

ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, MORFOLÓGICAS E MECÂNICAS DE PA E PLA NA IMPRESSÃO 3D

COMPARATIVE STUDY OF THE THERMAL, MORPHOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PA AND PLA IN 3D PRINTING

Rafael Aldreem Alves da Silva ¹
Marcos Gomes Ghislandi ²

RESUMO

Este estudo realizou uma caracterização abrangente das propriedades térmicas, morfológicas e mecânicas de filamentos de poli(ácido láctico) (PLA) e poliamida (PA) utilizados em impressão 3D, incluindo suas variantes reforçadas com fibras de carbono (CF) e vidro (GF), bem como versões especializadas para aplicações de alta resistência (PRO) e temperatura (PAHT). Através de técnicas de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), ensaios de tração e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), investigou-se o comportamento térmico, a resistência mecânica e a morfologia interna dos filamentos. Os resultados indicam que o PAHT CF15, reforçado com 15% de fibra de carbono, apresenta a melhor resistência térmica e mecânica, sendo adequado para aplicações de alta temperatura. O PA6 GF30, com 30% de fibra de vidro, oferece um bom equilíbrio entre rigidez e resistência. Em contrapartida, os materiais PLA White e PLA Pro são mais indicados para aplicações em temperaturas moderadas. A análise dos diferentes padrões de preenchimento (40% e 100%) revela que a escolha da configuração depende do custo-benefício, considerando a aplicação específica e a resistência desejada. O estudo sugere que melhorias na adesão matriz-fibra podem otimizar o desempenho dos compósitos, especialmente para o PAHT CF15.

Palavras-chave: impressão 3D; moldagem por extrusão; PA; PL; técnicas de caracterização.

ABSTRACT

This study conducted a comprehensive characterization of the thermal, morphological, and mechanical properties of poly(lactic acid) (PLA) and polyamide (PA) filaments used in 3D printing, including their carbon fiber (CF) and glass fiber (GF) reinforced variants, as well as specialized versions for high-strength (PRO) and high-temperature (PAHT) applications. Using Differential Scanning Calorimetry (DSC), tensile tests, and Scanning Electron Microscopy (SEM), the thermal behavior, mechanical strength, and internal morphology of the filaments were investigated. The results indicate that PAHT CF15, reinforced with 15% carbon fiber, exhibits the best thermal and mechanical resistance, making it suitable for high-temperature applications. PA6 GF30, with 30% glass fiber, offers a good balance between stiffness and strength. In contrast, PLA White and PLA Pro materials are more suited for moderate-temperature applications. The analysis of different infill patterns (40% and 100%) reveals that the choice of configuration depends on cost-effectiveness, considering the specific application

¹Bacharelado em Engenharia de Materiais - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho. 2024.

²Doutor em Materials and Interface Science pela Eindhoven University of Technology, TU/e, Holanda, 2012.

and desired strength. The study suggests that improvements in matrix-fiber adhesion could optimize the performance of the composites, particularly for PAHT CF15.

Keywords: 3D printing; extrusion molding; PA; PLA; characterization techniques.

INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva, conhecida também como Impressão 3D, representa uma revolucionária técnica de fabricação de objetos em três dimensões¹. Através de um processo que envolve a sobreposição controlada e digital de materiais em camadas sucessivas, esta metodologia permite a construção de estruturas complexas de maneira integral². Tal abordagem se distingue radicalmente dos métodos tradicionais de fabricação subtrativa, os quais dependem da remoção de material por técnicas como corte, perfuração e usinagem³. As principais vantagens da Manufatura Aditiva incluem sua eficiência operacional, capaz de acelerar o processo produtivo e reduzir custos através da economia de material; a habilidade de gerar formas e estruturas complexas, impulsionando o avanço do design; e sua acessibilidade financeira, tornando equipamentos e materiais mais disponíveis para um público amplo⁴.

No espectro das técnicas de Impressão 3D, a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) emerge como uma das mais adotadas devido à sua operação intuitiva e relação custo-benefício vantajosa⁵. Funcionando com base em um sistema de extrusão, o procedimento inicia com um filamento que é aquecido progressivamente até alcançar uma consistência flexível, sendo posteriormente extrudado por um bico de alta precisão sobre uma plataforma específica para construção. Conforme o material é aplicado, ele resfria e solidifica prontamente, ligando-se às camadas anteriores. Após a finalização de cada camada, a plataforma é reajustada para baixo, permitindo a deposição da próxima

camada de material. Esse processo é repetido até a completa formação do objeto desejado^{6,7}.

Atualmente, as impressoras 3D que utilizam a técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) representam os equipamentos de consumo mais difundidos para a impressão de polímeros e compostos poliméricos, graças aos sistemas de extrusão da Manufatura Aditiva. Diferenciando-se de outras metodologias de extrusão, a FDM se especializa na fusão do material. Em 2016, o consumo mundial de sistemas de Manufatura Aditiva, incluindo materiais de impressão, componentes e software relacionado, ultrapassou os US\$ 13 bilhões. Prevê-se ainda que os investimentos globais em impressão 3D cresçam a um ritmo anual de 22,3% nos anos subsequentes⁸. Conforme destacado na pesquisa de DOUGLAS⁹, a Manufatura Aditiva revela-se particularmente promissora no setor alimentício contemporâneo, ao proporcionar uma significativa redução de custos operacionais e aprimoramento de processos. Esta tecnologia prova ser eficiente na redução de despesas com a aquisição de peças de reposição para manutenção e na aceleração dos tempos de entrega. Para tais aplicações práticas, é crucial que as peças impressas resistam a diversas formas de estresse mecânico e condições ambientais. Os filamentos termoplásticos mais utilizados nestas impressoras incluem Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poli(ácido láctico) (PLA), Politereftalato de Etileno Glicol (PETG), Policarbonato (PC) e Nylon (PA)¹⁰.

O Poli(ácido láctico) (PLA), um polímero termoplástico e biodegradável, se origina de fontes renováveis, incluindo açúcar de milho, batata e cana-de-açúcar, através de processos de bioconversão e polimerização. Este material se distingue

por suas notáveis propriedades de biocompatibilidade, biodegradabilidade, processabilidade superior, estabilidade térmica e impacto ambiental mínimo¹¹⁻¹⁵. Em termos de propriedades mecânicas, o PLA demonstra uma resistência à tração na faixa de 50 a 70 MPa e um módulo de elasticidade de 3,0 a 4,0 GPa. Estas características podem variar em função da massa molar e da composição estereoquímica do polímero. Além disso, o PLA apresenta uma temperatura de transição vítrea situada entre 55 e 65 °C e, em estado semicristalino, exibe um ponto de fusão de 170 a 180 °C¹⁶⁻¹⁹. Estudos revelam que o PLA em sua forma pura alcança valores superiores de resistência à tração e de alongamento na ruptura quando comparado a compósitos baseados neste material, sugerindo que a adição de certos elementos pode diminuir a resistência do material²⁰. O uso extensivo do PLA atravessa várias indústrias, especialmente notável na produção de implantes médicos biodegradáveis e embalagens para alimentos, enfatizando sua relevância e versatilidade²¹.

Em diversos estudos sobre as propriedades mecânicas do Nylon 6 (PA), os resultados experimentais têm demonstrado como as condições de teste impactam diretamente suas propriedades. Um experimento conduzido sob a norma ASTM D638M, a uma velocidade de 5 mm/min, identificou que o Nylon 6 possui uma resistência máxima à tração de 55 MPa e uma taxa de alongação na ruptura de 25%²². Alterando a velocidade para 50 mm/min, foi observado um aumento na resistência à tração para 68 MPa, embora a deformação na ruptura tenha caído drasticamente para 2%, com a adição de um módulo de elasticidade reportado em 2,7 GPa²³. Replicando esses parâmetros de teste em um estudo posterior, os dados coletados foram bastante similares, revelando uma resistência à tração de 65 MPa e um módulo de elasticidade ligeiramente acima de 2 GPa²⁴. Por outro lado, ao realizar testes de flexão de três pontos conforme a ASTM

D790, com um espaçamento entre apoios de 50 mm, foi alcançada uma resistência à flexão de 94,2 Mpa, já quando ajustada a distância entre os apoios para 64 mm, a resistência à flexão observada foi de 89 MPa²³⁻²⁵. Estes estudos evidenciam a sensibilidade do Nylon 6 às variações nas metodologias de teste, destacando a importância do contexto experimental na avaliação de suas propriedades mecânicas.

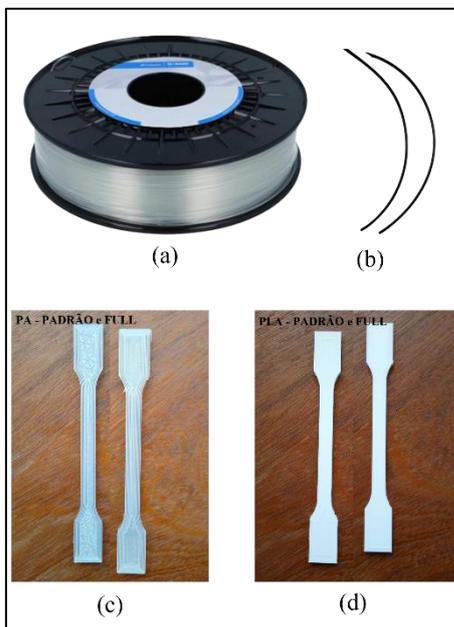
Este trabalho propõe a caracterização dos filamentos de PLA e PA, incluindo suas variantes reforçadas com fibra de carbono (CF) e fibra de vidro (GF), assim como os especializados filamentos PRO (Professional) e HT (High Temperature), utilizados na Manufatura Aditiva. Através de técnicas avançadas como Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), ensaios de tração e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), objetiva-se compreender profundamente as propriedades termomecânicas e morfológicas destes materiais. A análise visa não apenas elucidar o comportamento térmico, a resistência mecânica e a estrutura interna dos filamentos, mas também avaliar como as adições de fibra e as especificações dos filamentos PRO e HT influenciam no desempenho e na qualidade final dos objetos impressos, contribuindo para a otimização dos processos de impressão 3D e a expansão de suas aplicações práticas.

METODOLOGIA

Neste estudo, foram analisados dois tipos de filamentos poliméricos com diâmetro de 1,75 mm, ambos empregados em impressão 3D: o Ultrafuse® PLA e o Ultrafuse® PA, juntamente com suas variantes fornecidas pela BASF, conforme ilustrado na Figura 1(a e b). A caracterização dos materiais foi realizada sob duas condições distintas: em sua forma original, como filamentos, e após o processamento por meio da Manufatura Aditiva por Extrusão, como corpos de prova. Durante a impressão 3D, a

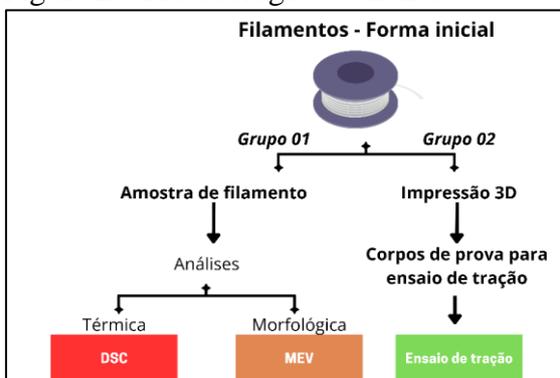
porcentagem de preenchimento do corpo foi variada, sendo o preenchimento de 40% denominado como PADRÃO e o de 100% como FULL (Tabela 1), para os corpos de prova, os quais são exibidos nas Figuras 1(c e d), respectivamente. A metodologia experimental adotada neste trabalho foi dividida em dois principais grupos de análise, detalhados na Figura 2.

Figura 1 – Bobinas de filamento (forma comercializada) (a), amostras de filamento (b), peças fabricadas por impressão 3D (c e d)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 2 – Metodologia de análise



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Conforme apresentado na Tabela 1, foram avaliados dois polímeros, PA e PLA,

junto a cinco variações desses materiais. Para o PA, as variações incluíram: PA natural (filamento padrão), PAHT CF15 (filamento de alta resistência térmica enriquecido com 15% de fibra de carbono para aplicações em altas temperaturas) e PA6 GF30 (variante com 30% de fibra de vidro para reforço mecânico). Quanto ao PLA, as variações examinadas foram: PLA WHITE e PLA PRO (este último promovido como filamento de alto desempenho, oferecendo propriedades mecânicas superiores em comparação ao PLA WHITE). Ao todo, cinco filamentos foram testados, cada um impresso com dois diferentes padrões de preenchimento: padrão (40% de preenchimento) e full (100% de preenchimento), visando avaliar o impacto desses parâmetros no desempenho dos materiais.

Tabela 1 – Tipos de filamentos e preenchimentos

POLÍMERO	FILAMENTO	PREENCHIMENTO	
PA	PA NATURAL	PADRÃO (40%)	FULL (100%)
	PAHT CF15	PADRÃO (40%)	FULL (100%)
	PA6 GF30	PADRÃO (40%)	FULL (100%)
PLA	PLA WHITE	PADRÃO (40%)	FULL (100%)
	PLA PRO	PADRÃO (40%)	FULL (100%)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Grupo 01: Análises Térmica e Morfológica

Inicialmente, os filamentos foram submetidos a análises térmicas e morfológicas. O comportamento térmico dos termoplásticos foi investigado por meio da técnica de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), visando identificar as temperaturas de transição vítrea (T_g), fusão (T_m) e cristalização (T_c).

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi empregada para analisar, principalmente, o recobrimento das fibras pelos filamentos poliméricos PAHT CF15, que contém 15% de fibra de carbono, e ao PA6 GF30, que incorpora 30% de fibra de vidro em suas composições.

Os parâmetros específicos utilizados nas análises de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições dos ensaios térmicos e morfológicos

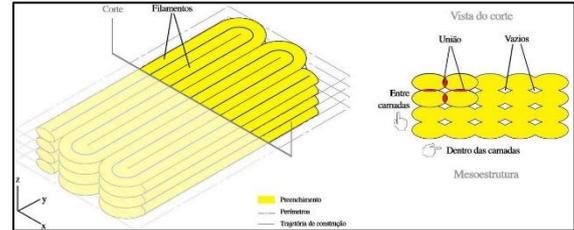
ENSAIO	CONDIÇÕES	EQUIPAMENTOS
DSC	Rampa de aquecimento de 0°C a 250°C, taxa de 10°C/min, atmosfera de nitrogênio.	DSC25 TA instruments
MEV	Tensão de 1kV a 10kV.	VEGA3 TESCAN

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Grupo 02: Análises mecânicas

As peças produzidas através do processo de Impressão 3D por FDM (Fused Deposition Modeling) onde o filamento é extrusado e depositado camada a camada, assim, exibem uma mesoestrutura caracterizada pela presença de uma densidade de espaços vazios e pela formação de ligações entre filamentos depositados, tanto dentro quanto entre camadas, conforme ilustrado na Figura 25. Esta mesoestrutura é definida pelas trajetórias de deposição dos filamentos e pelos parâmetros de processo adotados. Os vazios nas peças surgem devido à forma oblonga dos filamentos que as compõem. Fatores como o tamanho e a forma desses vazios, além da qualidade da união entre os filamentos individuais (área de contato), são determinantes para a anisotropia e a resistência mecânica das peças, influenciando diretamente suas propriedades mecânicas²⁶.

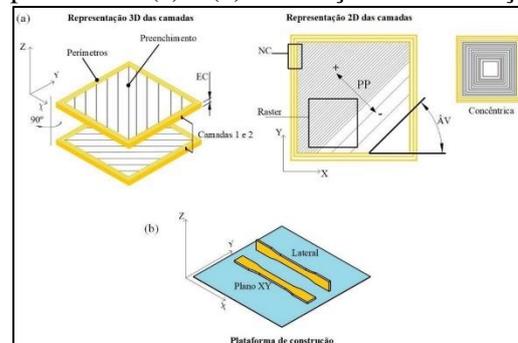
Figura 3 – Condições dos ensaios térmicos e morfológicos



Fonte: Santana, 2018.

Reconhecendo a importância crucial dos parâmetros de processo na moldagem das características estruturais e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas das peças produzidas por impressão 3D, este trabalho focou na criação de corpos de prova destinados a ensaios de tração. Estes foram projetados de acordo com as normas da ISO 527-2²⁷, Tipo 1A, utilizando polímeros PA e PLA, sob diferentes regimes de preenchimento (40% e 100%). Para uma compreensão mais clara sobre a metodologia construtiva das amostras, introduzimos conceitos chave relativos aos parâmetros de processo. Estes conceitos estão visualmente representados na Figura 4 (a) e (b), e a Tabela 3 detalha os parâmetros específicos adotados na impressão dos corpos de prova, proporcionando uma visão mais detalhada sobre como as configurações selecionadas afetam as propriedades finais dos corpos de prova impressos.

Figura 4 – Representação das camadas e dos parâmetros (a) e (b) orientação de construção



Fonte: Santana, 2018.

Conforme evidenciado na Tabela 3, realizou-se a variação do preenchimento interno das peças, adotando-se duas

configurações específicas: 40% e 100% de preenchimento. Ajustes na temperatura de extrusão foram necessários para adaptar-se às peculiaridades dos filamentos PA e PLA, além de modificações na velocidade de impressão, mantendo-se os demais parâmetros consistentes para todos os corpos de prova. Cada variedade de filamento teve seis corpos de prova impressos, distribuídos igualmente entre as modalidades de preenchimento padrão (40%) e completo (100%), totalizando 30 corpos de prova fabricados com a impressora S5 da marca Ultimaker todos destinados à realização de testes de tração. Esta estratégia metodológica viabiliza um estudo comparativo aprofundado sobre o impacto da densidade de preenchimento e do tipo de filamento nas propriedades mecânicas das peças. A impressora utilizada e os corpos de prova produzidos são apresentadas na Figura 5 (a) e (b) respectivamente.

Tabela 3 – Parâmetros de impressão

PLA WHITE								
CONDIÇÃO	CONFIGURAÇÃO PRINCIPAL		PARAMETROS AUXILIARES					
	ÁV(°)	ED(u.a)	O.C(u.a)	PP(%)	NC(u.a)	EC(mm)	T de Extrusão (C)	Velocidade impressão(mm/s)
Padrão	45/-45	Raster	Plano XY	40	10	3	210	45
Full	45/-45	Raster	Plano XY	100	10	3	210	45

PLA PRO								
CONDIÇÃO	CONFIGURAÇÃO PRINCIPAL		PARAMETROS AUXILIARES					
	ÁV(°)	ED(u.a)	O.C(u.a)	PP(%)	NC(u.a)	EC(mm)	T de Extrusão (C)	Velocidade impressão(mm/s)
Padrão	45/-45	Raster	Plano XY	40	10	3	210	60
Full	45/-45	Raster	Plano XY	100	10	3	210	60

PA NATURAL								
CONDIÇÃO	CONFIGURAÇÃO PRINCIPAL		PARAMETROS AUXILIARES					
	ÁV(°)	ED(u.a)	O.C(u.a)	PP(%)	NC(u.a)	EC(mm)	T de Extrusão (C)	Velocidade impressão(mm/s)
Padrão	45/-45	Raster	Plano XY	40	10	3	250	45
Full	45/-45	Raster	Plano XY	100	10	3	250	45

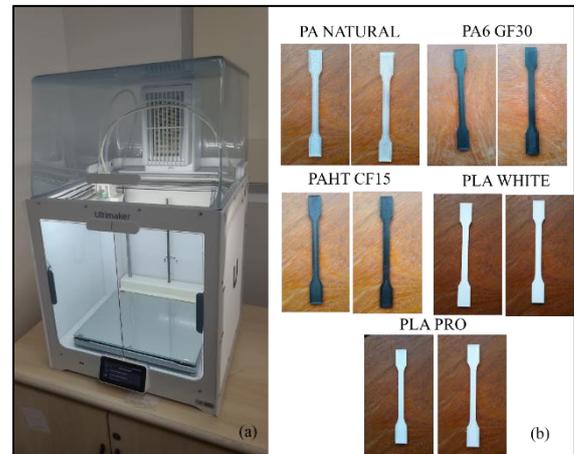
PAHT CF15								
CONDIÇÃO	CONFIGURAÇÃO PRINCIPAL		PARAMETROS AUXILIARES					
	ÁV(°)	ED(u.a)	O.C(u.a)	PP(%)	NC(u.a)	EC(mm)	T de Extrusão (C)	Velocidade impressão(mm/s)
Padrão	45/-45	Raster	Plano XY	40	10	3	265	40
Full	45/-45	Raster	Plano XY	100	10	3	265	40

PA6 GF30								
CONDIÇÃO	CONFIGURAÇÃO PRINCIPAL		PARAMETROS AUXILIARES					
	ÁV(°)	ED(u.a)	O.C(u.a)	PP(%)	NC(u.a)	EC(mm)	T de Extrusão (C)	Velocidade impressão(mm/s)
Padrão	45/-45	Raster	Plano XY	40	10	3	265	50
Full	45/-45	Raster	Plano XY	100	10	3	265	50

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os ensaios de tração dos corpos de prova, foram feitos em um equipamento modelo WDW-50E da Time Group, com célula de carga de 10kN e velocidade de ensaio de 5 mm/min. Também foi medida a massa dos corpos de prova.

Figura 5 – Impressora e corpos de provas padrão (esquerda) e full (direita)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calorimetria (DSC)

Primeiro Aquecimento: Conforme mostrado na Figura 6 e Tabela 4, os materiais analisados apresentam comportamentos térmicos diferentes, que indicam suas adequações para aplicações em altas temperaturas. O PA NATURAL exibe picos de fusão (T_m) a 190°C e 239°C , devido ao histórico de processamento ou sugerindo que ele pode resistir bem a altas temperaturas devido à presença de múltiplas fases cristalinas²⁸, o que o torna adequado para aplicações que exigem estabilidade térmica. O PAHT CF15, com um ponto de fusão elevado a 232°C , demonstra maior potencial para uso em condições de temperatura elevada, reforçado por sua composição com fibras de carbono, que melhoram sua resistência térmica e estabilidade estrutural²⁹. O PA6 GF30, com temperaturas de fusão de 168°C e 201°C , também possui boa resistência ao calor, embora inferior à do PAHT CF15, sendo mais adequado para aplicações de temperatura intermediária a alta³⁰. Em contraste, os materiais PLA WHITE e PLA PRO, com temperaturas de fusão de 150°C e 174°C , respectivamente, mostram estabilidade térmica limitada, sugerindo

que são mais apropriados para aplicações que não envolvem exposição a altas temperaturas³¹.

Tabela 4 – Parâmetros de análise DSC – 1° Aquecimento

MATERIAL	RESULTADOS DA ANÁLISE DE DSC		
	T _g (°C)	T _m (°C)	T _c (°C)
PA NATURAL	51,50	190,09; 239,91	-
PAHT CF15	43,79	232,14	-
PA6 GF30	56,05	168,08; 201,02	-
PLA WHITE	61,57	103,41	146,13; 150,58
PLA PRO	61,41	174,29	174,44

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Resfriamento: Durante o resfriamento, conforme apresentado na Figura 6 e Tabela 2, observa-se que o PA Natural, PAHT CF15 e PA6 GF30 possuem picos de cristalização (T_c) a 156°C, 182°C e 163°C, respectivamente. Esses dados indicam que esses materiais têm a capacidade de recrystalizar a temperaturas relativamente altas, o que confere maior estabilidade térmica em comparação com os materiais PLA³². O PAHT CF15, que apresenta o maior T_c (182°C), destaca-se como o material com melhor desempenho para aplicações em altas temperaturas, onde a resistência térmica e a estabilidade estrutural são críticas³². Os materiais PLA White e PLA Pro, por outro lado, apresentam temperaturas de transição vítrea (T_g) em torno de 52°C, com o PLA PRO exibindo um pico de cristalização em 94°C. Esses valores indicam que os PLAs são menos adequados para ambientes de alta temperatura e são mais recomendados para condições de temperatura moderada a baixa³³. De todo modo o PLA PRO demonstra ser um material cristalino, por apresentar cristalização no resfriamento³³.

Tabela 5 – Parâmetros de análise DSC – Resfriamento

MATERIAL	RESULTADOS DA ANÁLISE DE DSC		
	T _g (°C)	T _m (°C)	T _c (°C)
PA NATURAL	-	-	156,78
PAHT CF15	-	-	182,37
PA6 GF30	-	-	163,14
PLA WHITE	52,19	-	-
PLA PRO	52,31	-	94,65

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Segundo Aquecimento: Conforme observado na Figura 6 e Tabela 6, os materiais PA Natural, PAHT CF15 e PA6 GF30 apresentam picos de fusão bem definidos durante o segundo aquecimento, após a eliminação do histórico térmico no primeiro aquecimento. O PA NATURAL mantém picos de fusão em torno de 190°C, indicando certa estabilidade térmica, adequada para uso em temperaturas moderadas. O PAHT CF15 exibe picos de fusão em aproximadamente 230°C, confirmando sua superioridade em aplicações de alta temperatura devido ao reforço com fibras de carbono³⁴. O PA6 GF30 apresenta pico de fusão em cerca de 200°C, sugerindo uma resistência térmica moderada.

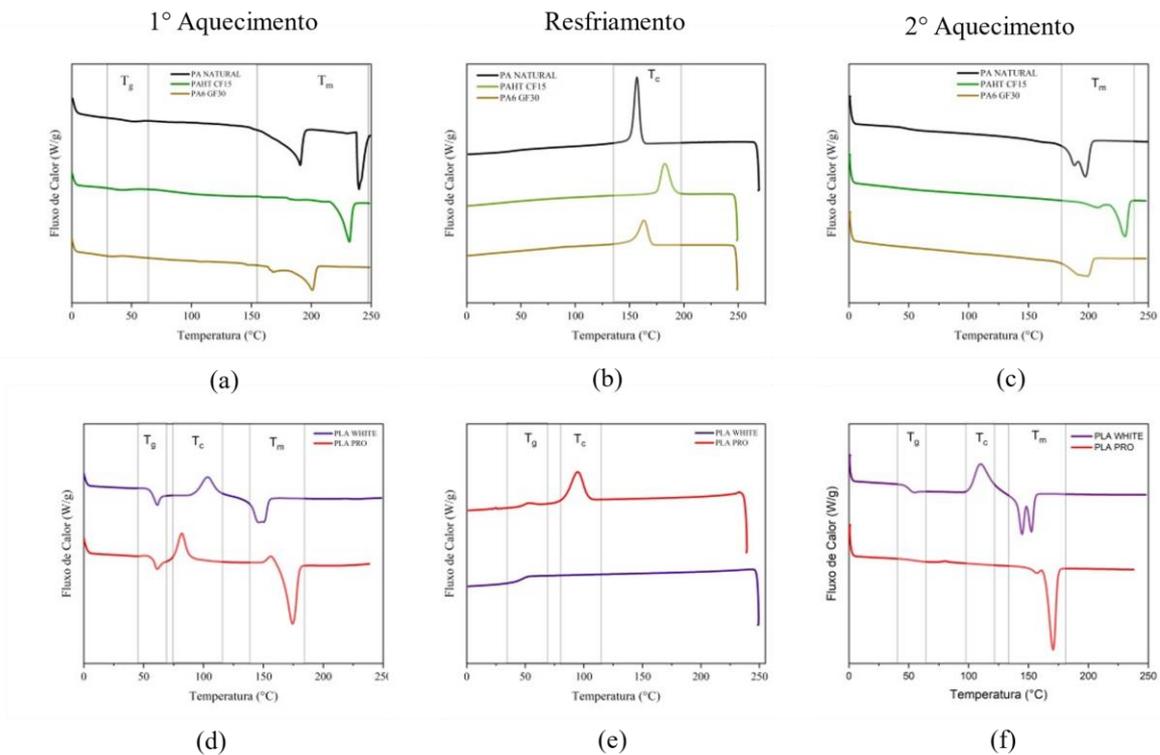
O PLA WHITE apresenta uma transição vítrea ao redor de 52°C, eliminação de água em torno de 100°C e um pico de fusão próximo a 150°C, enquanto o PLA PRO mostra um pico de fusão em torno de 174°C, tanto no primeiro quanto no segundo aquecimento. Esses dados indicam que os materiais PLA são menos adequados para altas temperaturas³⁵.

Tabela 6 – Parâmetros de análise DSC – 2° Aquecimento

MATERIAL	RESULTADOS DA ANÁLISE DE DSC		
	T _g (°C)	T _m (°C)	T _c (°C)
PA NATURAL	-	188,33; 197,48	-
PAHT CF15	-	208,65; 230,62	-
PA6 GF30	-	199,84	-
PLA WHITE	53,51	144,54; 152,47	109,84
PLA PRO	-	170,31	-

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 6 – Curvas da análise de DSC, PA (a), (b) e (c) e PLA (d), (e) e (f)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Ensaio de Tração

Análise dos Materiais FULL

PA Natural: O PA Natural (FULL), conforme Figura 7 e Tabela 6, apresenta uma tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) de 28,54 MPa e uma deformação máxima ($\epsilon_{\text{máx}}$) de 3,60 mm. Este material demonstra uma resistência moderada à tração, com um comportamento que indica um alongamento relativamente alto antes da ruptura. Isso sugere que o PA Natural possui uma boa ductilidade, tornando-o adequado para aplicações onde a flexibilidade é importante, mas não necessariamente onde se requer alta resistência à tração³⁶.

PAHT CF15: O PAHT CF15 (FULL) conforme a Figura 7 e Tabela 6 apresenta a maior tensão máxima entre todos os materiais, com um valor de 96,10 MPa, e uma deformação máxima de 3,5 mm. Este resultado indica uma excelente resistência à tração, atribuída ao reforço com fibras de carbono, que proporciona maior rigidez e resistência mecânica. A

deformação relativamente baixa na tensão máxima reflete a natureza menos dúctil do material, o que o torna ideal para aplicações estruturais que exigem alta resistência e pouca deformação sob carga³⁶.

PA6 GF30: O PA6 GF30 (FULL) na Figura 7 e Tabela 6 apresenta uma tensão máxima de 52,69 MPa e uma deformação máxima de 2,5 mm. Comparado ao PAHT CF15, o PA6 GF30 possui menor resistência à tração, mas ainda assim oferece boa resistência devido ao reforço com fibras de vidro, o que aumenta a rigidez sem comprometer demasiadamente a ductilidade. Este material é adequado para aplicações intermediárias onde se requer uma combinação de resistência e alguma flexibilidade³⁷.

PLA WHITE e PLA PRO: Os materiais PLA White e PLA Pro apresentam tensões máximas de 46,67 MPa e 42,93 MPa, respectivamente, com deformações máximas de 3,16 mm e 3,52 mm (Figura 8 e Tabela 6). Esses materiais demonstram boa resistência à tração para polímeros, com uma moderada capacidade de deformação antes da ruptura. O comportamento

mecânico indica que ambos os materiais são apropriados para aplicações que requerem uma combinação de resistência moderada e alguma flexibilidade, mas não são indicados para aplicações onde são necessárias resistências extremas^{36,37}.

Tabela 6 – Parâmetros do ensaio de tração (FULL)

MATERIAL FULL	PROPRIEDADES - MÉDIA		
	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (mm)	Massa (g)
PA NATURAL	28,54	36,89	10,881
PAHT CF15	96,10	3,49	10,794
PA6 GF30	52,69	2,50	12,017
PLA WHITE	46,67	3,16	11,715
PLA PRO	42,93	3,52	11,583

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Análise dos Materiais PADRÃO

PA NATURAL: No estado padrão, o PA Natural na Figura 7 e Tabela 7 apresenta uma tensão máxima ligeiramente inferior, de 26,89 MPa, e uma menor deformação máxima de 2,904 mm/mm, indicando uma diminuição na capacidade de absorver deformação em comparação ao estado FULL. Isso sugere que o processamento ou as condições padrão influenciam na ductilidade e resistência do material^{36,37}.

PAHT CF15: O PAHT CF15 (Padrão) na Figura 7 e Tabela 7 demonstra uma tensão máxima ainda maior, de 102,26 MPa, com uma deformação máxima de 3,70 mm. Este aumento na tensão máxima em relação ao estado FULL confirma a excelente performance deste material sob diferentes condições de processamento, reforçando sua aptidão para aplicações que exigem máxima resistência à tração^{36,37}.

PA6 GF30: O PA6 GF30 (Padrão) exibe uma tensão máxima de 39,61 MPa e uma deformação de 2,35 mm, apresentando uma redução em ambos os parâmetros em comparação ao estado FULL (Figura 7 e Tabela 7). Isso sugere que o material é menos eficiente sob condições padrão, com menor capacidade de resistência e deformação, o que deve ser considerado na escolha do material para aplicações específicas^{36,37}.

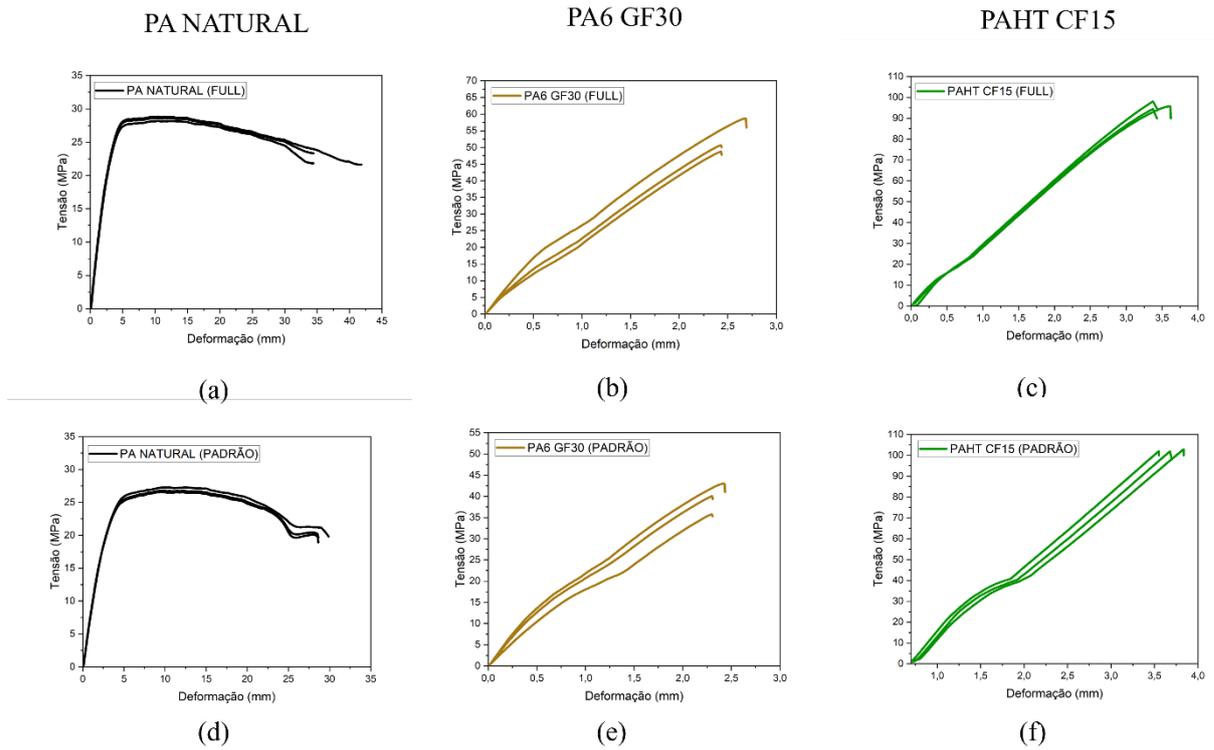
PLA WHITE e PLA PRO: Os materiais PLA White e PLA Pro no estado padrão apresentam tensões máximas de 41,79 MPa e 42,26 MPa, respectivamente, e deformações na máxima de 3,05 mm e 3,38 mm (Figura 8 e Tabela 7). A pequena variação em relação ao estado FULL indica que o processamento padrão não afeta significativamente suas propriedades de tração, mantendo um equilíbrio entre resistência e deformabilidade^{36,37}.

Tabela 7 – Parâmetros do ensaio de tração (PADRÃO)

MATERIAL PADRÃO	PROPRIEDADES - MÉDIA		
	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (mm)	Massa (g)
PA NATURAL	26,89	29,04	10,405
PAHT CF15	102,26	3,70	9,497
PA6 GF30	39,61	2,35	10,704
PLA WHITE	41,79	3,05	10,749
PLA PRO	42,26	3,38	10,619

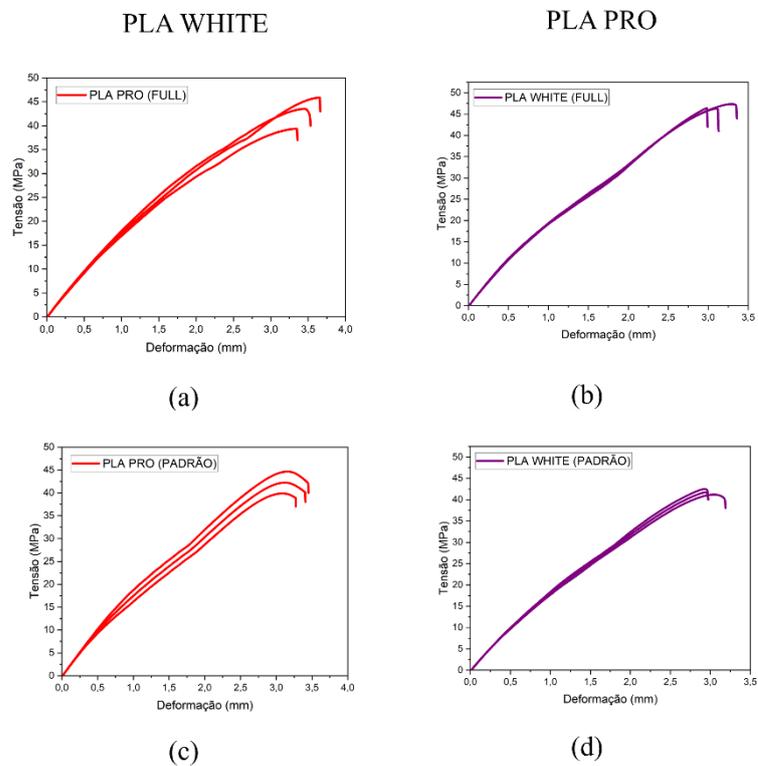
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 7 – Curvas tensão x deformação, PA PADRÃO (a), (b) e (c) PA FULL (d), (e) e (f)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 8 – Curvas tensão x deformação, PLA PADRÃO (a) e (b) PLA FULL (c) e (d)

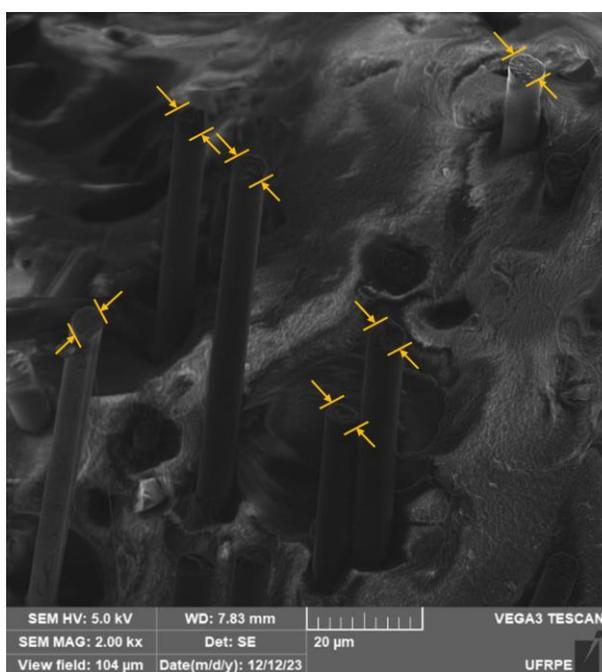


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Morfologia (MEV)

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) – Figura 9 – fornecem uma análise detalhada das morfologias de fratura dos compósitos de polímeros PA6 GF30 e PAHT CF15, evidenciando a distribuição, o diâmetro das fibras e as características de interface matriz-fibra em cada material.

Figura 9 – Microscopia Eletrônica de Varredura (a) - PA6 GF30 e (b) - PAHT CF15



(a)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A imagem PA6 GF30 9(a) representa a morfologia de fratura do compósito PA6 GF30, que contém 30% em peso de fibra de vidro. Observa-se que as fibras de vidro estão bem distribuídas na matriz polimérica, com um diâmetro médio de aproximadamente 5,61 micrômetros. As fibras de vidro apresentam uma orientação preferencial e, em alguns casos, mostram uma fratura limpa, sugerindo que a interface entre a fibra de vidro e a matriz de PA6 é relativamente forte. No entanto, também há evidências de fibras parcialmente destacadas da matriz, indicando que, em

algumas regiões, a adesão fibra-matriz pode não ser ideal.

Além disso, as fibras de vidro aparentam ser longas e finas, o que pode contribuir para o aumento da rigidez do compósito³⁹. A presença de fibras finas e bem distribuídas sugere que o material PA6 GF30 pode oferecer uma boa combinação de resistência mecânica e rigidez, beneficiando-se da alta razão de aspecto das fibras de vidro. No entanto, a observação de algumas fibras destacadas sugere que o potencial de otimização da adesão fibra-matriz ainda existe, o que poderia melhorar ainda mais as propriedades mecânicas, como a resistência ao impacto e à tração⁴⁰.

A imagem PAHT CF15 9(b) mostra a morfologia de fratura do compósito PAHT CF15, que contém 15% em peso de fibra de carbono. As fibras de carbono são visivelmente mais grossas que as fibras de vidro do PA6 GF30, com um diâmetro médio de aproximadamente 10,44 micrômetros. Essa diferença no diâmetro das fibras indica que as fibras de carbono utilizadas são menos numerosas em número absoluto comparado ao PA6 GF30, devido à sua menor proporção em peso e maior diâmetro⁴⁰.

As fibras de carbono observadas na imagem exibem uma fratura quebradiça e menos adesão aparente à matriz polimérica, como indicado pelas superfícies relativamente limpas das fibras expostas. A interface fibra-matriz parece apresentar falhas em alguns pontos, sugerindo que o acoplamento entre a fibra de carbono e a matriz de PAHT (poliamida de alta temperatura) pode ser menos eficaz em comparação com as fibras de vidro no PA6 GF30. Isso pode ser devido à maior rigidez das fibras de carbono, que reduz sua capacidade de deformação e pode resultar em menor aderência com a matriz durante a fratura⁴¹.

A maior rigidez e o maior diâmetro das fibras de carbono no compósito PAHT CF15, combinados com uma possível menor adesão à matriz, indicam que este material é mais adequado para aplicações

que requerem alta resistência mecânica e estabilidade térmica. No entanto, o desempenho do compósito pode ser limitado em termos de resistência ao impacto e fadiga devido à fratura mais frágil observada⁴¹.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

As análises por DSC confirmam que o PAHT CF15 é o material mais indicado para aplicações que exigem resistência térmica elevada, seguido pelo PA NATURAL, devido aos seus altos pontos de fusão e estabilidade térmica comprovada em faixas de temperatura superiores a 190°C. O PA6 GF30 oferece uma resistência moderada, com picos de fusão em temperaturas intermediárias, sendo adequado para aplicações de menor exigência térmica em comparação com o PAHT CF15. Em contrapartida, os materiais PLA WHITE e PLA PRO apresentam estabilidade térmica limitada, com temperaturas de fusão relativamente baixas, tornando-os mais apropriados para condições de temperatura moderada ou aplicações que não envolvem exposição prolongada ao calor. Assim, para aplicações de alta temperatura, os polímeros à base de poliamida, especialmente aqueles reforçados com fibras de carbono como o PAHT CF15, demonstram a melhor performance, enquanto os materiais à base de PLA são mais indicados para usos em ambientes de temperaturas mais baixas ou moderadas.

Os resultados da análise de tração indicam que o PAHT CF15 é o material mais adequado para aplicações que exigem alta resistência à tração, devido à sua tensão máxima elevada e menor deformação. O PA6 GF30 e o PA NATURAL oferecem alternativas intermediárias, com o PA6 GF30 sendo mais rígido e o PA Natural apresentando maior ductilidade. Os materiais PLA WHITE e PLA PRO são adequados para aplicações onde é necessária uma resistência moderada combinada com alguma flexibilidade.

Ao comparar diretamente as configurações FULL e Padrão para cada material, é essencial considerar tanto o desempenho mecânico quanto os custos de produção associados a cada configuração. Para o PA Natural, a configuração FULL apresenta uma tensão máxima de 28,54 MPa e deformação na tensão máxima de 3,689 mm, demonstrando maior ductilidade e uma leve vantagem em resistência mecânica em relação à configuração padrão. No entanto, o aumento na ductilidade pode não ser significativo o suficiente para justificar um custo de produção mais elevado, especialmente se a aplicação não exigir essa flexibilidade extra. A configuração padrão apresenta uma tensão máxima ligeiramente inferior, de 26,89 MPa, e uma deformação de 2,904 mm. Embora essa configuração tenha uma menor capacidade de deformação, ela ainda oferece propriedades mecânicas aceitáveis para muitas aplicações. Considerando que o custo de produção na configuração padrão é tipicamente mais baixo devido ao menor uso de aditivos ou processamento, esta configuração pode ser a mais vantajosa em termos de custo-benefício, especialmente para aplicações que não exigem alta ductilidade.

Para o PAHT CF15, a configuração FULL apresenta uma tensão máxima de 96,10 MPa e uma deformação de 3,5 mm, oferecendo excelente resistência à tração, sendo a mais alta entre todos os materiais testados. No entanto, o processamento para atingir o estado FULL pode ser mais caro devido ao uso intensivo de fibras de carbono e técnicas de fabricação específicas. A configuração padrão apresenta uma tensão máxima ainda maior, de 102,26 MPa, e uma deformação ligeiramente superior de 3,70 mm, mantendo e melhorando a resistência à tração de maneira mais econômica e eficiente, reduzindo o custo associado ao processamento adicional da configuração FULL.

Para o PA6 GF30, a configuração FULL apresenta uma tensão máxima de 52,69 MPa e uma deformação de 2,50 mm,

proporcionando uma boa resistência à tração e rigidez moderada, adequada para aplicações que requerem equilíbrio entre resistência e flexibilidade. A configuração padrão, por sua vez, mostra uma redução na tensão máxima para 39,61 MPa e uma deformação de 2,35 mm, indicando que o material é menos eficiente sob condições padrão. No entanto, o custo de produção nesta configuração é geralmente menor devido ao uso reduzido de fibras de vidro e menor exigência de processamento.

Para os materiais PLA WHITE e PLA PRO, a configuração FULL apresenta boas propriedades mecânicas, com moderada resistência à tração e alguma flexibilidade. As configurações padrão mantêm propriedades mecânicas muito semelhantes, com tensões máximas ligeiramente inferiores e deformações quase idênticas, mas são menos caras em termos de produção devido a um processamento menos complexo. Dessa forma, a configuração padrão é mais vantajosa para ambos os materiais, pois a pequena diferença nas propriedades mecânicas não justifica o custo adicional de produção da configuração FULL.

Em geral, a configuração padrão é mais vantajosa para a maioria dos materiais (PA Natural, PAHT CF15, PLA WHITE e PLA PRO) quando se considera o custo de produção em relação às propriedades mecânicas. Apenas no caso do PA6 GF30, a configuração FULL pode ser preferível se a aplicação requerer maior resistência e rigidez, justificando o custo de produção adicional.

As imagens de MEV indicam que o compósito PA6 GF30 apresenta uma distribuição uniforme e boa adesão matriz-fibra em muitas regiões, favorecendo a rigidez e resistência mecânica do material, embora existam áreas que possam ser otimizadas para melhorar a aderência fibra-matriz. Em contraste, o compósito PAHT CF15, com fibras de carbono mais grossas e menor densidade, apresenta uma fratura mais quebradiça e uma interface potencialmente menos aderente entre a fibra

e a matriz, o que pode limitar seu uso em aplicações onde a resistência ao impacto é crítica. No entanto, o PAHT CF15 ainda é preferível em aplicações de alta temperatura e alta resistência, onde a rigidez e a estabilidade térmica são essenciais.

Essa análise sugere que o aprimoramento da adesão fibra-matriz, especialmente para o PAHT CF15, poderia melhorar significativamente as propriedades mecânicas do compósito, enquanto o PA6 GF30 já oferece um bom equilíbrio entre rigidez e resistência com sua atual distribuição de fibras de vidro.

REFERÊNCIAS

- 1 AMBROSI, A.; PUMERA, M. 3D-printing technologies for electrochemical applications. **Chemical Society Reviews**, [s. l.], v. 45, n. 10, p. 2740–2755, abr. 2016. Disponível em: <https://yonsei.elsevierpure.com/en/publications/3d-printing-technologies-for-electrochemical-applications>. Acesso em: 22 fev. 2024.
- 2 MONTERO, J. M. L. **Pioneering additive manufacturing and prototyping solutions**. [S. l.]: J.A.M.E.S GmbH, 15 fev. 2024. Disponível em: <https://james.com/global-ame-news/pioneering-additive-manufacturing-and-prototyping-solutions>. Acesso em: 19 jan. 2024.
- 3 DAVIM, J. P. **Machining: fundamentals and recent advances**. London: Springer-Verlag, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84800-213-5>. Acesso em: 27 jul. 2024.
- 4 SONG, C.; LIN, F.; BA, Z.; *et al.* My smartphone knows what you print: exploring smartphone-based side-channel attacks against 3D printers. *In: PROCEEDINGS OF THE 2016 ACM*

SIGSAC CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATIONS SECURITY, 16., Viena. **Anais [...]**. New York: Association for Computing Machinery, 2016. p. 895–907. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2976749.2978300>. Acesso em: 16 jun. 2024.

5 WOJTYLA, S.; KLAMA, P.; BARAN, T. Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 80–85, jun. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28165927/>. Acesso em: 12 mai. 2024.

6 GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-2113-3>. Acesso em: 25 abr. 2024.

7 KOUSIATZA, C.; KARALEKAS, D. In-situ monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process. **Materials and Design**, [s. l.], v. 97, p. 400–406, maio 2016. Disponível em: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=el&user=NeW7kPwAAAAJ&citation_for_view=NeW7kPwAAAAJ:u5HHmVD_uO8C. Acesso em: 8 ago. 2024.

8 DIZON, John Ryan C. *et al.* Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, [s. l.], v. 20, p. 44–67, mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860417302749?via%3Diuhub>. Acesso em: 24 fev. 2024.

9 LINS, Douglas da Silva. **Desenvolvimento do processo de**

manufatura aditiva em uma indústria de alimentos. 2023. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2023. Disponível em: <https://repository.ufrpe.br/handle/123456789/5222>. Acesso em: 24 fev. 2024.

10 CICALA, G.; LATTERI, A.; DEL CURTO, B. *et al.* Engineering thermoplastic for additive manufacturing: a critical perspective with experimental evidence to support functional applications. **Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 10–18, jan. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313115472_Engineering_Thermoplastics_for_Additive_Manufacturing_A_Critical_Perspective_with_Experimental_Evidence_to_Support_Functional_Applications. Acesso em: 3 set. 2024.

11 ARAÚJO, J. P.; AGRAWAL, P.; MÉLO, T. J. A. Blendas PLA/PEgAA: avaliação da reatividade entre os polímeros e da concentração de PEgAA nas propriedades e na morfologia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 118–127, ago. 2015. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/REMAP/article/view/475>. Acesso em: 15 jul. 2024.

12 CARRASCO, F.; PAGÈS, P.; GÁMEZ-PÉREZ, J. *et al.* Processing of poly(lactic acid): characterization of chemical structure, thermal and mechanical properties. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 95, n. 2, p. 116–125, fev. 2010. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/223501621_Processing_of_poly\(lactic_acid\)_Characterization_of_chemical_structure_thermal_stability_and_mechanical_properties](https://www.researchgate.net/publication/223501621_Processing_of_poly(lactic_acid)_Characterization_of_chemical_structure_thermal_stability_and_mechanical_properties). Acesso em: 8 set. 2024.

- 13 CEREGATTI, T.; PECHARKI, P.; PACHEKOSKI, W. M. *et al.* Electrical and thermal properties of PLA/CNT composite films. **Revista Matéria**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 11863, mar. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Q5gM6KKdFyd8KJ5rWqQhQML/>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- 14 CASTRO-AGUIRRE, E.; IÑIGUEZ-FRANCO, F.; SAMSUDI, H. *et al.* Poly(lactic acid) – mass production, processing, industrial application, and end of life. **Advances in Drug Delivery Reviews**, [s. l.], v. 107, p. 333–366, dez. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169409X16300965>. Acesso em: 3 ago. 2024.
- 15 GAIHONG, W.; SHUQIANG, L.; HUSHENG, J. *et al.* Preparation and properties of heat resistant Poly(lactic acid) (PLA)/Nano-SiO₂ composite filament. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 164–171, fev. 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/292948231_Preparation_and_properties_of_heat_resistant_poly\(lactic_acid\)_PLA/Nano-SiO₂_composite_filament](https://www.researchgate.net/publication/292948231_Preparation_and_properties_of_heat_resistant_poly(lactic_acid)_PLA/Nano-SiO2_composite_filament). Acesso em: 14 set. 2024.
- 16 WANG, M.; WU, Y.; LI, Y. D. *et al.* Progress in toughening Poly(Lactic Acid) with renewable polymers. **Polymer Review**, [s. l.], v. 57, n. 4, p. 557–593, fev. 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15583724.2017.1287726?scroll=top&needAccess=true#>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- 17 GARLOTTA, D. A literature review of Poly(Lactic Acid). **Journal of Polymers and the Environment**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 63–84, abr. 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/27206624_A_Literature_Review_of_Poly_Lactic_Acid. Acesso em: 18 ago. 2024.
- 18 MENG, B.; DENG, J.; QING, L. *et al.* Transparent and ductile poly(lactic acid)/poly(butyl acrylate) (PBA) blends: structure and properties. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 48, n. 1, p. 127–135, jan. 2012. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-5d8b0816-8df4-3006-b5c1-f3c29e30a0ee>. Acesso em: 25 set. 2024.
- 19 AHMED, J. Thermal properties of polylactides and stereocomplex. *In*: AHMED, J.; RAHMAN, M. S.; ROOS, Y. H. **Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials**. 1. ed. Chichester, UK; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. cap. 12. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/302923697_Thermal_Properties_of_Polylactides_and_Stereocomplex. Acesso em: 12 ago. 2024.
- 20 MATHEW, A. P.; OKSMAN, K.; SAIN, M. Mechanical properties of biodegradable composites from poly(lactic acid) (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 97, n. 5, p. 2014–2025, 23 jun. 2005. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.21779>. Acesso em: 24 fev. 2024.
- 21 ALSSABBAGH, M.; TAJUDDIN, A. A.; ABDULMANAP, M. *et al.* Evaluation of 3D printing materials for fabrication of a novel multi-functional 3D thyroid phantom for medical dosimetry and image quality. **Radiation Physics and Chemistry**, [s. l.], v. 135, p. 106–112, jun. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.02.009>. Acesso em: 15 set. 2024.
- 22 VALERA, T. S. *et al.* Propriedades do composto Poliamida-6/ Vidro em pó. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE

ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS

MATERIAIS, 14., 2000, São Pedro-SP.

Anais [...]. São Paulo: IPEN, 2000. p.

49401–49411. Disponível em:

<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2000/Docs/TC403-010.pdf>. Acesso em:

24 fev. 2024.

23 HAMID, F.; AKHBAR, S.; HALIM, K.

H. KU. Mechanical and thermal properties

of Polyamide 6/HDPE-g-MAH/High

Density Polyethylene. **Procedia**

Engineering, [s. l.], v. 68, p. 418–424,

2013. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.201>. Acesso em:

20 fev. 2024.

24 LEITE, A. M. D.; ARAÚJO, E. M.;

PAZ, R. A.; PEREIRA, O. D.; LIRA, H.

L.; ITO, E. N. Structure and mechanical

properties of polyamide 6 Brazilian clay

nanocomposites. **Materials Research**, [s.

l.], v. 12, n. 2, p. 165–168, 2009.

Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392009000200009>. Acesso em:

24 fev. 2024.

2024.

25 CHOW, W. S.; ISHAK, Z. A. M.

Mechanical, morphological and

rheological properties of polyamide

6/organo-montmorillonite nanocomposites.

Express Polymer Letters, [s. l.], v. 1, n. 2,

p. 77–83, 2007. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/244756159_Mechanical_morphological_and_rheological_properties_of_polyamide_6_organo-montmorillonite_nanocomposites.

Acesso em:

15 set. 2024.

2024.

26 SANTANA, L.; ALVES, J. L.;

SABINO NETTO, A. C.; MERLINI, C.

Estudo comparativo entre PETG e PLA

para impressão 3D através de

caracterização térmica, química e

mecânica. **Revista Matéria**, [s. l.], v. 23,

n. 4, p. 12267, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0601>. Acesso em:

20 jul. 2024.

2024.

27 ISO 527-1, ISO 527-2 Ensaio de tração

em plásticos. Campinas, SP: Zwick Roell,

[202-]. *Site*. Disponível em:

<https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/plasticos/compostos-para-moldagem-termoplasticos-e-termoendurecidos/ensaio-de-tracao-iso-527-1-2/>. Acesso em:

20 jul. 2024.

28 AMBROSI, A.; PUMERA, M. 3D-

printing technologies for electrochemical

applications. **Chemical Society Reviews**,

[s. l.], v. 45, n. 10, p. 2740–2755, abr.

2016. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/299943069_3D-printing_technologies_for_electrochemical_applications. Acesso em:

15 ago. 2024.

2024.

29 GEBHARDT, A. **Understanding**

additive manufacturing. Munich: Hanser

Publishers, 2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978344642552150001X>. Acesso em:

3 ago. 2024.

2024.

30 KOUSIATZA, C.; KARALEKAS, D.

In-situ monitoring of strain and

temperature distributions during fused

deposition modeling process. **Materials**

and Design, [s. l.], v. 97, p. 400–406, maio

2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127516302441>. Acesso em:

12 set. 2024.

2024.

31 WOJTYLA, S.; KLAMA, P.; BARAN,

T. Is 3D printing safe? Analysis of the

thermal treatment of thermoplastics: ABS,

PLA, PET, and nylon. **Journal of**

Occupational and Environmental

Hygiene, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 80–85, jun.

2017. Disponível em:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28165927/>.

Acesso em:

15 jul. 2024.

2024.

32 CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos**

polímeros: um texto básico para

tecnólogos e engenheiros. 2. ed. rev. São

Paulo: Artliber Editora, 2006. Disponível em:

https://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/QUI%20541_Qu%C3%ADmica%20de%20pol%C3%ADmeros/Livros/Cie%CC%82ncia%20dos%20polimeros%20-%20Canevarolo%20Jr.,%20Sebastia%CC%83o%20V..pdf. Acesso em: 21 jul. 2024.

33 SHIH, Y. F.; HUNAG, C. C. Polylactic acid (PLA)/banana fiber (BF)

biodegradable green composites. **Journal of Polymer Research**, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 2335–2340, nov. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/251197746_Polylactic_acid_PLA_banana_fiber_BF_biodegradable_green_composites. Acesso em: 7 ago. 2024.

34 FISHER, E. W.; STERZEL, H. J.; WEGNER, G. Investigation of the structure of solution grown crystals of lactide copolymers by means of chemical reactions. **Kolloid-Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere**, [s. l.], v. 251, n. 11, p. 980–990, 1973. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01498927>. Acesso em: 2 set. 2024.

35 SONG, Y.; LI, Y.; SONG, W. *et al.* Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA. **Materials and Design**, [s. l.], v. 123, p. 154–164, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.051>. Acesso em: 25 ago. 2024.

36 REZENDE, Mirabel C.; BOTELHO, Edson C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 4-10, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/Sp5xW8K4WctGhyppz5Fhbmb/>. Acesso em: 18 jul. 2024.

37 DENCHEVA, Nadia V.; POUZADA, Antonio Sergio; OLIVEIRA, Maria José Alves de; KEARNS, Mark P. Mechanical Properties of Polyamide 6 Reinforced Microfibrillar Composites. **Polymer Composites**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 407-417, 2017. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/227782794_Mechanical_Properties_of_Polyamide_6_Reinforced_Microfibrillar_Composites. Acesso em: 10 ago. 2024.

38 PINHEIRO JUNIOR, Victor Luiz. Comportamento mecânico da poliamida e da poliamida com fibra de carbono fabricadas por impressão 3D e suas aplicações na área industrial. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/253290>. Acesso em: 24 ago. 2024.

39 QUEIROZ, Lúcio Pedro Alcântara. **Obtenção e caracterização de filamentos compostos por fosfatos de cálcio e polímeros para impressão 3d de scaffolds**. 2020. Dissertação (Mestrado em engenharia de Biomateriais e Bioprocessos) — Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/3216d413-d546-4bc0-a376-8307fd1796b0>. Acesso em: 28 ago. 2024.

40 LOPES, Bruno Jordão. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Termoplásticos Reforçados por Fibras de Carbono**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/34967/34967.PDF>. Acesso em: 28 ago. 2024.

41 RIVERA, A. D. P. F. **Caracterização experimental de compósitos termoplásticos para uso em processos de manufatura aditiva**. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/73722>. Acesso em: 29 ago. 2024.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família e namorada, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio incondicional, amor e compreensão durante toda a minha jornada acadêmica. Vocês foram a base sólida que me permitiu enfrentar todos os desafios e superar cada obstáculo. Como Eren Yeager disse: “Eu não vou fugir, nunca mais.” Foi graças a vocês que aprendi a enfrentar meus medos com coragem.

Aos meus amigos de graduação, que compartilharam comigo momentos de aprendizado, risadas, estresse e superação, meu sincero agradecimento. Cada um de vocês contribuiu, de alguma forma, para a minha formação, não apenas acadêmica, mas também pessoal. Aprendi com Jiraiya que “A dor nos permite crescer, e como crescemos nos define.” Vocês me ajudaram a crescer, e as memórias que construímos juntos serão eternamente valorizadas.

Aos meus amigos de infância, que, mesmo fora do ambiente acadêmico, estiveram presentes em cada etapa, oferecendo palavras de incentivo, momentos de descontração e sendo o suporte emocional nos momentos mais desafiadores. Como Goku nos ensinou: “Mesmo que sejamos destruídos, nosso espírito jamais será quebrado.” Vocês enriqueceram minha vida e tornaram esta jornada ainda mais significativa.

Por fim, mas não menos importante, quero expressar minha gratidão ao GOP, setor onde trabalho. A oportunidade de

aprender e contribuir com uma equipe tão dedicada e competente foi uma honra. Como Koro-sensei sabiamente disse: “A diferença entre o mestre e o novato é que o mestre falhou mais vezes do que o novato tentou.” Cada feedback, conselho e momento compartilhado foram cruciais para o meu desenvolvimento, e me permitiram aprender com cada erro e evoluir.

A todos vocês, meu mais sincero obrigado. Este trabalho é também um reflexo do apoio, ensinamentos e amizade de cada um de vocês. E, como Naruto aprendeu, “A verdadeira força vem dos laços que construímos.” Este trabalho é prova dos laços que construí com todos vocês.