se à maior rigidez dada pela orientação de impressão no sentido da carga aplicada gerando uma melhor absorção das tensões.

Porem, os corpos de prova com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ apresentam menor tenacidade. Os corpos de prova manufaturados uma orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$, podem suportar menores quantidades de carga pelo ângulo gerado com a direção da carga. Além disso, a adição de partículas de alumínio e de fibras curtas de vidro e fibras de carbono permitem uma melhor distribuição das tensões na matriz polimérica (Anwer & Naguib, 2018).

Tabela 4.2- Resultado das propriedades de tração

Tipo de reforço e orientação de impressão	Módulo de elasticidade GPa	Resistência à tração MPa	Força Máxima Média (N)	Alongamento
PLA $0^\circ/90^\circ$	$2,70 \pm 0,08$	$47,45 \pm 1,28$	$2793,53 \pm 70,89$	$0,025 \pm 0,002$
PLA-FV $0^\circ/90^\circ$	$2,17 \pm 0,06$	$28,06 \pm 0,72$	$1616,03 \pm 41,27$	$0,016 \pm 0,001$
PLA-FC $0^\circ/90^\circ$	$3,05 \pm 0,07$	$32,97 \pm 0,62$	$2087,25 \pm 206,35$	$0,021 \pm 0,001$
PLA-Al $0^\circ/90^\circ$	$3,25 \pm 0,03$	$37,67 \pm 1,30$	$2187 \pm 73,82$	$0,017 \pm 0,001$
PLA $45^\circ/-45^\circ$	$2,67 \pm 0,06$	$50,83 \pm 0,92$	$2944,69 \pm 49,90$	$0,027 \pm 0,01$
PLA-FV $45^\circ/-45^\circ$	$2,14 \pm 0,14$	$33,63 \pm 1,47$	$1917,59 \pm 81,78$	$0,039 \pm 0,003$
PLA-FC $45^\circ/-45^\circ$	$2,59 \pm 0,06$	$41,30 \pm 0,96$	$2335,22 \pm 53,83$	$0,061 \pm 0,01$
PLA-Al $45^\circ/-45^\circ$	$3,18 \pm 0,07$	$38,53 \pm 1,05$	$2248,91 \pm 59,79$	$0,032 \pm 0,004$

Na Figura 4.10, pode ser visualizado o arrancamento das fibras curtas de carbono da matriz polimérica após o ensaio de tração (setas amarelas). Evidencia-se a ligação inadequada entre a fibra e a matriz indicando a deficiência da transferência de tensões no compósito polimérico. Essa deficiência na adesão e na distribuição das tensões faz com que os corpos de prova reforçados com fibra de vidro e de carbono não absorvam a carga necessária que permita

obter maiores valores na resistência a tração do que o PLA puro. Além disso, note-se os vazios presentes na matriz polimérica resultantes do desprendimento entre as fibras e a matriz de PLA. Finalmente, percebe-se a ruptura das fibras de carbono e de vidro.

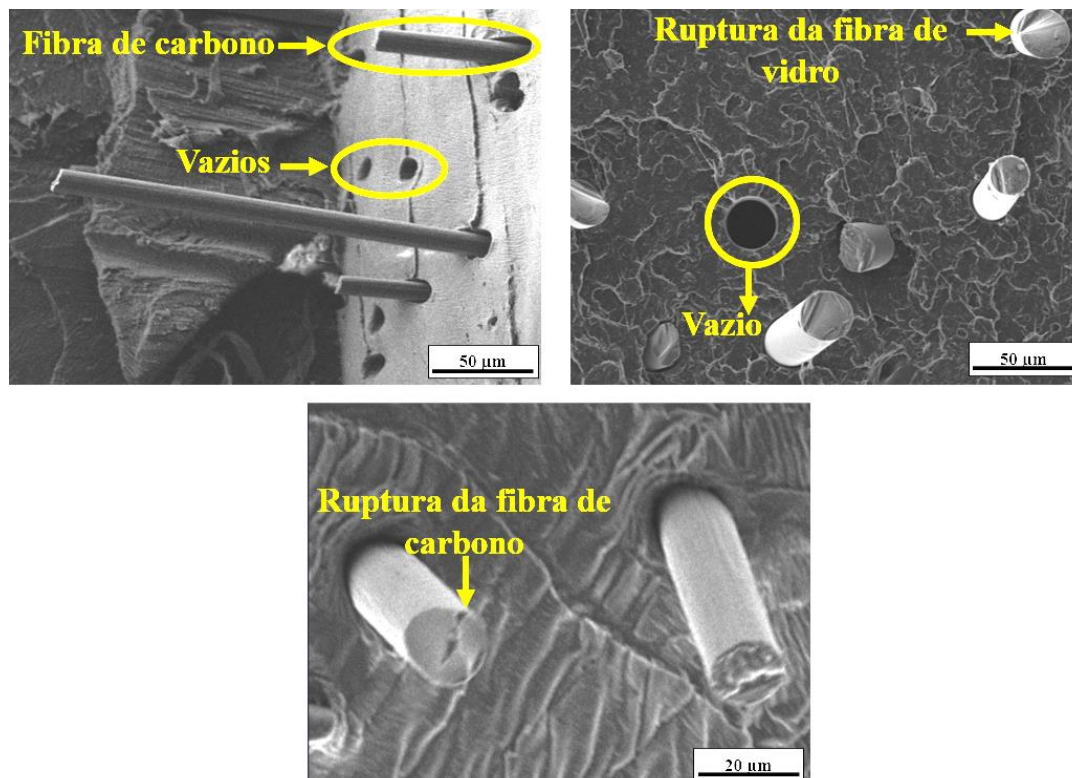


Figura 4.10- Microestrutura da fratura dos corpos de prova manufacturados de PLA-FC e PLA-FV no ensaio de tração.

4.4 Ensaio de compressão

Os resultados da análise de variância do ensaio de compressão podem ser visualizados no ANEXO B. No módulo de elasticidade a orientação de impressão tiveram um P-valor maior do que 0,05 mostrando que não tem uma diferença significativa entre as medias (Tabela 4.3). O parâmetro com maior influência é o tipo de reforço com um 76,28% seguido da interação entre os fatores com 17,67%.

Na resistência à compressão a orientação de impressão, o tipo de reforço e a interação entre os dois fatores apresentaram valores de P-valor menores de 0,05 demonstrando que os valores entre as medias são significativamente diferentes e apresentam uma grande influência na resposta das variáveis estudadas. Dessa forma, o tipo de preenchimento mostrou ser o parâmetro com maior influência no resultado do ensaio de compressão com 97,52%.

Tabela 4.3- Resultados da análise ANOVA – ensaio de compressão

Fonte de variação	Módulo de elasticidade		Resistência à compressão	
	F-valor	P-valor	F-valor	P-valor
Tipo de reforço	151.27	0.000	1705.81	0.000
Orientação de impressão	0.000	0.974	33.27	0.000
Tipo de reforço * Orientação de impressão	35.05	0.000	14.61	0.000
R ² (Ajustado)		93,95%		99,31%

O análise de variância realizado para os valores dados no ensaio de compressão, no qual, foram estudados o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, mostraram os maiores valores para os corpos de prova de PLA com uma orientação de impressão de 0°/90°. Os menores valores foram dados para os corpos de prova de PLA reforçadas com fibras curtas de carbono com uma orientação de impressão de 0°/90°. Nas figuras 4.11 e 4.12 podem ser observados os resultados do ensaio de compressão.

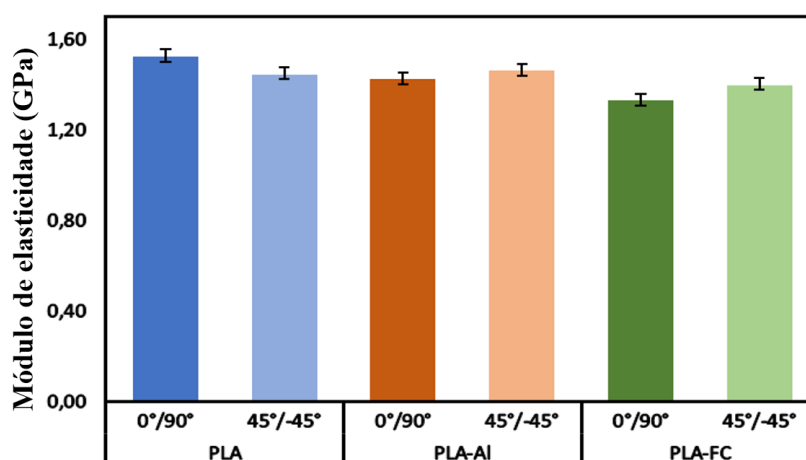


Figura 4.11- Módulo de elasticidade para corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-Al e PLA-FC com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de compressão.

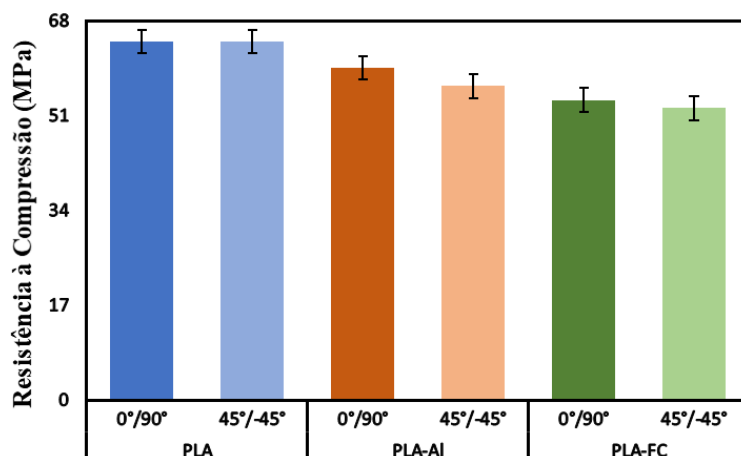


Figura 4.12- Resistência à compressão para corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-Al e PLA-FC com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de compressão.

Na figura 4.13, pode ser observado os gráficos de tensão-deformação para o ensaio de compressão dos corpos de prova de PLA, PLA-Al e PLA-FC com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°. Inicialmente, o gráfico de tensão-deformação mostra instabilidade, mas com pouca variação nos resultados para os dois tipos de orientação de impressão.

Esse comportamento pode ser explicado pelos vazios que ocorrem quando os corpos de prova são manufacturados pela tecnologia FDM. Quando o material é depositado, são geradas separações entre cada camada devido à variação de temperatura, fazendo com que elas não se aderem completamente. Desta forma, quando a força de compressão é aplicada inicialmente há uma acomodação entre as camadas até gerar um atrito interno entre as fibras permitindo que a tensão seja homogênea.

No gráfico pode ser observado que os corpos de prova manufacturados de PLA puro com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45° apresentaram uma menor deformação para realizar o fechamento dos vazios entre as camadas. Caso contrário ocorreu para os corpos de prova manufacturados de PLA-Al e PLA-FC, os quais, apresentaram maiores deformações. Finalmente, note-se que os corpos de prova de PLA-Al se deformaram plasticamente obtendo as maiores deformações para gerar o preenchimento dos vazios entre as camadas.

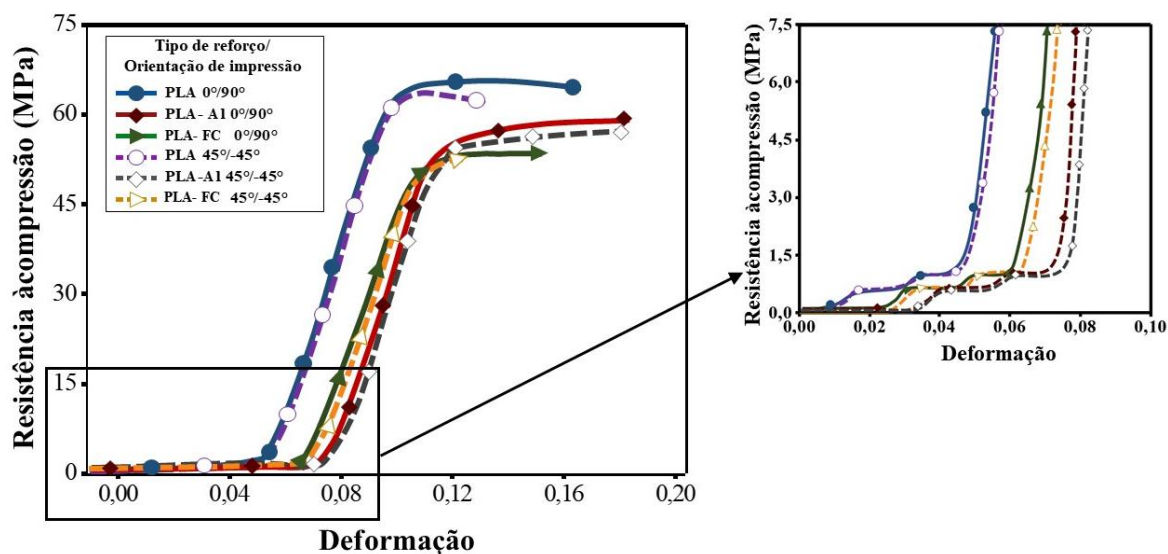


Figura 4.13- Curvas de tensão-deformação obtidas no ensaio de compressão para corpos de prova manufacturados de PLA-PLA-A1 e PLA-FC com orientação de impressão 0°/90° e 45°/-45°.

Observa-se que o ensaio de compressão mostrou maiores valores ao ser comparado com o ensaio de tração. O ensaio de compressão apresenta uma maior capacidade de deformação plástica ajudando na redistribuição das tensões das falhas diminuindo a propagação de trincas (Adeniran et al., 2021). A força de compressão axial tende a fechar os vazios entre as camadas impressas, tornando o corpo de prova mais compacto, resultando em maiores valores de tensão. O fechamento dos vazios influenciou diretamente no módulo de elasticidade, tornando os valores menores que os obtidos no ensaio de tração. No ensaio de compressão uniaxial, os materiais avaliados apresentaram maiores deformações, auxiliando na redistribuição de tensões e modos de falha, e reduzindo a ocorrência de trincas (Adeniran et al., 2021).

De acordo com os resultados do ensaio de tração (Tabela 4.2) e os resultados do ensaio de compressão (Tabela 4.4) os corpos de prova manufacturados apresentam um comportamento anisotrópico dado pela variação dos valores obtidos no módulo de elasticidade tendo uma diminuição quando os corpos de prova foram submetidos a forças de compressão. A maior resistência à compressão foi obtida para os corpos de prova de PLA puro mostrando valores próximos para as duas orientações de impressão (0°/90° e 45°/-45°).

O menor valor de resistência à compressão foi dado para os corpos de prova de PLA reforçado com fibras curtas de carbono. Como afirmado anteriormente, a orientação de impressão não influenciam significativamente na variação dos resultados. Porém, pode-se

afirmar que com a adição das partículas de alumínio e as fibras curtas de carbono podem afetar significativamente as propriedades de ligação do material compósito depositado, gerando a presença de vazios (Figura 4.14). Nesse sentido, pode-se concluir que a ligação existente entre o PLA puro, as partículas de alumínio e fibras curtas de carbono determina a resistência à compressão. Na tabela 4.4 pode ser visualizado as medias e o desvio padrão dos resultados obtidos no ensaio de compressão.

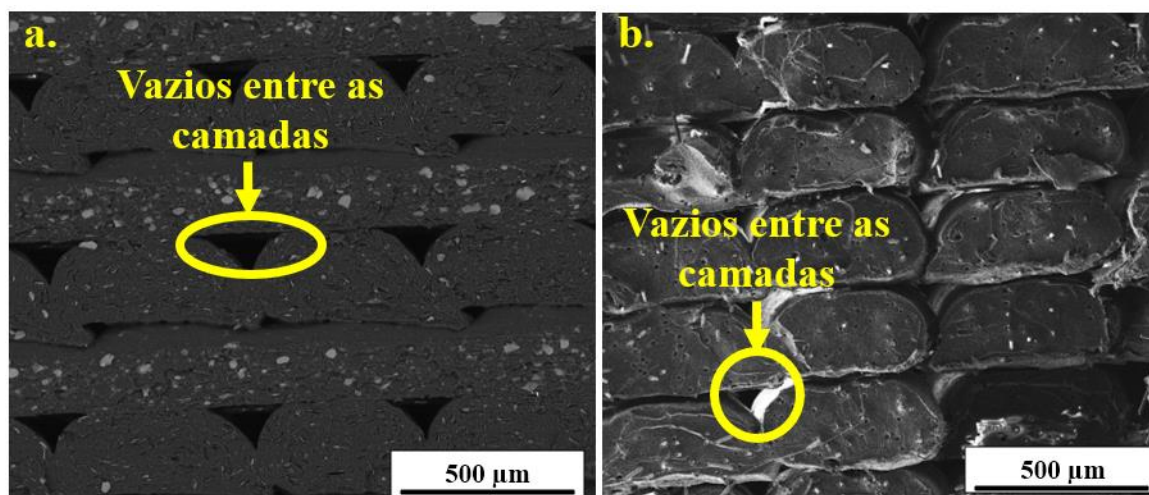


Figura 4.14- Formação de vazios entre as camadas que compõem a estrutura. a. PLA-Al e b. PLA-FC.

Tabela 4.4- Resultado das propriedades de compressão

Tipo de reforço e orientação de impressão	Módulo de elasticidade	Resistência à compressão
	GPa	MPa
PLA 0°/90°	1,53 ± 0,04	65,55 ± 1,16
PLA-Al 0°/90°	1,43 ± 0,13	59,06 ± 1,09
PLA-FC 0°/90°	1,34 ± 0,04	53,27 ± 0,66
PLA 45°/-45°	1,45 ± 0,04	63,55 ± 1,59
PLA-Al 45°/-45°	1,46 ± 0,05	56,89 ± 0,36
PLA-FC 45°/-45°	1,41 ± 0,01	52,31 ± 0,27

4.5 Ensaio de flexão em quatro pontos

O análise de variância (ANOVA) dos resultados do ensaio de flexão em quatro pontos pode ser visualizado na tabela 4.5. Foram considerados dois fatores (Tipo de reforço e

orientação de impressão) para analisar a diferença nas medias dos resultados obtidos no ensaio. Os resultados da análise (ANOVA) mostraram valores inferiores do P-valor de 0,05. O fator que teve maior influência nos resultados obtidos foi a orientação de impressão no módulo de flexão (97,40%). Na resistência à flexão a porcentagem de contribuição apresentaram valor similares. O maior valor foi dado para o tipo de reforço com 35,30%, seguido da orientação de impressão com 32,61% e finalmente a interação entre os dois fatores em estudo com 29,98%. Na força máxima, o tipo de reforço apresentou a maior porcentagem de contribuição (42,91%).

Tabela 4.5- Resultados da análise ANOVA – ensaio de flexão em quatro pontos.

Fonte de variação	Módulo de flexão		Resistência à flexão		Força máxima	
	F-value	P-Valor	F-Valor	P-Valor	F-Valor	P-Valor
Tipo de reforço	4349,52	0,000	178,60	0,000	205,97	0,000
Orientação de impressão	205,64	0,000	494,98	0,000	388,69	0,000
Tipo de reforço * Orientação de impressão	36,96	0,000	151,69	0,000	133,86	0,000
R ² (Ajustado)		99,71%		97,43%		97,29%

Valores em **negrito** indicam $p < 0.05$

Nos resultados do teste de flexão em quatro pontos (Figura 4.15, 4.16 e 4.17), os maiores valores no modulo de flexão foram dados para o PLA-FC e PLA-FV com uma orientação de impressão de 0°/90°. O menor valor para o modulo de flexão foi mostrado para o PLA-AI com orientação de impressão de 45°/-45°. Os valores no modulo de flexão para os corpos de prova manufaturados de PLA puro apresentaram valores próximos independente da orientação de impressão.

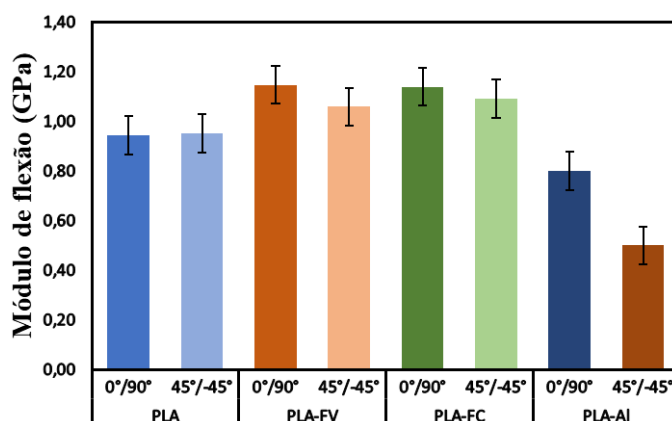


Figura 4.15- Modulo de flexão para corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de flexão em quatro pontos.

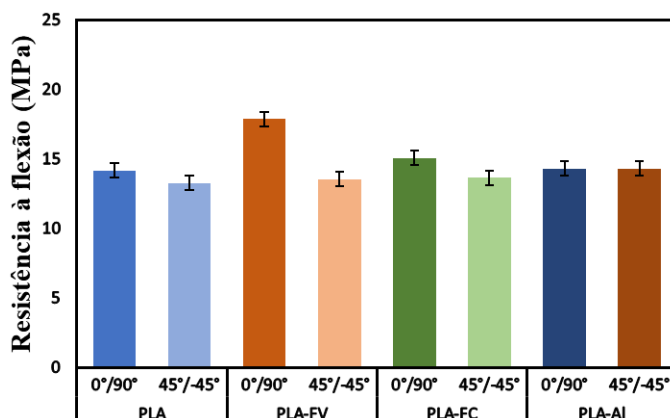


Figura 4.16- Resistencia à flexão para corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de flexão em quatro pontos.

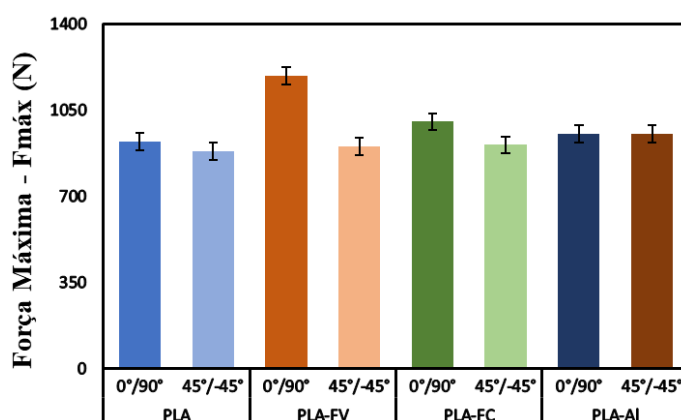


Figura 4.17- Força máxima media corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°- ensaio de flexão em quatro pontos.

Os corpos de prova manufacturados de PLA puro, PLA-FV e PLA-FC com orientação de impressão de 0°/90° apresentaram maiores valores no módulo de flexão, força máxima e resistência à flexão em comparação aos corpos de prova manufacturados com orientação de impressão de 45°/-45°. Foi observado o aumento na resistência à flexão dos corpos de prova de PLA-FC e PLA-FV em comparação com os corpos de prova de PLA puro. Pode ser evidenciado que tanto na força máxima como na resistência à flexão os corpos de prova manufacturados de PLA-FV com orientação de impressão de 0°/90° mostraram os maiores valores comparados com o PLA puro, o PLA-FC e o PLA-AI.

O maior valor na resistência à flexão pode ser observado para os corpos de prova de PLA-FV com orientação de impressão de 0°/90° ($17,79 \pm 0,46$ MPa). Evidencie-se o aumento na resistência à flexão para os corpos de prova de PLA-FV de 24,23% que os corpos de prova de PLA puro, de 18,52% do que os corpos de prova de PLA-FC e de 24,75% do que os corpos de prova de PLA-AI. A menor resistência à flexão foi dada nos corpos de prova manufaturados de PLA puro com orientação de impressão de 45°/-45°.

No modulo de flexão para os corpos de prova manufaturados com uma orientação de impressão de 0°/90° o maior valor foi mostrado no corpo de prova de PLA-FV sendo superior em um 17,34% do que o PLA puro 0°/90°, 1,76% do que o PLA-FC 0°/90° e 61,97% do que o PLA-AI 0°/90°. Os resultados do modulo de elasticidade para os corpos de prova de PLA puro, PLA-FV e PLA-FC com orientação de impressão de 45°/-45° apresentaram valores próximos. Porém, o menor valor mostrado no modulo de flexão foi obtido no corpo de prova de PLA-AI com orientação de impressão de 45°/-45° sendo inferior em um 42,30% do que o PLA puro, 40,59% do que o PLA-FV e 44,44% do que o PLA-FV com orientação de impressão de 45°/-45°. A maior força máxima foi dada para os corpos de prova manufaturados de PLA-FV com orientação de impressão de 0°/90° (1186,66 N). A força máxima para os corpos de prova de PLA-FV obtiveram um ganho de 21,65% quando foi comparado com o PLA puro 0°/90°, de 18,56% do que os corpos de prova de PLA-FC 0°/90° e de 24,82% do que os corpos de prova de PLA-AI 0°/90°.

Tabela 4.6- Resultado das propriedades de flexão em quatro pontos.

Tipo de reforço e orientação de impressão	Módulo de flexão GPa	Resistência à flexão MPa	Força Máxima Média (N)	Alongamento
PLA 0°/90°	$0,98 \pm 0,23$	$14,32 \pm 3,48$	$975,46 \pm 232,13$	$0,049 \pm 0,01$
PLA-FV 0°/90°	$1,15 \pm 0,07$	$17,79 \pm 0,46$	$1186,66 \pm 30,29$	$0,046 \pm 0,01$
PLA-FC 0°/90°	$1,13 \pm 0,06$	$15,01 \pm 0,21$	$1000,84 \pm 14,11$	$0,044 \pm 0,01$
PLA-AI 0°/90°	$0,71 \pm 0,16$	$14,26 \pm 0,25$	$950,69 \pm 16,88$	$0,051 \pm 0,01$
PLA 45°/-45°	$1,04 \pm 0,11$	$13,23 \pm 0,70$	$882,57 \pm 46,62$	$0,055 \pm 0,01$
PLA-FV 45°/-45°	$1,01 \pm 0,08$	$13,70 \pm 0,44$	$913,72 \pm 29,06$	$0,047 \pm 0,01$
PLA-FC 45°/-45°	$1,08 \pm 0,08$	$13,58 \pm 0,50$	$906,06 \pm 33,66$	$0,046 \pm 0,01$
PLA-AI 45°/-45°	$0,60 \pm 0,14$	$14,65 \pm 0,62$	$976,75 \pm 41,31$	$0,042 \pm 0,01$

A curva de resistência à flexão-deformação dos resultados obtidos no ensaio de flexão de quatro pontos pode ser visualizada na figura 4.18. O aumento da resistência à flexão pode ser atribuído ao aumento da transferência de carga na estrutura pela adição de 20% em peso de fibra de carbono e de fibra de vidro na matriz de PLA. De acordo com Zhang et al. (2019), a adição de fibra na matriz polimérica reduz a concentração de tensões e conseqüentemente aumenta a rigidez. Este fenômeno é comum para compósitos poliméricos reforçados com fibras porque as fibras têm menor ductilidade que a matriz polimérica e restringem a deformação antes da ruptura.

Visualize-se que os corpos de prova manufaturados com uma orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ apresentaram maiores valores na resistência à flexão do que os corpos de prova com orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$. Rajpurohit et al. (2018), observaram que os corpos de prova manufaturados com uma orientação de impressão de 0° mostravam uma maior resistência à flexão. Esse comportamento foi atribuído a que a orientação de impressão de 0° exibe uma ligação intercamada mais forte em comparação com os outros ângulos de impressão (45° e 90°).

Além disso, as camadas depositadas com orientação de impressão de 0° são paralelas ao plano de flexão fornecendo uma maior resistência à flexão. A microscopia obtida, revelou que a falha começa no lado das forças de tração geradas. No entanto, a falha não se propaga devido à compensação feita pelas forças compressivas. A força de compressão permite manter a união entre as camadas e conseqüentemente aumentar a resistência à flexão. Sabe-se que, no ensaio de flexão em quatro pontos, é gerada flexão pura na seção central do corpo de prova. Isto significa que nenhum esforço cortante é produzido e, portanto, as tensões de cisalhamento são nulas; por conseguinte, os corpos de prova são submetidos apenas a esforços trativos. Como o material compósito de PLA-FC e PLA-FV está sujeito a esforços trativos, as fibras de carbono e de vidro conseguem dissipar a carga e restringir a deformação na matriz, reduzindo, assim, a concentração de tensões e aumentando a resistência à flexão.

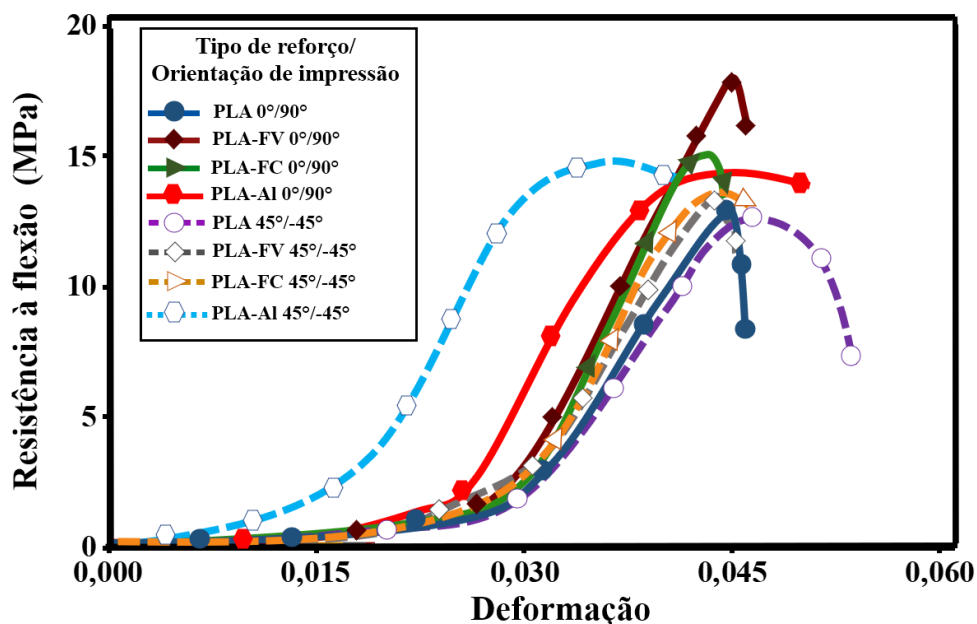


Figura 4.18- Curvas tensão-deformação de flexão em quatro pontos para os corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FC e PLA-FV com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°.

Na tabela 4.7, são mostrados os resultados da análise de variância (ANOVA) dos valores calculados do valor crítico do fator de intensidade de tensão K_{IC} . A análise de variância apresentou valores de P-valor menores do que o 0,05. Constatou-se que as médias geradas nos resultados do ensaio de flexão em quatro pontos são significativamente diferentes. O maior fator que influencia nos resultados do K_{IC} segundo a ANOVA foi dado para o tipo de reforço (34,50%), seguido da orientação de impressão (34,37%) e por último a interação entre o tipo de reforço e a orientação de impressão (28,90%).

Tabela 4.7- Resultados da análise ANOVA – ensaio de flexão em quatro pontos - (K_{IC}).

Fonte de variação	K_{IC}	
	F-valor	P-Valor
Tipo de reforço	165,31	0,000
Orientação de impressão	494,06	0,000
Tipo de reforço * Orientação de impressão	138,47	0,000
R^2 (Ajustado)		97,29%

Valores em negrito indicam $p < 0.05$

Os maiores valores foram dados para os corpos de prova manufacturados com uma orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ do que os corpos de prova manufacturados com uma orientação de $45^\circ/-45^\circ$ para cada um dos materiais em estudo (Figura 4.19). Os corpos de prova manufacturados de PLA puro e PLA-FC apresentaram valores próximos. O maior valor de K_{IC} foi mostrado para os corpos de prova manufacturados de PLA-FV com uma orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$.

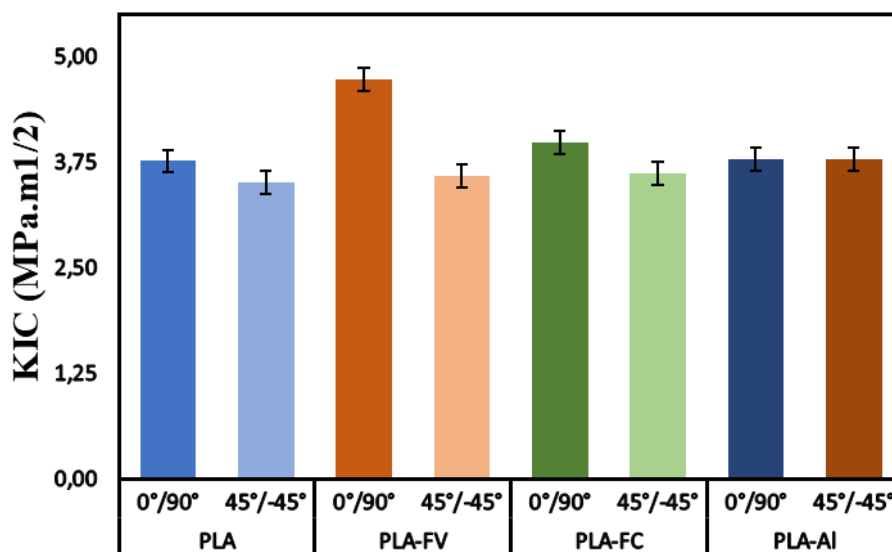


Figura 4.19- Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos para os corpos de prova manufacturados de PLA, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$. K_{IC} .

Os valores das medias e o desvio padrão do fator de intensidade de tensão K_{IC} foram calculados usando a equação 1 e 2 e são mostrados na tabela 4.8. Observe-se que o maior valor do K_{IC} foi mostrado para nos corpos de prova de PLA-FV com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ ($4,71 \pm 0,12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) sendo superior em um 21,39% do que os corpos de prova de PLA puro, de 18,34% do que os corpos de prova de PLA-FC e de 24,60% com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$.

Os corpos de prova com orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$ obtiveram valores do K_{IC} similares. O menor valor do K_{IC} foi dado para os corpos de prova de PLA puro com uma orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$ ($3,51 \pm 0,19 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

Tabela 4.8- Valores de K_{IC} - ensaio de flexão em quatro pontos.

Tipo de reforço e orientação de impressão	K_{IC} (MPa. m ^{1/2})
PLA 0°/90°	3,88 ± 0,19
PLA-FV 0°/90°	4,71 ± 0,12
PLA-FC 0°/90°	3,98 ± 0,06
PLA-AI 0°/90°	3,78± 0,01
PLA 45°/-45°	3,51 ± 0,19
PLA-FV 45°/-45°	3,63 ± 0,12
PLA-FC 45°/-45°	3,60 ± 0,13
PLA-AI 45°/-45°	3,77± 0,03

Na figura 4.20a e 4.20b pode ser observado o espaçamento entre as camadas dos corpos de prova manufaturados de PLA puro com orientação de impressão de 0°/90° e 45°/-45°. A fratura nos corpos de prova de PLA puro com orientação de impressão de 0°/90° inicia-se e propaga-se de forma linear entre as paredes internas do entalhe da peça manufaturada (Figura 4.20c). Verifique-se na figura 4.20e dos corpos de prova de PLA puro com orientação de impressão de 0°/90° que as tensões trativas são maiores na base da fratura e propaga-se entre as camadas manufaturadas.

Nos corpos de prova manufaturados de PLA puro com orientação de impressão de 45°/-45° a fratura foi dada entre as camadas e tem início simultaneamente em duas regiões distintas (Figura 4.20d). A fratura nos corpos de prova manufaturados de PLA puro 45°/-45° propaga-se em duas etapas denominadas etapa a e etapa b. Na etapa a, a propagação da fratura foi gerada entre as camadas manufaturadas. Na etapa b, a fratura produzida rompe as camadas manufaturadas com uma orientação de impressão de 45° (intracamadas) realizando um formato em “S”.

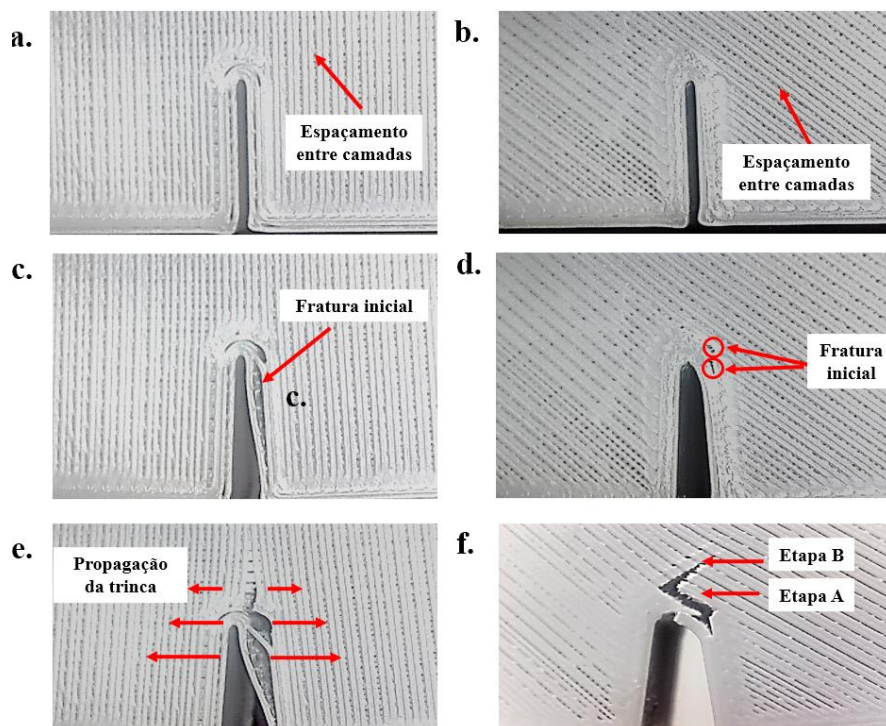


Figura 4.20- a. PLA puro $0^{\circ}/90^{\circ}$ b. PLA puro $45^{\circ}/-45^{\circ}$

A ruptura dos corpos de prova de PLA-FC com orientação de impressão de $0^{\circ}/90^{\circ}$ (Figura 4.21a) e $45^{\circ}/-45^{\circ}$ (Figura 4.21b) foi atribuída a tensões de tração, que tenderam a se propagar linearmente entre as camadas manufaturadas. O início da fratura ocorreu em duas áreas dos espécimes, nomeadamente nos raios interno e externo da curvatura do entalhe. Notavelmente, a fratura mais extensa foi observada no raio interno da curvatura do entalhe. A região analisada por microscopia na zona de fratura é delimitada pelo retângulo vermelho na Figura 4.21c. A fratura das fibras de carbono seguiu a direção paralela às tensões de tração induzidas durante o ensaio de flexão em quatro pontos.

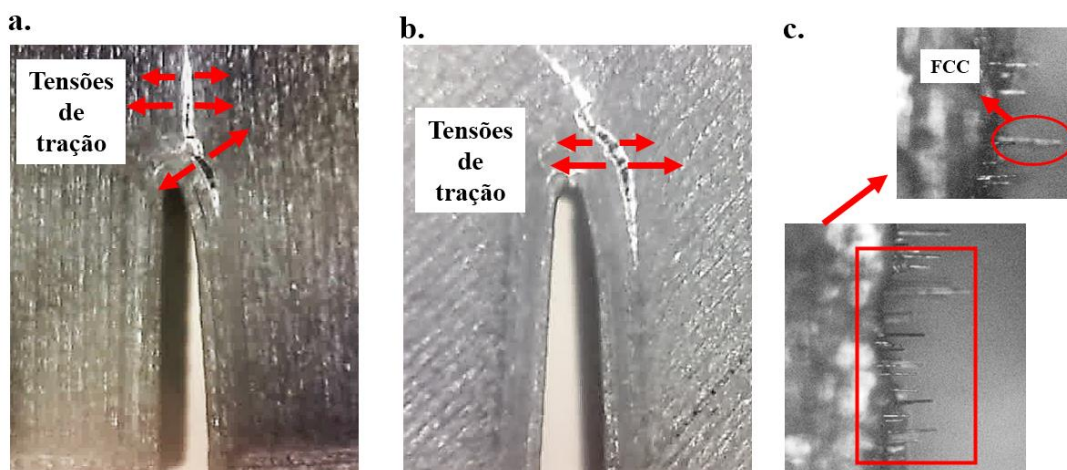


Figura 4.21- a. PLA-FC- $0^{\circ}/90^{\circ}$ b. PLA-FC- $45^{\circ}/-45^{\circ}$ C. Fibras de carbono.

A fratura dos corpos de prova de PLA-FV, manufaturados com orientação de $0^\circ/90^\circ$ (Figura 4.22a) e $45^\circ/-45^\circ$ (Figura 4.22b), iniciou-se em uma única região no ponto de aplicação de força máxima. Este comportamento pode ser atribuído à maior adesão intercamada. As maiores tensões de tração concentraram-se perto do comprimento médio da fratura. A propagação da fratura nos corpos de prova ocorreu de forma linear entre as camadas até a fratura completa. Conforme representado dentro do retângulo vermelho, as fibras de vidro quebradas alinharam-se paralelamente às tensões de tração desenvolvidas durante o teste de flexão de quatro pontos (Figura 4.22c).

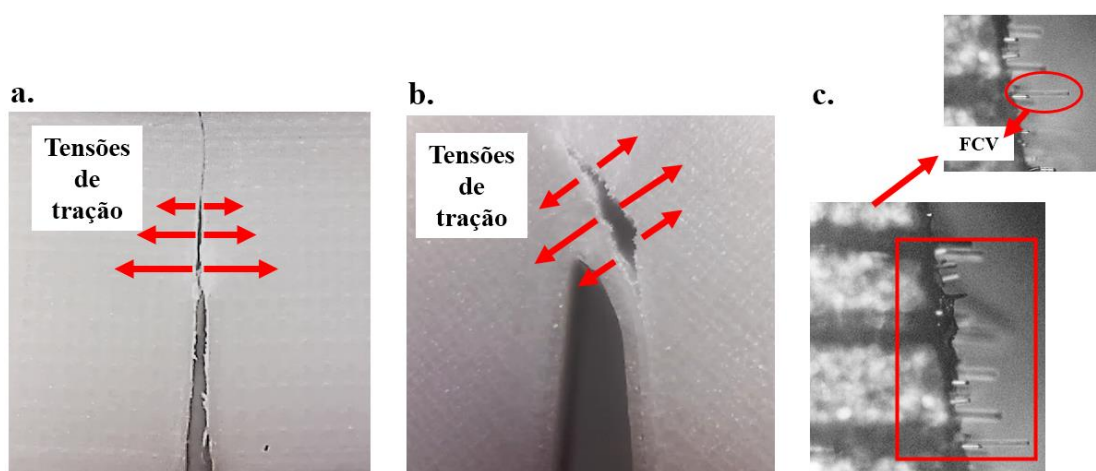


Figura 4.22- a. PLA-FV- $0^\circ/90^\circ$ b. PLA-FV- $45^\circ/-45^\circ$ C. Fibras de vidro.

4.6 Correlação digital de imagem

As deformações dos corpos de prova em estudo (PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-Al) foram analisadas usando a técnica de correlação digital de imagem (CDI). A maior deformação foi mostrada para o PLA puro com uma orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ com um valor de 0,149 quando a força máxima foi aplicada. Detalhe-se que a maior deformação foi apresentada na parte superior do entalhe manufaturado (Figura 4.23). Essa deformação foi gerada de forma contrária ao corpo de prova experimental. No corpo de prova experimental, as maiores deformações ocorreram na parede interna do entalhe. Ressalta-se que os corpos de prova manufaturados de PLA puro apresentaram vazios entre as camadas depositadas. Esses vazios podem gerar comportamentos mecânicos dissimilares e que os *speckles* realizados não foram adequados. Nos ensaios de flexão em quatro pontos, os corpos de prova manufaturados de PLA com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$, apresentaram fratura completa quando a força máxima foi atingida, evidenciando assim, um comportamento frágil.

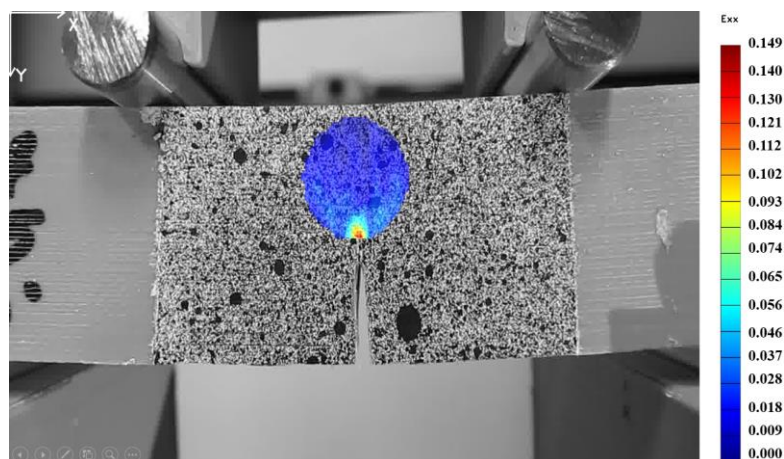


Figura 4.23- CDI do corpo de prova manufactured de PLA puro com orientação de impressão de $0^{\circ}/90^{\circ}$.

Na figura 4.24, pode ser observado a região de maior deformação do PLA com orientação de impressão de $45^{\circ}/-45^{\circ}$. A deformação foi apresentada na parede interna do defeito (deslocado mais para a direita). O valor da deformação (0.142) foi próximo ao valor mostrado para o corpo de prova com orientação de impressão de $0^{\circ}/90^{\circ}$. O corpo de prova manufatura de PLA puro com orientação de impressão de $45^{\circ}/-45^{\circ}$ não apresentou fratura completa como foi observado no corpo de prova de PLA $0^{\circ}/90^{\circ}$.

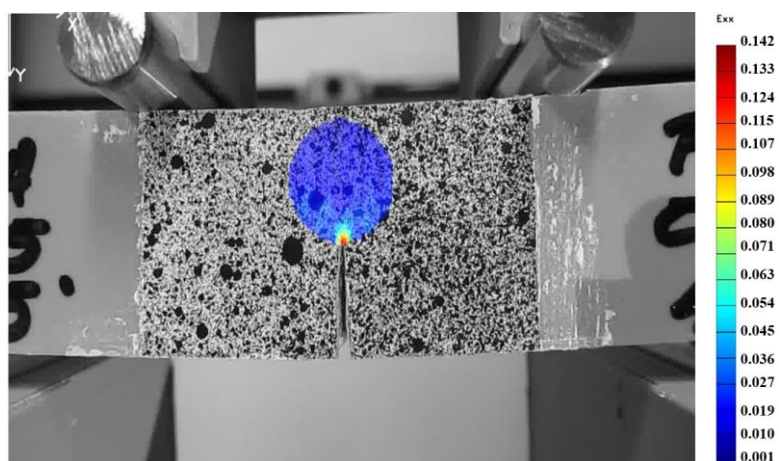


Figura 4.24- CDI do corpo de prova manufactured de PLA puro com orientação de impressão de $45^{\circ}/-45^{\circ}$.

A técnica CDI, mostrou a maior região de deformação para os corpos de prova manufactured de PLA-FC com orientação de impressão de $0^{\circ}/90^{\circ}$. Observe-se que a maior deformação ocorreu na parede interna do entalhe manufactured (Figura 4.25), sendo concordante com o mostrado experimentalmente. O valor da maior deformação dado foi de 0.148.

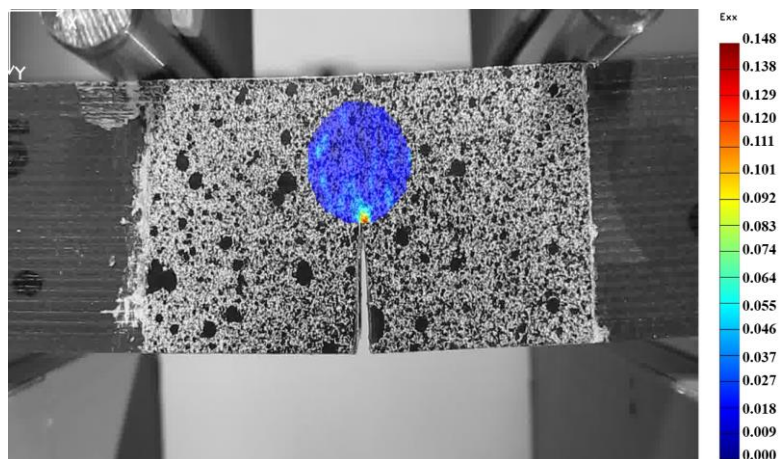


Figura 4.25- CDI do corpo de prova manufactured de PLA-FC com orientação de impressão de $0^{\circ}/90^{\circ}$.

A deformação para os corpos de prova manufactured de PLA-FC com orientação de impressão de $45^{\circ}/-45^{\circ}$, foi apresentada no topo e na parede interna do entalhe (Figura 4.26). A deformação mostrada pela técnica CDI foi próxima a deformação observada experimentalmente. Note-se duas regiões de deformação no corpo de prova tendo menores valores acima da região de maior deformação. Identifique-se uma possível trajetória intracamadas, a qual, foi observado experimentalmente. O corpo de PLA-FC com orientação de impressão de $45^{\circ}/-45^{\circ}$, apresentou o maior valor de deformação (0,169) do que os outros materiais em estudo, indicando assim um comportamento dúctil.

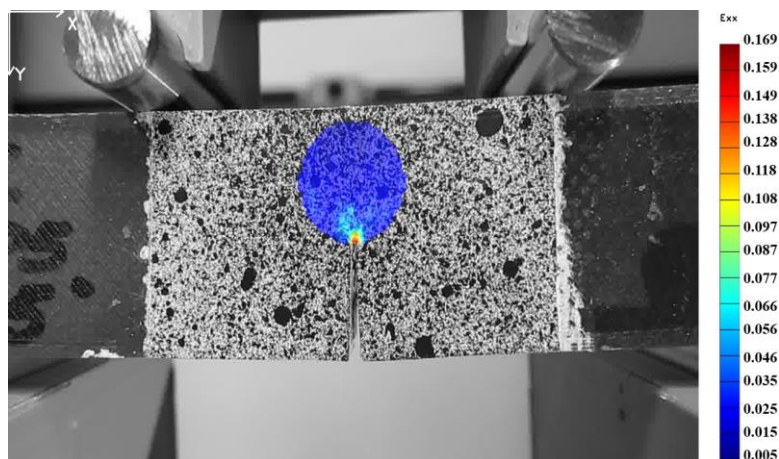


Figura 4.26- CDI do corpo de prova manufactured de PLA-FC com orientação de impressão de $45^{\circ}/-45^{\circ}$.

Na figura 4.27 pode ser visualizado o resultado da imagem de correlação digital para o corpo de prova de PLA-FV com orientação de impressão de $0^{\circ}/90^{\circ}$. Note-se que a fratura se inicia na parede interna do raio como foi mostrado no entalhe do corpo de prova manufactured. A fratura apresenta uma trajetória linear. O corpo de prova de PLA-FV com orientação de

impressão de $0^\circ/90^\circ$ obteve o maior valor de deformação (0,163) do que os corpos de prova de PLA puro, PLA-FC e PLA-AI com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$. Pode se concluir que os corpos de prova reforçados com fibra de vidro e com orientação de impressão $0^\circ/90^\circ$ apresentaram uma maior ductilidade do que os outros materiais em estudo. Mesmo tendo uma maior ductilidade os corpos de prova apresentaram fratura total.

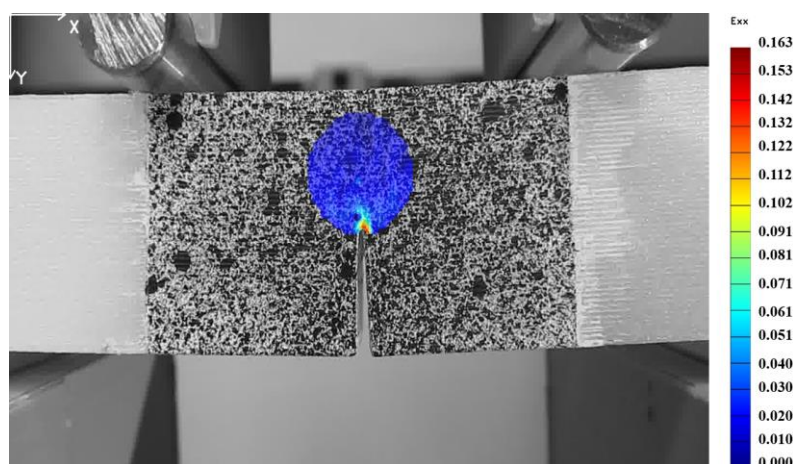


Figura 4.27- CDI do corpo de prova manufactured de PLA-FV com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$.

Os corpos de prova manufactured de PLA-FV com orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$ mostraram uma deformação de 0,197 (Figura 4.28). Evidencie-se que os corpos manufactured de PLA puro, PLA-FC e PLA-FV exibiram o início da fratura intercadas independentemente da orientação de impressão. Esse comportamento pode ser observado na figura 4.29.

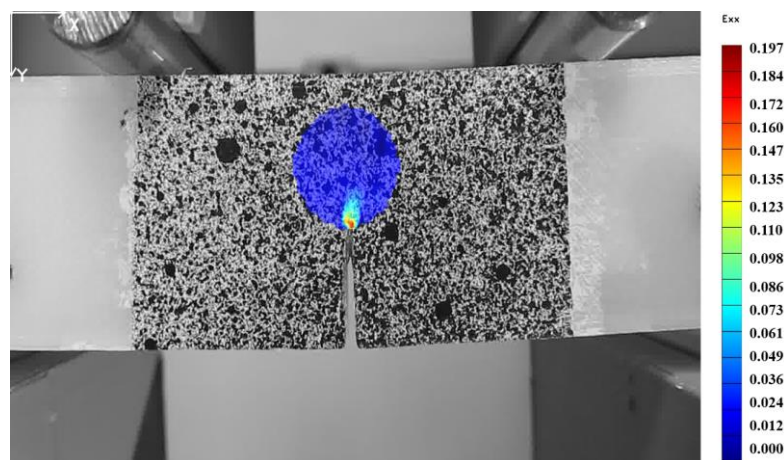


Figura 4.28- CDI do corpo de prova manufactured de PLA-FV com orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$.

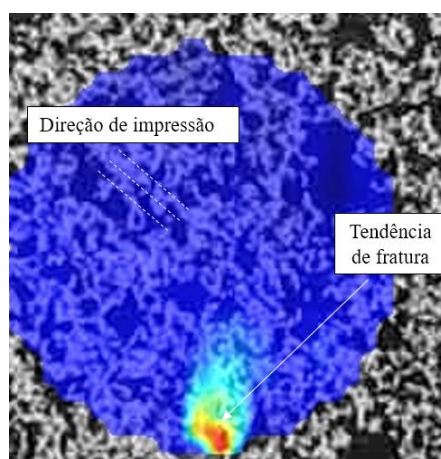


Figura 4.29- Tendência da fratura mostrado na imagem de correlação digital nos corpos de prova manufaturados pela técnica FDM.

Na figura 4.30 pode ser visualizado o resultado da CDI para os corpos de prova de PLA-Al com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$. A maior deformação mostrada foi de 0,136 sendo a menor deformação quando comparada com os corpos de prova de PLA, PLA-FC e PLA-FV com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$. Note-se que a maior concentração de deformação foi registrada na parede interna do entalhe. O menor valor de deformação mostrado evidencia o comportamento frágil do corpo de prova de PLA-Al com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$.

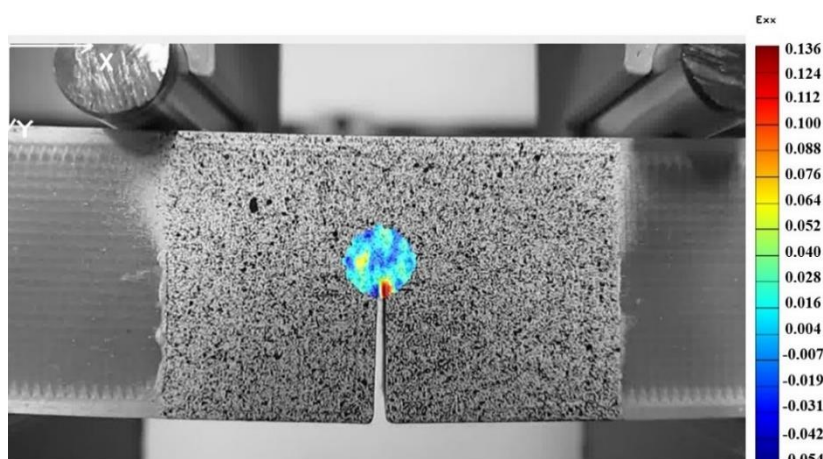


Figura 4.30- CDI do corpo de prova manufaturado de PLA-Al com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$.

Perceba-se que a deformação mostrada nos corpos de prova de PLA-Al com orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$ começa na lateral interna do entalhe, da mesma forma que nos outros corpos de prova em estudo (Figura 4.31). A deformação exibida pela CDI no corpo de prova de

PLA-Al pode ser produzida pela desligação entre as camadas no momento da aplicação da carga no ensaio de flexão de quatro pontos. A maior deformação dada pela técnica CDI foi de 0,155.

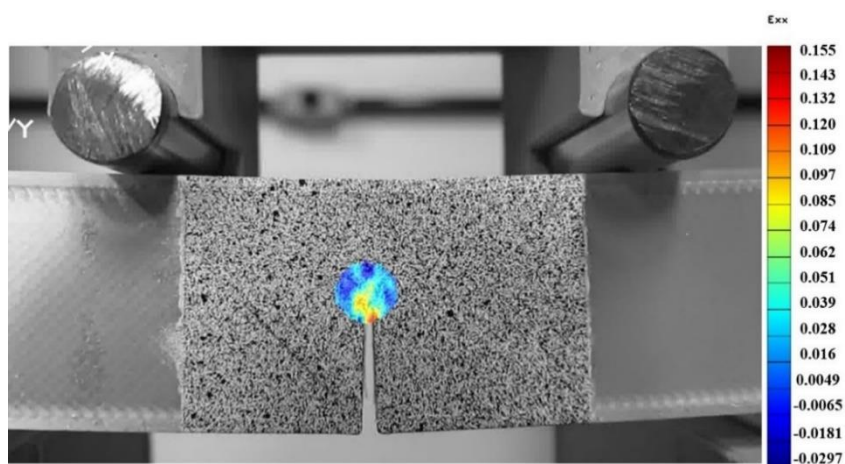


Figura 4.31- CDI do corpo de prova manufacturado de PLA-Al com orientação de impressão de 45°/-45°.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi analisada a influência da adição de materiais de reforço (partículas de alumínio, fibras curtas de carbono e fibras curtas de vidro) na matriz de PLA e a influência da orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e de $45^\circ/-45^\circ$ nas propriedades mecânicas de corpos de prova manufaturados por meio da tecnologia FDM.

No estudo foi mostrado que a orientação de impressão e a adição de matérias de reforço na matriz polimérica têm uma grande influência no comportamento mecânico de peças manufaturadas pela FDM, e que os parâmetros usados para a fabricação dos corpos de prova avaliados no presente estudo, não necessariamente são os parâmetros de impressão adequados.

O grau de reforço de 20% em peso resultou em uma diminuição na resistência à tração de 33,83%, 18,74%, e 24,20% nos corpos de prova de PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI, com orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$, em comparação aos corpos de prova de PLA puro, $45^\circ/-45^\circ$, respectivamente. A maior resistência à tração foi encontrada para os corpos de prova de PLA puro, de $45^\circ/-45^\circ$ ($50,83 \pm 0,92$ MPa).

Nos resultados do ensaio de compressão, os corpos de prova de PLA puro $0^\circ/90^\circ$ apresentaram o maior módulo de elasticidade e a maior resistência à compressão. De acordo com os resultados obtidos referentes à resistência à compressão dos corpos de prova com variação na orientação de impressão ($0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$), os valores não apresentaram resultados significativamente diferentes.

Em geral, as diminuições nos valores obtidos nos ensaios de tração e compressão dos materiais compósitos utilizados em processos FDM podem ser atribuídas a diversos fatores, como problemas de adesão interfacial, mudanças no modo de indução na cristalização por reforço inorgânico, preenchimento de lacuna fraco entre a matriz e o reforço, ou efeito de reforço sinérgico, orientação da aplicação da carga, entre outros. Da mesma forma, devido à nucleação heterogênea na matriz polimérica, que resulta no aumento da capacidade de cristalização desses sistemas preenchidos, pode-se afirmar que parâmetros adicionais de deposição devem ser escolhidos adequadamente para cada material compósito polimérico utilizado.

Os corpos de prova de PLA-FV $0^\circ/90^\circ$ apresentaram o maior módulo de flexão ($1,15 \pm 0,07$ GPa) e resistência à flexão ($17,79 \pm 0,46$ MPa). A orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$

apresentou maiores valores no módulo de elasticidade e na resistência à flexão que os corpos de prova com orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$, para os corpos de prova de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI

Os corpos de prova de PLA-FV e PLA-FC, com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$, obtiveram os maiores valores críticos do fator de intensidade de tensão K_{IC} . Os valores foram de $(4,71 \pm 0,12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ e $(3,98 \pm 0,06 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$, respectivamente. O aumento no K_{IC} , decorrente da adição das fibras de carbono e de vidro, demonstra que as fibras podem diminuir a propagação de fissuras na matriz e, além disso, faz com que o compósito apresente comportamento dúctil.

A propagação da fratura nos corpos de prova de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI foi produzida entre as camadas, de forma linear, até a fratura completa, para os corpos de prova com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e entre as camadas manufaturadas, em formato de “S”, para os corpos de prova com orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$.

A técnica de correlação digital de imagem permitiu obter informações das deformações nos corpos de prova manufaturados de PLA puro, PLA-FV, PLA-FC e PLA-AI no ensaio de flexão em quatro pontos. Essas informações, podem ser usadas para realizar um estudo comparativo entre os resultados experimentais junto com os resultados dados pela técnica CDI e uma análise numérico. Além disso, com a técnica CDI é possível avaliar fenômenos como o crescimento da trinca ou de fadiga e a concentração de tensões.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente estudo, foram avaliadas as propriedades de compósitos de matriz polimérica manufaturados por FDM e a influência dos parâmetros de impressão sobre as propriedades mecânicas das peças produzidas. Com a finalidade de dar continuidade na análise das propriedades, sugere-se como próximos trabalhos.

- Executar ensaios de fadiga nos corpos manufaturados de compósitos de matriz polimérica.
- Realizar tratamento térmico nos corpos de prova de tração fabricados pela técnica FDM com a finalidade de diminuir a presença de vazios, aumentar a adesão entre as camadas e aumentar a ligação entre a interface matriz-material de reforço.
- Verificar a condutividade térmica dos compósitos de matriz termoplástica.
- Estudar as propriedades acústicas dos materiais de PLA-FC, PLA-FV e PLA-AI.
- Avaliar a aplicação do compósito de matriz termoplástica de PLA reforçado com fibras em painéis sanduíches laminados, onde o núcleo pode ser modificado, tanto pelo tipo de material quanto pela geometria mais adequada para resistir ao esforço de flexão e impacto.

REFERENCIAS

- Abbot, D., Kallon, D., Anghel, C., & Dube, P. (2019). Finite Element Analysis of 3D Printed Model via Compression Tests. *Procedia Manufacturing*, 35, 164-173.
- Abdulqader, A., & Rizos, D. (2020). Advantages of using digital image correlation techniques in uniaxial compression tests. *Results in Engineering*, 6, 100109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100109>
- Abeykoon, C., Sri-Amphorn, P., & Fernando, A. (2020). Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(3), 284-297.
- Adeniran, O., Cong, W., & Oluwabunmi, K. (2022). Thermoplastic matrix material influences on the mechanical performance of additively manufactured carbon-fiber-reinforced plastic composites. *Journal of Composite Materials*, 56(9), 1391–1405.
- Adeniran, O., Cong, W., Bediako, E., & Aladesanmi, V. (2021). Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites: The Effect of Fiber Content on Compressive Properties. *Jornal Composite Science*, 5(325).
- Ahmad, M., Wahid, M., Maidin, N., Rahman, M., Osman, H., & Elias, I. (2020). Mechanical characteristics of oil palm fiber reinforced thermoplastics as filament for fused deposition modeling (FDM). *Advances in Manufacturing*, 8, 72-81.
- Ahmadi, E., Fesharaki, J., Atrian, A., Montazerolghaem, H., & Saberi, S. (2021). Investigation of Penetration Behavior of Sandwich Structures with Fiber-metal Laminate Skins and Syntactic Foam Core. *Fibers and Polymers*, 22, 2846–2860.
- Ahmed, S., Hussain, G., Al-Ghamdi, K., & Altaf, K. (2021). Mechanical properties of an additive manufactured CF-PLA/ABS hybrid composite sheet. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34(11), 1577 –1596.
- Ahmed, W., Ahmed, S., Alnajjar, F., & Zaneldin, E. (2021). Mechanical performance of three-dimensional printed sandwich composite with a high-flexible core. *The Journal of Materials: Design and Applications*, 235(6), 1-19.
- Ahmed, W., Siraj, S., & Marzouqi, A. (2020). 3D Printing PLA Waste to Produce Ceramic Based Particulate Reinforced Composite Using Abundant Silica-Sand: Mechanical Properties Characterization. *Polymers*, 12(11), 2579.
- Ahmed, W., Siraj, S., & Marzouqi, A. (2021). Comprehensive Characterization of Polymeric Composites Reinforced with Silica Microparticles Using Leftover Materials of Fused Filament Fabrication 3D Printing. *Polymers*, 13(15), 2423.
- Akhoundi, B., Machado, A., Almeida, E., & Silva, E. (2019). Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. *The Journal of Reinforced Plastics and Composites (JRP)*, 38(3), 2423–2443.
- Algarni, M. (2021). The Influence of Raster Angle and Moisture Content on the Mechanical Properties of PLA Parts Produced by Fused Deposition Modeling. *Polymers*, 13(2), 237.
- Aloyaydi, B., Sivasankaran, S., & Ammar, H. (2019). Influence of infill density on microstructure and flexural behavior of 3D printed PLA thermoplastic parts processed by fusion deposition modeling. *Materials science*, 6(6), 1033–1048.

- Aloyaydi, B., Sivasankaran, S., & Ammar, H. (2019). Influence of infill density on microstructure and flexural behavior of 3D printed PLA thermoplastic parts processed by fusion deposition modeling. *AIMS Materials Science*, 6(6), 1033-1048. <https://doi.org/10.3934/materci.2019.6.1033>
- Antony, S., Cherouat, A., & Montay, G. (2020). Fabrication and Characterization of Hemp Fibre Based 3D Printed Honeycomb Sandwich Structure by FDM Process. *Applied Composite Materials*, 27, 935–953.
- Anwer, A., & Naguib, E. (2018). Multi-functional flexible carbon fiber composites with controlled fiber alignment using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 360-367.
- Aourik, O., Othmani, M., Saadouki, B., Abouzaid, K., & Chouaf, A. (2021). Fracture toughness of ABS additively manufactured by FDM process. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 109(2), 49-58. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.6258>
- Asif, S., Chansoria, P., & Shirwaiker, R. (2020). Ultrasound-assisted vat photopolymerization 3D printing of preferentially organized carbon fiber reinforced polymer composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 56(Part B), 1340-1343.
- Avila, E., Eo, J., Kim, J., & Kim, N. (2019). Heat Treatment Effect on Mechanical Properties of 3D Printed Polymers. *MATEC Web of Conferences*, 264, 1-5.
- Awual, D., Khraisheh, M., Alharthi, N., Luqman, M., Islam, A., Karim, M., . . . Khaleque, M. (2018). Efficient detection and adsorption of cadmium(II) ions using innovative nano-composite materials. *Chemical Engineering Journal*, 343, 118-127.
- Bahrami, B., Ayatollahi, M., & Torabi, A. (2020). Application of digital image correlation method for determination of mixed mode stress intensity factors in sharp notches. *Optics and Lasers in Engineering*, 124, 105830. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105830>
- Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 129, 1-16.
- Baptista, R., & Guedes, M. (2021). Morphological and mechanical characterization of 3D printed PLA scaffolds with controlled porosity for trabecular bone tissue replacement. *Materials Science and Engineering: C*, 118, 111528.
- Bastos, J., Estrada, G., Florián, C., Comas, A., & Niño, E. (2018). Study of mechanical properties under compression failure in reinforced composite materials produced by additive manufacturing. *Journal of Physics*, 1126, 1-8.
- Bates, S., Farrow, I., & Trask, R. (2019). Compressive behaviour of 3D printed thermoplastic polyurethane honeycombs with graded densities. *Materials & Design*, 162, 130-142.
- Bensalah, H., Raji, M., Abdellaoui, H., Essabir, H., Bouhfid, R., & Qaiss, A. (2021). Thermo-mechanical properties of low-cost “green” phenolic resin composites reinforced with surface modified coir fiber. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume*, 112, 1917–1930.
- Betts, D., Sadeghian, P., & Fam, A. (2020). Experiments and nonlinear analysis of the impact behaviour of sandwich panels constructed with flax fibre-reinforced polymer faces and foam cores. *Journal of sandwich structures & materials*, 23(7), 3140-3163.

- Blok, L., Longana, M., Yu, H., & Woods, B. (2018). An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*, 22, 176-186.
- Blok, L., Longana, M., Yu, H., & Woods, B. (2018). An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*, 22, 176-186.
- Bochnia, J., Blasiak, M., & Kozior, T. (2021). A Comparative Study of the Mechanical Properties of FDM 3D Prints Made of PLA and Carbon Fiber-Reinforced PLA for Thin-Walled Applications. *Materials*, 14(22), 7062. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma14227062>
- Bornert, M., Brémand, F., Doumalin, P., Dupré, J., Fazzini, M., Grédiac, M., . . . Wattrisse, B. (2009). Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors: Methodology and Results. *Experimental Mechanics*, 49, 353–370.
- Bourell, D., Kruth, J., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 659-681.
- Bourell, D., Kruth, J., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 659-681.
- Bowoto, O., Oladapo, B., Zahedi, S., Omigbodun, F., & Emenuvwe, O. (2020). Analytical modelling of in situ layer-wise defect detection in 3D-printed parts: additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 2311–2321.
- Brenken, B., Barocio, E., Favaloro, A., Kunc, V., & Pipes, R. (2018). Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review. *Additive Manufacturing*, 21, 1-16.
- Butscher, M., Bohner, C., Roth, A., Ernstberger, R., Heuberger, N., & Doebelin, P. (2012). Printability of calcium phosphate powders for three-dimensional printing of tissue engineering scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 8(1), 373-385.
- Butscher, M., Bohner, C., Roth, A., Ernstberger, R., Heuberger, N., & Doebelin, P. (2012). Printability of calcium phosphate powders for three-dimensional printing of tissue engineering scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 8(1), 373-385.
- Cali, M., Pascoletti, G., Gaeta, M., Milazzo, G., & Ambu, R. (2020). New filaments with natural fillers for FDM 3D printing and their applications in biomedical field. *Procedia Manufacturing*, 51, 698–703.
- Callister, Jr; Rethwisch, G. (2012). Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Em *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução* (pp. 534-535). LTC- Livros Técnicos e Científicos.
- Camargo, J., Machado, A., Almeida, E., & Silva, E. (2019). Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3Dprinting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 2423–2443.
- Castillo, E., Allen, T., Henry, R., Griffith, M., & Ingham, J. (2019). Digital image correlation (DIC) for measurement of strains and displacements in coarse, low volume-fraction FRP composites used in civil infrastructure. *Composite Structures*, 212, 43-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.024>
- Chalgham, A., Ehrmann, A., & Wickenkamp, I. (2021). Mechanical Properties of FDM Printed PLA Parts before and after Thermal Treatment. *Polymers*, 13(8), 1239.

- Chao, Q., Maneengam, A., Margabandu, S., Jindal, P., Patil, P., Zheng, G., & Selvaraj, R. (2022). Mechanical and damping property evaluation of jute fiber reinforced composite periodic core sandwich panels. *Journal of Natural Fibers*, 1-11.
- Chen, Q., Zhang, Y., Huang, P., Li, Y., & Fu, S. (2022). Improved bond strength, reduced porosity and enhanced mechanical properties of 3D-printed polyetherimide composites by carbon nanotubes. *Composites Communications*, 30, 101083.
- Corvi, A., Collini, L., Sciancalepore, C., & Kumar, A. (2023). Analysis and modelling of damage mechanism in FDM 3D-printed lattice structure under compression loading. *Journal of Mechanical Science and Technology*.
- Cunha, F., Santos, T., & Xavier, J. (2021). In Situ Monitoring of Additive Manufacturing Using Digital Image Correlation: A Review. *Materials*, 14(6), 1511. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma14061511>
- Dave, H., Prajapati, A., Rajpurohit, S., Patadiya, N., & Raval, H. (2020). Investigation on tensile strength and failure modes of FDM printed part using in-house fabricated PLA filament. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-23.
- Dave, H., Prajapati, A., Rajpurohit, S., Patadiya, N., & Raval, H. (2022). Investigation on tensile strength and failure modes of FDM printed part using in-house fabricated PLA filament. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8, 576-597. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1829951>.
- De Toro, E., Sobrino, J., Martinez, A., Eguia, V., & Pérez, J. (2020). Investigation of a Short Carbon Fibre-Reinforced Polyamide and Comparison of Two Manufacturing Processes: Fused Deposition Modelling (FDM) and Polymer Injection Moulding (PIM). *Materials*, 13(3), 672. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma13030672>
- DebRoy, T., Wei, H., Zuback, J., Mukherjee, T., Elmer, J., Milewski, J., . . . Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224.
- DebRoy, T., Wei, H., Zuback, J., Mukherjee, T., Elmer, J., Milewski, J., . . . Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224.
- Ding, S., Zou, B., Wang, P., & Ding, H. (2019). Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM. *Polymer Testing*, 78, 105948. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105948>
- Dou, H., Cheng, Y., Ye, W., Zhang, D., Li, J., Miao, Z., & Rudykh, S. (2020). Effect of Process Parameters on Tensile Mechanical Properties of 3D Printing Continuous Carbon Fiber-Reinforced PLA Composites. *13(17)*, 3850. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma13173850>
- Elmrabet, N., & Siegkas, P. (2020). Dimensional considerations on the mechanical properties of 3D printed polymer parts. *Polymer Testing*, 90, 106656.
- Fabra, A., de Castro, M., & Campos, J. (2023). Experimental characterization of PLA composites printed by fused deposition modelling. *Journal of Composite Materials*, 57(5), 941-954. <https://doi.org/10.1177/00219983221146619>

- Fasel, U., Keidel, D., Baumann, L., Cavolina, G., Eichenhofer, M., & Ermanni, P. (2020). Morphing wing research has mostly focused on adaptive trailing edge and wing-camber morphing. By adapting the camber of the wing, the local lift coefficient can be changed to control and manoeuvre the aircraft or to actively alleviate loads. An extensive. *Manufacturing Letters*, 23, 85-88.
- Gailevičius, D., Padolskytė, V., Mikoliūnaitė, L., Šakirzanovas, S., Juodkazis, S., & Malinauskas, M. (2019). Additive-manufacturing of 3D glass-ceramics down to nanoscale resolution. *Royal society of chemistry*, 4, 647-651.
- Gailevičius, D., Padolskytė, V., Mikoliūnaitė, L., Šakirzanovas, S., Juodkazis, S., & Malinauskas, M. (2019). Additive-manufacturing of 3D glass-ceramics down to nanoscale resolution. *Royal society of chemistry*, 4, 647-651.
- García, E., Núñez, P., Chacón, J., Caminero, M., Chacón, J., & Kamarthi, S. (2022). Effects of carbon fibre reinforcement on the geometric properties of PETG-based filament using FFF additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 109766.
- Gehri, N., Falcón, J., & Kaufmann, W. (2020). Automated crack detection and measurement based on digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 256, 119383. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119383>
- Geng, P., Zhao, J., Wu, W., Ye, W., Wang, Y., Wang, S., & Zhang, S. (2019). Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 266-273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.023>
- Gonabadi, H., Chen, Y., Yadav, A., & Bull, S. (2022). Investigation of the effect of raster angle, build orientation, and infill density on the elastic response of 3D printed parts using finite element microstructural modeling and homogenization techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume*, 118, pages 1485–1510.
- González, C., Martín, P., Lizarralde, I., Fernández, A., León, A., Lopes, C., & Blázquez, J. (2021). Post-processing effects on microstructure, interlaminar and thermal properties of 3D printed continuous carbon fibre composites. *Composites Part B: Engineering*, 210, 108652.
- Górszczyk, J., Malicki, K., & Zych, T. (2019). Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. *Materials*, 12(15), 2349. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma12152349>
- Guduru, K., & Srinivasu, G. (2020). Effect of post treatment on tensile properties of carbon reinforced PLA composite by 3D printing. *Materials Today Proceedings*, 33(8), 5403-5407.
- Guen, M., Hill, S., Smith, D., Theobald, B., Gaugler, E., Barakat, A., & Laigle, C. (2019). Influence of Rice Husk and Wood Biomass Properties on the Manufacture of Filaments for Fused Deposition Modeling. *Frontiers in chemistry*, 7(735), 1-10.
- Gupta, A., Fidan, I., Hasanov, S., & Nasirov, A. (2020). Processing, mechanical characterization, and micrography of 3D-printed short carbon fiber reinforced polycarbonate polymer matrix composite material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume*, 107, 3185–3205.

- Gupta, A., Hasanov, S., & Fidan, I. (2022). Thermal characterization of short carbon fiber reinforced high temperature polymer material produced using the fused filament fabrication process. *Journal of Manufacturing Processes*, 80, 515-528. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.024>
- Hanon, M., Marczis, R., & Zsidai, L. (2021). Influence of the 3D Printing Process Settings on Tensile Strength of PLA and HT-PLA. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 65(1), 38–46.
- Harshit, K., Dave, P. A., Rajpurohit, S., & H., N. (2020). Investigation on tensile strength and failure modes of FDM printed part using in-house fabricated PLA filament. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-22.
- Hassan, G. (2019). Digital Image Correlation for discontinuous displacement measurement using subset segmentation. *Optics and Lasers in Engineering*, 115, 208-216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.12.003>
- Hassan, G. (2021). Deformation measurement in the presence of discontinuities with digital image correlation: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 137, 106394. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106394>
- Hebert, J., & Khonsari, M. (2023). The application of digital image correlation (DIC) in fatigue experimentation: A review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 46(4), 1256-1299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ffe.13931>
- Hemanth, R., Sekar, M., & Suresha, B. (2014). Effects of Fibers and Fillers on Mechanical Properties of Thermoplastic Composites. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, 2, 28-35.
- Hernandez, S., Gonzalez, D., Jérusalem, A., & Arias, A. (2020). Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. *Materials & Design*, 188, 108414.
- Hernandez, S., Gonzalez, D., Jérusalem, A., & Arias, A. (2020). Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. *Materials and Design*, 188, 108414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108414>
- Hmeidata, N., Pack, R., Talley, S., Moore, R., & Compton, B. (2020). Mechanical anisotropy in polymer composites produced by material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 34(Nadim S.HmeidataRobert C.PackbSamantha J.TalleycRobert B.MoorecBrett G.Comptonab), 101385.
- Hofstatter, T., B Pedersen, D., Tosello, G., & N Hansen, H. (2017). State-of-the-art of fiber-reinforced polymers in additive manufacturing technologies. *Journal of Reinforced Plastics*, 36(15), 1061–1073. <https://doi.org/10.1177/0731684417695648>
- Hou, Z., Tian, X., Zheng, Z., Zhang, J., Zhe, L., Li, D., . . . Polilov, A. (2020). A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content. *Composites Part B: Engineering*, 189, 107893.
- Hu, Q., Duan, Y., Zhang, H., Liu, D., Yan, B., & Peng, F. (2018). Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament. *Journal of Materials Science*, 53, 1887–1898.

- Hu, Q., Duan, Y., Zhang, H., Liu, D., Yan, B., & Peng, F. (2018). Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament. *Journal of Materials Science*, *53*, 1887–1898.
- Huang, B., Meng, S., He, H., Jia, Y., Xu, Y., & Huang, H. (2018). Study of processing parameters in fused deposition modeling based on mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene filament. *59*(1), 120-128.
- Huchard, T., Robin, G., Ponçot, M., Hoppe, S., & Daya, M. (2022). Elaboration, Characterization and Modelling of Periodic Viscoelastic Sandwich Beams for Lightning and Vibration Damping. *Mechanics Research Communications*, *121*, 103863.
- Hwa, L., Rajoo, S., Noor, A., Ahmad, N., & Uday, M. (2017). Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, *21*, 323–347.
- Hwa, L., Rajoo, S., Noor, A., Ahmad, N., & Uday, M. (2017). Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, *21*, 323–347.
- Hyde, A., He, J., Cui, X., Lua, J., & Liu, L. (2020). Effects of microvoids on strength of unidirectional fiber-reinforced composite materials. *Composites Part B: Engineering*, *187*, 107844.
- Iragi, M., González, C., Esnaola, A., Lopes, C., & Aretxabaleta, L. (2019). Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates; effects of processing conditions and microstructure. *Additive Manufacturing*, *30*, 100884.
- Ismail, K., Yap, T., & Ahmed, R. (2022). 3D-Printed Fiber-Reinforced Polymer Composites by Fused Deposition Modelling (FDM): Fiber Length and Fiber Implementation Techniques. *Polymers*, *14*(21), 4659. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym14214659>
- Iyer, S., & Keles, O. (2022). Effect of raster angle on mechanical properties of 3D printed short carbon fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene. *Composites Communications*, *32*, 101163.
- Jiaying, L.; Zhu, W.; Zhou, K. (2020). Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing. *Advanced functional materials*, *30*(43), 1-54.
- Kamaal, M., Anas, M., Rastogi, H., Bhardwarj, N., & Rahaman, A. (2021). Effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D-printed carbon fibre–PLA composite. *Progress in Additive Manufacturing volume*, *6*, 63–69. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40964-020-00145-3>
- Kandemir, A., Pozegic, T., Hamerton, I., Eichhorn, S., & Longana, M. (2020). Characterisation of Natural Fibres for Sustainable Discontinuous Fibre Composite Materials. *Materials*, *13*, 21-29.
- Kerekes, T., Lim, H., Joe, W., & Yun, G. (2019). Characterization of process–deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (FDM) 3D-printed specimens. *Additive Manufacturing*, *25*, 532-544. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.008>

- Khawaja, H., Alabdouli, H., Alqaydi, A., Mansour, W., Ahmed, H., & Jassmi, A. (2020). Investigating the Mechanical Properties of 3D Printed Components. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*, 1-7.
- Khosravani, M., Soltani, P., & Reinicke, T. (2021). Fracture and structural performance of adhesively bonded 3D-printed PETG single lap joints under different printing parameters. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 116, 103087. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103087>
- Khosravani, M., Zolfagharian, A., Jennings, M., & Reinicke, T. (2020). Structural performance of 3D-printed composites under various loads and environmental conditions. *Polymer Testing*, 91, 106770.
- Kumar S, Singh R, Singh M, Singh T, Batish A. (2020). Multi material 3D printing of PLA-PA6/TiO₂ polymeric matrix: Flexural, wear and morphological properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33(11), 2105-2124. <https://doi.org/10.1177/0892705720953193>
- Kumar, L., & Nair, K. (2017). Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, 39-54. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-0812-2_4
- Kumar, M., Benal, M., Kumar, P., Tambrallimath, V., Geetha, H., Khan, T., . . . Baig, M. (2022). Influence of Short Glass Fibre Reinforcement on Mechanical Properties of 3D Printed ABS-Based Polymer Composites . *Polymers*, 14(6), 1182.
- Kumar, S., Singh, R., Singh, M., Singh, T., & Batish, A. (2020). Multi material 3D printing of PLA-PA6/TiO₂ polymeric matrix: Flexural, wear and morphological properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1-20.
- Lakhdar, Y., Tuck, C., Binner, J., Terry, A., & Goodridge, R. (2021). Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*, 116, 100736.
- Lakhdar, Y., Tuck, C., Binner, J., Terry, A., & Goodridge, R. (2021). Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*, 116, 100736.
- Lee, C., & Liu, C. (2019). The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 25, 196-203.
- Li, J., Yvonne, D., Huang, X., Sun, G., & Ruan, D. (2022). Additively manufactured fiber-reinforced composites: A review of mechanical behavior and opportunities. *Journal of Materials Science & Technology*, 119, 219-244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.063>
- Liao, G., Li, Z., Luan, C., Wang, Z., Yao, X., & Fu, J. (2022). Additive Manufacturing of Polyamide 66: Effect of Process Parameters on Crystallinity and Mechanical Properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, 191–200.
- Liao, J., Brosse, N., Pizzi, A., Hoppe, S., Zhou, X., & Du, G. (2020). Characterization and 3D printability of poly (lactic acid)/acetylated tannin composites. *Industrial Crops and Products*, 149, 112320.
- Lima, R., Martins, S., Sousa, K., & Medeiros, M. (2021). Estudo das propriedades mecânicas de polímeros aplicados em manufatura aditiva em comparação apolímerode aplicação industrial. *Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica*, 3(1), 35-46.

- Liu, G., Xiong, Y., & Zhou, L. (2021). Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications. *Composites Communications*, 27, 100907.
- Liu, G., Zhang, X., Chen, X., He, Y., Cheng, L., Huo, M., . . . Lu, J. (2021). Additive manufacturing of structural materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 145, 100596.
- Liu, Y., Zhang, Q., Su, Y., Gao, Z., Fang, Z., & Wu, S. (2019). The mechanism of strain influence on interpolation induced systematic errors in digital image correlation method. *Optics and Lasers in Engineering*, 121, 323-333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.04.023>
- Lopez, D., & Ahmad, R. (2020). Tensile Mechanical Behaviour of Multi-Polymer Sandwich Structures via Fused Deposition Modelling. *Polymers*, 12(3), 651.
- Lui, F. (2005). *Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction*. ASM international.
- Luo, J., Luo, Q., Zhang, G., Li, G., & Sun, G. (2022). On strain rate and temperature dependent mechanical properties and constitutive models for additively manufactured polylactic acid (PLA) materials. *Thin-Walled Structures*, 179, 109624. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109624>
- Magri AE, E. M. (2021). Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling. *Journal of Thermoplastic Composite Materials.*, 35(5), 581-595. <https://doi.org/10.1177/0892705719847244>
- Maqsood, N., & Rimašauskas, M. (2021). Characterization of carbon fiber reinforced PLA composites manufactured by fused deposition modeling. *Composites Part C: Open Access*, 4, 100112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100112>
- Maqsood, N., & Rimašauskas, M. (2021). Delamination observation occurred during the flexural bending in additively manufactured PLA-short carbon fiber filament reinforced with continuous carbon fiber composite. *Results in Engineering*, 11, 100246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100246>
- Marşavina, L., Vălean, C., Mărghitaş, M., Linul, E., Razavi, S., Berto, F., & Brighenti, R. (2022). Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108766>
- Mazurchevici.; Danut, A.; Dumitru, N. ; Ramona,P. (2020). Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. 27(2).
- Mazzanti, V., Malagutti, L., & Mollica, F. (2019). FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. *Polymers*, 11(7), 1-22.
- Mei, H., Yin, X., Zhang, J., & Zhao, W. (2019). Compressive Properties of 3D Printed Polylactic Acid Matrix Composites Reinforced by Short Fibers and SiC Nanowires. *Advanced Engineering Materials*, 21(5), 1800539. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adem.201800539>
- Mohammadzadeh, M., Imeri, A., Fidan, I., & Elkelany, M. (2019). 3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107112.

- Mohammadzadeh, M., Imeri, A., Fidan, I., & Elkelany, M. (2019). 3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis. *Composites Part B: Engineering*, *175*, 107112.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to statistical quality control*. Jefferson City : John Wiley & Sons.
- Moradi, M., Moghadam, M., Shamsborhan, M., & Bodaghi, M. (2020). The Synergic Effects of FDM 3D Printing Parameters on Mechanical Behaviors of Bronze Poly Lactic Acid Composites. *Journal of composites and science*, *4*(1), 1-17.
- Morales, M., Martinez, C., Maranon, A., Hernandez, C., Michaud, V., & Porras, A. (2021). Development and Characterization of Rice Husk and Recycled Polypropylene Composite Filaments for 3D Printing . *Polymers*, *13*(7), 1067.
- Mukherjee, T., Wei, H., De, A., & DebRoy, T. (2018). Heat and fluid flow in additive manufacturing – Part II: Powder bed fusion of stainless steel, and titanium, nickel and aluminum base alloys. *Computational Materials Science*, *150*, 369-380.
- Mukherjee, T., Wei, H., De, A., & DebRoy, T. (2018). Heat and fluid flow in additive manufacturing – Part II: Powder bed fusion of stainless steel, and titanium, nickel and aluminum base alloys. *Computational Materials Science*, *150*, 369-380.
- Mukherjee, T., Wei, H., De, A., & DebRoy, T. (2018). Heat and fluid flow in additive manufacturing—Part I: Modeling of powder bed fusion. *Computational Materials Science*, *150*, 304-313.
- Mukherjee, T., Wei, H., De, A., & DebRoy, T. (2018). Heat and fluid flow in additive manufacturing—Part I: Modeling of powder bed fusion. *Computational Materials Science*, *150*, 304-313.
- Naveed, N. (2020). Investigate the effects of process parameters on material properties and microstructural changes of 3D-printed specimens using fused deposition modelling (FDM). *Materials Technology*, *36*(5), 317-330.
- Nicolau, A., Pop, A., & Coşoreanu, C. (2022). D Printing Application in Wood Furniture Components Assembling. *Materials*, *15*(8), 2907. <https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma15082907>
- Omar N, S. A. (2019). Mechanical properties of carbon and glass fibre reinforced composites produced by additive manufacturing: A short review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *670*, 012020. <https://doi.org/doi:10.1088/1757-899X/670/1/012020>
- Pan, B. (2018). Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. *Measurement Science and Technology*, *29*(8), 082001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aac55b>
- Pan, B., & Li, K. (2011). A fast digital image correlation method for deformation measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, *48*(7), 841-847. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.02.023>
- Pei, S., Wang, K., Chen, C., Li, J., Li, Y., Zeng, D., . . . Yang, H. (2021). Process-structure-property analysis of short carbon fiber reinforced polymer composite via fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Processes*, *64*, 544-556.

- Prajapati, A., Dave, H., & Raval, H. (2021). Effect of fiber volume fraction on the impact strength of fiber reinforced polymer composites made by FDM process. *Materials today proceedings*, 44, 2102-2106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.262>
- Quanjin, M., Rejab, M., Halim, Q., Merzuki, M., & Darus, M. (2020). Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method. *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 757-763. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.072>
- Rahim, T., Abdullah, A., & Akil, H. (2019). Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites. *Polymer*, 59(4), 589-624. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1597883>
- Rahman, M., Liggett, C., Grella, K., Gagnon, B., & Membreno, A. (2021). Validation of a finite element method for simulation of components produced by continuous carbon fiber reinforced additive manufacturing. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 23(2), 182-192.
- Rahmatabadi, D., Ghasemi, I., Baniassadi, M., Abrinia, K., & Baghani, M. (2022). 3D printing of PLA-TPU with different component ratios: Fracture toughness, mechanical properties, and morphology. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 3970-3981. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.024>
- Rarani, M., Afarani, R., & Zahedi, A. (2019). Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107147>
- Reverte, J., Caminero, M., Chacón, J., Plaza, E., Nuñez, P., & Becar, J. (2020). Mechanical and Geometric Performance of PLA-Based Polymer Composites Processed by the Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing Technique. *Materials*, 13(8), 1924.
- Rodriguez, j., Zandi, M., Mesa, R., & Fuentes, J. (2020). Fatigue behavior of PLA-wood composite manufactured by fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8507-8516.
- Rosli, N., Alkahari, M., Habeeb, H., Maidin, S., Ramli, F., & Herawan, S. (2021). Fused Filament Fabrication of Natural PLA and PLA-Aluminum Composite. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44(9), 1024-1752.
- Rupinder et al. (2016). Mechanical properties of bio compatible functional prototypes for joining applications in clinical dentistry. *International Journal Of Production Research*, 56(24), 7330-7340.
- Sabău, E., Trif, A., Borzan, C., & Popesco, A. (2021). NUMERICAL SIMULATION OF FLEXURAL BEHAVIOR OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES. *ACADEMIC JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING*, 19(1), 52-56.
- Selvaraj, R., Maneengam, A., & Sathiyamoorthy, M. (2022). Characterization of mechanical and dynamic properties of natural fiber reinforced laminated composite multiple-core sandwich plates. *Composite Structures*, 284, 115141.

- Serdeczny, P., Comminal, R., Pedersen, D., & Spangenberg, J. (2020). Experimental and analytical study of the polymer melt flow through the hot-end in material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 32, 100997.
- Shanmugam et al. (2020). Polymer Recycling in Additive Manufacturing: an Opportunity for the Circular Economy. *Materials Circular Economy*, 2(11), 1-11.
- Shanmugam, V., Das, O., Babu, K., Marimuthu, U., Veerasimman, A., Johnson, D., . . . Berto, F. (2021). Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue*, 143, 1-15.
- Sikora, P., Gnatowski, A., & Gołębski, R. (2019). Tests of mechanical properties of semicrystalline and amorphous polymeric materials produced by 3D printing. *MATEC Web of Conferences*, 254, 1-12.
- Sikora, P., Gnatowski, A., & Gołębski, R. (2019). Tests of mechanical properties of semicrystalline and amorphous polymeric materials produced by 3D printing. *MATEC Web of Conferences*, 254, 1-12.
- Sikora, P., Gnatowski, A., & Gołębski, R. (2019). Tests of mechanical properties of semicrystalline and amorphous polymeric materials produced by 3D printing. *MATEC Web of Conferences*, 254, 1-12.
- Singh et al. (2018). Additive Manufacturing of Syntactic Foams: Part 1: Development, Properties, and Recycling Potential of Filaments. *ADDITIVE MANUFACTURING OF COMPOSITES AND COMPLEX MATERIALS*, 70(3), 303 - 309.
- Singhal, P., Sujithra, R., & Saritha, D. (2022). Effect of alternate fill pattern on mechanical properties of FDM printed PC-PBT alloy. *Materials today proceeding*, 62(6), 3791-3799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.470>
- Skhandesh, G., & Keles, O. (2022). Effect of raster angle on mechanical properties of 3D printed short carbon fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene. *Composites Communications*, 32, 101163.
- Somireddy, M., Singh, C., & Czekanski, A. (2020). Mechanical behaviour of 3D printed composite parts with short carbon fiber reinforcements. *Engineering Failure Analysis*, 107, 104232.
- Sun, G., Liu, X, Zheng, G., Gong, Z., & Li, Q. (2018). On fracture characteristics of adhesive joints with dissimilar materials – An experimental study using digital image correlation (DIC) technique. *Composite Structures*, 201, 1056-1075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.018>
- Timbó, K., Júnior, A., Osterno, F., Frota, A., Neto, E., Lira da Silva, S., & Souza, R. (2020). A Influência do posicionamento das fibras na resistência mecânica dos compósitos. *Brazilian Journal of Development*, 6(11), 86078-86093.
- Tofail et al. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22-37.
- Travitzky, N., Bonet, A., Dermeik, B., Fey, T., Filbert-Demut, I., Schlier, L., . . . Greil, P. (2014). Additive Engineering Materials. *Advanced Ceramics and Coating Processing*, 16(6), 729-754. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adem.201400097>

- Türk, D., Brenni, F., Zogg, M., & Meboldt, M. (2017). Mechanical characterization of 3D printed polymers for fiber reinforced polymers processing. *Materials & Design*, *118*, 256-265. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.050>
- Uçak, N., Çiçek, A., & Aslantas, K. (2022). Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, *80*, 414-457. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.023>
- Ueda, M., Kishimoto, S., Yamawaki, M., Matsuzaki, R., Todoroki, A., Hirano, Y., & Duigou, A. (2020). 3D compaction printing of a continuous carbon fiber reinforced thermoplastic. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *137*, 105985.
- Upreti, S., Singh, V., Kamal, S., Jain, A., & Dixit, A. (2020). Modelling and analysis of honeycomb sandwich structure using finite element method. *Materials Today: Proceedings*, *25*, 620–625.
- Vaes, D., & Puyvelde, P. (2021). Semi-crystalline feedstock for filament-based 3D printing of polymers. *Progress in Polymer Science*, *118*, 101411.
- Vakharia, V., Kuentz, L., Salem, A., Halbig, M., Salem, J., & Singh, M. (2021). Additive Manufacturing and Characterization of Metal Particulate Reinforced Polylactic Acid (PLA) Polymer Composites. *Polymers*, *13*(20), 3545.
- Vălean, C., Marşavina, L., Mărghitaş, M., Linul, E., Razavi, J., Berto, F., & Brighenti, R. (2020). The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness. *Procedia Structural Integrity*, *28*, 1134-1139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.128>
- Van de Werken, N., Tekinalp, H., Khanbolouki, P., Ozcan, S., Williams, A., & Tehrani, M. (2020). Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective. *Additive Manufacturing*, *31*, 100962.
- Vanaei, H., Shirinbayan, M., Deligant, M., Raissi, K., Fitoussi, J., Khelladi, S., & Tcharkhtchi, A. (2020). Influence of process parameters on thermal and mechanical properties of polylactic acid fabricated by fused filament fabrication. *Polymer engineering and science*, *60*(8), 1822-1831.
- Vardhan, H., Kumar, R., & Chohan, J. (2020). Investigation of tensile properties of sprayed aluminium based PLA composites fabricated by FDM technology. *Materials Today: Proceedings*, *33*, 1599–1604.
- Vardhan, H; Kumar, R; Chohan, J. (2020). Investigation of tensile properties of sprayed aluminium based PLA composites fabricated by FDM technology. *Materials Today: Proceedings*, *33*, 1599–1604.
- Vinyas, M., Athul, S., Harursampath, D., & Thoi, N. (2019). Experimental evaluation of the mechanical and thermal properties of 3D printed PLA and its composites. *Materials Research Express*, *6*(11), 1-20.
- Vinyas, M., Athul, S., Harursampath, D., & Thoi, N. (2019). Experimental evaluation of the mechanical and thermal properties of 3D printed PLA and its composites. *Materials Research Express*, *6*(11), 1-20.
- Wang, K., Long, H., Chen, Y., Baniassadi, M., Rao, Y., & Peng, Y. (2021). Heat-treatment effects on dimensional stability and mechanical properties of 3D printed continuous

- carbon fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 147, 106460.
- Wang, P., Zou, B., Ding, S., Li, L., & Huang, C. (2021). Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(9), 236-246.
- Wang, S., Ma, Y., Deng, Z., Zhang, S., & Cai, J. (2020). Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials. *Polymer Testing*, 86, Polymer Testing.
- Wang, X., Zhao, L., Fuh, J., & Lee, H. (2019). Effect of Porosity on Mechanical Properties of 3D Printed Polymers: Experiments and Micromechanical Modeling Based on X-ray Computed Tomography Analysis. *Polymers*, 11(7), 1154.
- Wickramasinghe, S., Do, T., & Tran, P. (2020). FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments . *Polymers* , 12(7), 1529. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym12071529>
- Xu, J., Wu, Y., Wang, L., Li, J, Yang, Y., . . . S. (2018). Compressive properties of hollow lattice truss reinforced honeycombs (Honeytubes) by additive manufacturing: Patterning and tube alignment effects. *Materials & Design*, 156, 446-457.
- Yadav, A., Srivastav, A., Singh, A., Mushtaque, M., Khan, S., Kumar, H., & Arora, P. (2021). Investigation on the materials used in additive manufacturing: A study. *Materials today proceedings*, 41(1), 154-157.
- Yang, T., & Yeh, c. (2020). Morphology and Mechanical Properties of 3D Printed Wood Fiber/Polylactic Acid Composite Parts Using Fused Deposition Modeling (FDM): The Effects of Printing Speed. *Polymers*, 12(6), 1334.
- Yao, T., Ye, J., Deng, Z., Zhang, K., Ma, Y., & Ouyang, H. (2020). Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. *Composites Part B: Engineering*, 188Y.
- Yu, N., Sun, X., Wang, Z., Zhang, D., & Li, J. (2020). Effects of auxiliary heat on warpage and mechanical properties in carbon fiber/ABS composite manufactured by fused deposition modeling. *Materials & Design*, 195(108978), 1-8.
- Yu, T., Zhang, Z., Song, S., Bai, Y., & Wu, D. (2019). Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 225, 111147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111147>
- Yuan, S., Shen, F., Kai, C., & Zhou, K. (2019). Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: Materials and applications. *Progress in Polymer Science*, 91, 141-168.
- Zamani, M., Heidari-Rarani, M., & Torabi, K. (2022). Optimal design of a novel graded auxetic honeycomb core for sandwich beams under bending using digital image correlation (DIC). *Composite Structures*, 286(<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115310>), 115310.
- Zekriti, N., Rhanim, R., Majid, F., Lahlou, M., Ibrahim, M., & Rhanim, H. (2020). Mode I stress intensity factors of printed and extruded specimens based on Digital Image

- Correlation method (DIC): case of ABS material. *Procedia Structural Integrity*, 28, 1745-1754. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.149>
- Zerankeshi, M., Sayedain, S., Tavangarifard, M., & Alizadeh, R. (2022). Developing a novel technique for the fabrication of PLA-graphite composite filaments using FDM 3D printing process. *Ceramics International*, 1-8.
- Zhang, H., Yang, D., & Sheng, Y. (2018). Performance-driven 3D printing of continuous curved carbon fibre reinforced polymer composites: A preliminary numerical study. . *Composites Part B*, 151, 256-264. <https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.017>.
- Zhang, X., Xu, F., & Zang, Y. F. (2020). Experimental and numerical investigation on damage behavior of honeycomb sandwich panel subjected to low-velocity impact. *Composite Structures*, 236, 111882.
- Zhang, Y., Li, Y., Guo, K., & Zhu, L. (2021). Dynamic mechanical behaviour and energy absorption of aluminium honeycomb sandwich panels under repeated impact loads. *Ocean Engineering*, 219, 1-12.
- Zhao, J., Sang, Y., & Duan, F. (2019). The state of the art of two-dimensional digital image correlation computational method. *Engineering Reports*, 1(2), 1-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eng2.12038>
- Zhao, Z., Du, S., Li, F., Xiao, H., Li, Y., Zhang, W., . . . Fu, S. (2018). Mechanical and tribological properties of short glass fiber and short carbon fiber reinforced polyethersulfone composites: A comparative study. *Composites Communications*, 8, 1-6.
- Zhou, X., Wang, Y., Zhang, J., & Liu, F. (2019). Fracturing Behavior Study of Three-Flawed Specimens by Uniaxial Compression and 3D Digital Image Correlation: Sensitivity to Brittleness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 691–718.
- Zolfagharian, A., Khosravani, M., & Kaynak, A. (2022). Fracture Resistance Analysis of 3D-Printed Polymers . *Polymers*, 12(2), 302. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym12020302>

ANEXO A- RESULTADO DO ANALISE DE VARIÂNCIA ANOVA - ENSAIO DE TRAÇÃO.

General Linear Model: Modulo de Young (GPa) versus Tipo de reforço; Orientação de impressão.

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de reforço	Fixed	4	PLA; PLA-Al; PLA-FC; PLA-FV
Orientação de impressão	Fixed	2	0/90; 45/-45

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de reforço	3	4,85502	1,61834	18838,30	0,000
Orientação de impressão	1	0,24215	0,24215	2818,75	0,000
Tipo de reforço*Orientação de impressão	3	0,33312	0,11104	1292,56	0,000
Error	32	0,00275	0,00009		
Total	39	5,43303			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0092686	99,95%	99,94%	99,92%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2,67978	0,00147	1828,58	0,000	
Tipo de reforço					
PLA	-0,01845	0,00254	-7,27	0,000	1,50
PLA-Al	0,48936	0,00254	192,79	0,000	1,50
PLA-FC	0,02416	0,00254	9,52	0,000	1,50
Orientação de impressão					
0/90	0,07781	0,00147	53,09	0,000	1,00
Tipo de reforço*Orientação de impressão					
PLA 0/90	-0,03120	0,00254	-12,29	0,000	1,50
PLA-Al 0/90	0,01261	0,00254	4,97	0,000	1,50
PLA-FC 0/90	0,13580	0,00254	53,50	0,000	1,50

Regression Equation

Modulo de Young (GPa) = 2,67978 - 0,01845 Tipo de reforço_PLA
+ 0,48936 Tipo de reforço_PLA-Al
+ 0,02416 Tipo de reforço_PLA-FC
- 0,49508 Tipo de reforço_PLA-FV
+ 0,07781 Orientação de impressão_0/90
- 0,07781 Orientação de impressão_45/-45
- 0,03120 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA 0/90
+ 0,03120 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA 45/-
45
0/90
+ 0,01261 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-Al
45/-45
- 0,01261 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-Al

0/90 + 0,13580 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC
 45/-45 - 0,13580 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC
 0/90 - 0,11720 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FV
 45/-45 + 0,11720 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FV

General Linear Model: Resistência à tração (MPa) versus Tipo de reforço; Orientação de impressão.

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de reforço	Fixed	4	PLA; PLA-Al; PLA-FC; PLA-FV
Orientação de impressão	Fixed	2	0/90; 45/-45

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de reforço	3	1876,17	625,389	939,22	0,000
Orientação de impressão	1	128,13	128,133	192,43	0,000
Tipo de reforço*Orientação de impressão	3	23,85	7,950	11,94	0,000
Error	32	21,31	0,666		
Total	39	2049,46			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,816004	98,96%	98,73%	98,38%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	39,604	0,129	306,96	0,000	
Tipo de reforço					
PLA	10,585	0,223	47,37	0,000	1,50
PLA-Al	-1,391	0,223	-6,22	0,000	1,50
PLA-FC	-0,637	0,223	-2,85	0,008	1,50
Orientação de impressão					
0/90	-1,790	0,129	-13,87	0,000	1,00
Tipo de reforço*Orientação de impressão					
PLA 0/90	0,317	0,223	1,42	0,165	1,50
PLA-Al 0/90	0,921	0,223	4,12	0,000	1,50
PLA-FC 0/90	-0,040	0,223	-0,18	0,858	1,50

Regression Equation

Resistência a tração(MPa) = 39,604 + 10,585 Tipo de reforço_PLA
 - 1,391 Tipo de reforço_PLA-Al
 - 0,637 Tipo de reforço_PLA-FC
 - 8,558 Tipo de reforço_PLA-FV
 - 1,790 Orientação de impressão_0/90
 + 1,790 Orientação de impressão_45/-45

0/90	+ 0,317	Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA
45/-45	- 0,317	Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA
0/90	+ 0,921	Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-Al
45/-45	- 0,921	Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-Al
0/90	- 0,040	Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC
45/-45	+ 0,040	Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC
0/90	- 1,198	Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FV
45/-45	+ 1,198	Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FV

General Linear Model: Força máxima versus Tipo de reforço; Orientação de impressão

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de reforço	Fixed	4	PLA; PLA-Al; PLA-FC; PLA-FV
Orientação de impressão	Fixed	2	0/90; 45/-45

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de reforço	3	6194844	2064948	941,66	0,000
Orientação de impressão	1	424768	424768	193,70	0,000
Tipo de reforço*Orientação de impressão	3	54552	18184	8,29	0,000
Error	32	70172	2193		
Total	39	6744337			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
46,8282	98,96%	98,73%	98,37%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2253,50	7,40	304,35	0,000	
Tipo de reforço					
PLA	605,6	12,8	47,22	0,000	1,50
PLA-Al	-55,5	12,8	-4,33	0,000	1,50
PLA-FC	-53,3	12,8	-4,15	0,000	1,50
Orientação de impressão					
0/90	-103,05	7,40	-13,92	0,000	1,00
Tipo de reforço*Orientação de impressão					
PLA 0/90	17,5	12,8	1,36	0,183	1,50
PLA-Al 0/90	52,1	12,8	4,06	0,000	1,50
PLA-FC 0/90	-31,9	12,8	-2,49	0,018	1,50

Regression Equation

Forca maxima = 2253,50 + 605,6 Tipo de reforço_PLA - 55,5 Tipo de reforço_PLA-Al
- 53,3 Tipo de reforço_PLA-FC - 496,8 Tipo de reforço_PLA-FV
- 103,05 Orientação de impressão_0/90
+ 103,05 Orientação de impressão_45/-45
+ 17,5 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA 0/90
- 17,5 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA 45/-45
+ 52,1 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-Al 0/90
- 52,1 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-Al 45/-45
- 31,9 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC 0/90
+ 31,9 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC 45/-45
- 37,6 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FV 0/90
+ 37,6 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FV 45/-45

ANEXO B- RESULTADO DO ANALISE DE VARIÂNCIA ANOVA - ENSAIO DE COMPRESSÃO.

General Linear Model: Modulo de Young (GPa) versus Tipo de reforço; Orientação de impressão.

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de reforço	Fixed	3	PLA; PLA-A1; PLA-FC
Orientação de impressão	Fixed	2	0/90; 45/-45

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de reforço	2	0,060714	0,030357	151,27	0,000
Orientação de impressão	1	0,000000	0,000000	0,00	0,974
Tipo de reforço*Orientação de impressão	2	0,014066	0,007033	35,05	0,000
Error	24	0,004816	0,000201		
Total	29	0,079597			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0141662	93,95%	92,69%	90,55%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1,43957	0,00259	556,60	0,000	
Tipo de reforço					
PLA	0,05454	0,00366	14,91	0,000	1,33
PLA-A1	0,00111	0,00366	0,30	0,765	1,33
PLA-FC	-0,05564	0,00366	-15,21	0,000	*
Orientação de impressão					
0/90	0,00009	0,00259	0,03	0,974	1,00
45/-45	-0,00009	0,00259	-0,03	0,974	*
Tipo de reforço*Orientação de impressão					
PLA 0/90	0,02881	0,00366	7,88	0,000	1,33
PLA 45/-45	-0,02881	0,00366	-7,88	0,000	*
PLA-A1 0/90	-0,00542	0,00366	-1,48	0,152	1,33
PLA-A1 45/-45	0,00542	0,00366	1,48	0,152	*
PLA-FC 0/90	-0,02339	0,00366	-6,40	0,000	*
PLA-FC 45/-45	0,02339	0,00366	6,40	0,000	*

Regression Equation

Modulo de Young (GPa) = 1,43957 + 0,05454 Tipo de reforço_PLA
+ 0,00111 Tipo de reforço_PLA-A1
- 0,05564 Tipo de reforço_PLA-FC
+ 0,00009 Orientação de impressão_0/90
- 0,00009 Orientação de impressão_45/-45
+ 0,02881 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA 0/90
- 0,02881 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA 45/-
45
- 0,00542 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-A1
0/90

45/-45 + 0,00542 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-Al
 0/90 - 0,02339 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC
 45/-45 + 0,02339 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC

General Linear Model: Resistência à compressão versus Tipo de reforço; Orientação de impressão.

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de reforço	Fixed	3	PLA; PLA-Al; PLA-FC
Orientação de impressão	Fixed	2	0/90; 45/-45

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de reforço	2	647,714	323,857	1705,81	0,000
Orientação de impressão	1	6,317	6,317	33,27	0,000
Tipo de reforço*Orientação de impressão	2	5,623	2,812	14,81	0,000
Error	24	4,557	0,190		
Total	29	664,210			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,435723	99,31%	99,17%	98,93%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	58,0895	0,0796	730,21	0,000	
Tipo de reforço					
PLA	5,701	0,113	50,67	0,000	1,33
PLA-Al	-0,021	0,113	-0,18	0,857	1,33
PLA-FC	-5,681	0,113	-50,49	0,000	*
Orientação de impressão					
0/90	0,4589	0,0796	5,77	0,000	1,00
45/-45	-0,4589	0,0796	-5,77	0,000	*
Tipo de reforço*Orientação de impressão					
PLA 0/90	-0,388	0,113	-3,45	0,002	1,33
PLA 45/-45	0,388	0,113	3,45	0,002	*
PLA-Al 0/90	0,604	0,113	5,37	0,000	1,33
PLA-Al 45/-45	-0,604	0,113	-5,37	0,000	*
PLA-FC 0/90	-0,216	0,113	-1,92	0,067	*
PLA-FC 45/-45	0,216	0,113	1,92	0,067	*

Regression Equation

Resistência à compressão (MPa) = 58,0895 + 5,701 Tipo de reforço_PLA
 - 0,021 Tipo de reforço_PLA-Al
 - 5,681 Tipo de reforço_PLA-FC
 + 0,4589 Orientação de impressão_0/90
 - 0,4589 Orientação de impressão_45/-45

- 0,388 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA 0/90
- + 0,388 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA 45/-45
- + 0,604 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-A1 0/90
- 0,604 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-A1
45/-45
- 0,216 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC 0/90
- + 0,216 Tipo de reforço*Orientação de impressão_PLA-FC
45/-45

ANEXO C- RESULTADO DO ANALISE DE VARIÂNCIA ANOVA- ENSAIO DE FLEXÃO EM QUATRO PONTOS.

General Linear Model: Modulo de flexão (GPa) versus Tipo de reforço; Orientação de impressão.

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Type of reinforcement	Fixed	4	PLA; PLA-Al; PLA-FC; PLA-FV
Print orientation	Fixed	2	0/90; 45/-45

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Type of reinforcement	3	1,09453	0,364844	4349,52	0,000
Print orientation	1	0,01725	0,017249	205,64	0,000
Type of reinforcement*Print orientation	3	0,00930	0,003100	36,96	0,000
Error	32	0,00268	0,000084		
Total	39	1,12376			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0091587	99,76%	99,71%	99,63%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,96895	0,00145	669,11	0,000	
Type of reinforcement					
PLA	-0,02840	0,00251	-11,32	0,000	1,50
PLA-Al	-0,25895	0,00251	-103,24	0,000	1,50
PLA-FC	0,15611	0,00251	62,24	0,000	1,50
Print orientation					
0/90	0,02077	0,00145	14,34	0,000	1,00
Type of reinforcement*Print orientation					
PLA 0/90	-0,01869	0,00251	-7,45	0,000	1,50
PLA-Al 0/90	-0,00677	0,00251	-2,70	0,011	1,50
PLA-FC 0/90	0,00245	0,00251	0,98	0,336	1,50

Regression Equation

Modulo de Young (GPa) = 0,96895 - 0,02840 Type of reinforcement_PLA
 - 0,25895 Type of reinforcement_PLA-Al
 + 0,15611 Type of reinforcement_PLA-FC
 + 0,13123 Type of reinforcement_PLA-FV
 + 0,02077 Print orientation_0/90
 - 0,02077 Print orientation_45/-45
 - 0,01869 Type of reinforcement*Print orientation_PLA 0/90
 + 0,01869 Type of reinforcement*Print orientation_PLA 45/-
 45
 - 0,00677 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-Al
 0/90

```

+ 0,00677 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-Al
45/-45
+ 0,00245 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FC
0/90
- 0,00245 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FC
45/-45
+ 0,02300 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FV
0/90
- 0,02300 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FV
45/-45

```

General Linear Model: Resistencia à flexão (GPa) versus Tipo de reforço; Orientação de impressão.

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Type of reinforcement	Fixed	4	PLA; PLA-Al; PLA-FC; PLA-FV
Print orientation	Fixed	2	0/90; 45/-45

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Type of reinforcement	3	31,113	10,3710	178,60	0,000
Print orientation	1	28,742	28,7419	494,98	0,000
Type of reinforcement*Print orientation	3	26,424	8,8079	151,69	0,000
Error	32	1,858	0,0581		
Total	39	88,137			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,240970	97,89%	97,43%	96,71%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	14,5445	0,0381	381,74	0,000	
Type of reinforcement					
PLA	-1,0272	0,0660	-15,57	0,000	1,50
PLA-Al	-0,1885	0,0660	-2,86	0,007	1,50
PLA-FC	-0,1927	0,0660	-2,92	0,006	1,50
Print orientation					
0/90	0,8477	0,0381	22,25	0,000	1,00
Type of reinforcement*Print orientation					
PLA 0/90	-0,1689	0,0660	-2,56	0,015	1,50
PLA-Al 0/90	-0,9437	0,0660	-14,30	0,000	1,50
PLA-FC 0/90	-0,1868	0,0660	-2,83	0,008	1,50

Regression Equation

Tensile strength (MPa) = 14,5445 - 1,0272 Type of reinforcement_PLA
- 0,1885 Type of reinforcement_PLA-Al
- 0,1927 Type of reinforcement_PLA-FC
+ 1,4084 Type of reinforcement_PLA-FV

```

+ 0,8477 Print orientation_0/90
- 0,8477 Print orientation_45/-45
- 0,1689 Type of reinforcement*Print orientation_PLA 0/90
+ 0,1689 Type of reinforcement*Print orientation_PLA 45/-
45
- 0,9437 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-A1
0/90
+ 0,9437 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-A1
45/-45
- 0,1868 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FC
0/90
+ 0,1868 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FC
45/-45
+ 1,2994 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FV
0/90
- 1,2994 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FV
45/-45

```

General Linear Model: Força máxima versus Tipo de reforço; Orientação de impressão

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Type of reinforcement	Fixed	4	PLA; PLA-A1; PLA-FC; PLA-FV
Print orientation	Fixed	2	0/90; 45/-45

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Type of reinforcement	3	169925	56642	205,97	0,000
Print orientation	1	106891	106891	388,69	0,000
Type of reinforcement*Print orientation	3	110430	36810	133,86	0,000
Error	32	8800	275		
Total	39	396046			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
16,5831	97,78%	97,29%	96,53%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	963,22	2,62	367,36	0,000	
Type of reinforcement					
PLA	-81,21	4,54	-17,88	0,000	1,50
PLA-A1	-8,00	4,54	-1,76	0,088	1,50
PLA-FC	-11,77	4,54	-2,59	0,014	1,50
Print orientation					
0/90	51,69	2,62	19,72	0,000	1,00
Type of reinforcement*Print orientation					
PLA 0/90	-26,25	4,54	-5,78	0,000	1,50
PLA-A1 0/90	-56,23	4,54	-12,38	0,000	1,50
PLA-FC 0/90	-2,31	4,54	-0,51	0,615	1,50

Regression Equation

Maximum Strength - Fmax (N) = 963,22 - 81,21 Type of reinforcement_PLA
 - 8,00 Type of reinforcement_PLA-Al
 - 11,77 Type of reinforcement_PLA-FC
 + 100,97 Type of reinforcement_PLA-FV
 + 51,69 Print orientation_0/90
 - 51,69 Print orientation_45/-45
 - 26,25 Type of reinforcement*Print orientation_PLA
 0/90
 + 26,25 Type of reinforcement*Print orientation_PLA
 45/-45
 - 56,23 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-
 Al 0/90
 + 56,23 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-
 Al 45/-45
 - 2,31 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FC
 0/90
 + 2,31 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FC
 45/-45
 + 84,78 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-
 FV 0/90
 - 84,78 Type of reinforcement*Print orientation_PLA-
 FV 45/-45

General Linear Model: KIC (MPa.m^{1/2}) versus Tipo de reforço; Orientação de impressão

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Type of reinforcement	Fixed	4	PLA; PLA-Al; PLA-FC; PLA-FV
Print orientation	Fixed	2	0/90; 45/-45

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Type of reinforcement	3	1,9434	0,64780	165,31	0,000
Print orientation	1	1,9361	1,93610	494,06	0,000
Type of reinforcement*Print orientation	3	1,6279	0,54264	138,47	0,000
Error	32	0,1254	0,00392		
Total	39	5,6328			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0626000	97,77%	97,29%	96,52%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3,86006	0,00990	389,99	0,000	
Type of reinforcement					
PLA	-0,2398	0,0171	-13,99	0,000	1,50
PLA-Al	-0,0551	0,0171	-3,21	0,003	1,50
PLA-FC	-0,0651	0,0171	-3,79	0,001	1,50
Print orientation					
0/90	0,22001	0,00990	22,23	0,000	1,00
Type of reinforcement*Print orientation					

PLA 0/90	-0,0260	0,0171	-1,52	0,139	1,50
PLA-A1 0/90	-0,2490	0,0171	-14,52	0,000	1,50
PLA-FC 0/90	-0,0390	0,0171	-2,28	0,030	1,50

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \text{KIC (MPa.m}^{1/2}\text{)} = & 3,86006 - 0,2398 \text{ Type of reinforcement_PLA} \\
 & - 0,0551 \text{ Type of reinforcement_PLA-A1} \\
 & - 0,0651 \text{ Type of reinforcement_PLA-FC} \\
 & + 0,3599 \text{ Type of reinforcement_PLA-FV} \\
 + 0,22001 \text{ Print orientation_0/90} \\
 & - 0,22001 \text{ Print orientation_45/-45} \\
 & - 0,0260 \text{ Type of reinforcement*Print orientation_PLA 0/90} \\
 & + 0,0260 \text{ Type of reinforcement*Print orientation_PLA 45/-45} \\
 & - 0,2490 \text{ Type of reinforcement*Print orientation_PLA-A1 0/90} \\
 & + 0,2490 \text{ Type of reinforcement*Print orientation_PLA-A1 45/-45} \\
 & - 0,0390 \text{ Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FC 0/90} \\
 & + 0,0390 \text{ Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FC 45/-45} \\
 & + 0,3140 \text{ Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FV 0/90} \\
 & - 0,3140 \text{ Type of reinforcement*Print orientation_PLA-FV 45/-45}
 \end{aligned}$$

ANEXO D- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO, COMPRESSÃO E FLEXÃO EM QUATRO PONTOS DOS CORPOS DE PROVA DE PLA PURO, PLA-FV, PLA-FC E PLA-AI.

Tipo de reforço e orientação de impressão	Ensaio de tração			Ensaio de compressão			Ensaio de flexão		
	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Alongamento	
PLA 0°/90°	2,70 ± 0,08	47,45 ± 1,28	0,025 ± 0,002	1,53 ± 0,04	65,55 ± 1,16	0,98 ± 0,23	14,32 ± 3,48	0,049 ± 0,01	
PLA-FV 0°/90°	2,17 ± 0,06	28,06 ± 0,72	0,016 ± 0,001			1,15 ± 0,07	17,79 ± 0,46	0,046 ± 0,01	
PLA-FC 0°/90°	3,05 ± 0,07	32,97 ± 0,62	0,021 ± 0,001	1,34 ± 0,04	53,27 ± 0,66	1,13 ± 0,06	15,01 ± 0,21	0,044 ± 0,01	
PLA-AI 0°/90°	3,25 ± 0,03	37,67 ± 1,30	0,017 ± 0,001	1,43 ± 0,13	59,06 ± 1,09	0,71 ± 0,16	14,26 ± 0,25	0,051 ± 0,01	
PLA 45°/-45°	2,67 ± 0,06	50,83 ± 0,92	0,027 ± 0,01	1,45 ± 0,04	63,55 ± 1,59	1,04 ± 0,11	13,23 ± 0,70	0,055 ± 0,01	
PLA-FV 45°/45°	2,14 ± 0,14	33,63 ± 1,47	0,039 ± 0,003			1,01 ± 0,08	13,70 ± 0,44	0,047 ± 0,01	
PLA-FC 45°/45°	2,59 ± 0,06	41,30 ± 0,96	0,061 ± 0,01	1,41 ± 0,01	52,31 ± 0,27	1,08 ± 0,08	13,58 ± 0,50	0,046 ± 0,01	
PLA-AI 45°/45°	3,18 ± 0,07	38,53 ± 1,05	0,032 ± 0,004	1,46 ± 0,05	56,89 ± 0,36	0,60 ± 0,14	14,65 ± 0,62	0,042 ± 0,01	