



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA
DE MATERIAIS

Mailyn de Almeida Prado Dias Gama

**Análise da degradação de peças de poli (tereftalato de etileno
glicol) (PETG) fabricadas por FFF: Efeito da radiação UV e
absorção de água**

FLORIANÓPOLIS

2026

Mailyn de Almeida Prado Dias Gama

Dissertação submetida ao Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Mariz de Oliveira Barra

Coorientador: Dr. Leonardo Santana

Coorientadora: Dra. Danay Manzo Jaime

FLORIANÓPOLIS

2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Gama, Mailyn de Almeida Prado Dias

Análise da degradação de peças de poli (tereftalato de etileno glicol) (PETG) fabricadas por FFF : Efeito da radiação UV e absorção de água / Mailyn de Almeida Prado Dias Gama ; orientador, Guilherme Mariz de Oliveira Barra, coorientador, Leonardo Santana, coorientador, Danay Manzo Jaime, 2026.

148 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Poli Tereftalato de Etileno Glicol (PETG). 3. Envelhecimento acelerado. 4. Manufatura Aditiva. 5. Esportes aquáticos. I. Barra, Guilherme Mariz de Oliveira . II. Santana, Leonardo . III. Jaime, Danay Manzo IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. V. Título.

Mailyn de Almeida Prado Dias Gama

**Análise da degradação de peças de poli (tereftalato de etileno glicol) (PETG)
fabricadas por FFF: Efeito da radiação UV e absorção de água**

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

Prof.(a) Claudia Merlini, Dr(a).Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Aurélio da Costa Sabino Neto, Dr.Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

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



Documento assinado digitalmente
GEAN VITOR SALMORIA
Data: 19/02/2026 10:46:09-0300
CPF: ***.305.709-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr.Eng. Prof. Gean Vitor Salmoria
Coordenador do Curso



Documento assinado digitalmente
Guilherme Mariz de Oliveira Barra
Data: 19/02/2026 11:40:40-0300
CPF: ***.718.428-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr.Eng. Prof. Guilherme Barra
Orientador

Florianópolis, 2026.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e à colaboração de muitas pessoas e instituições que, de diferentes formas, contribuíram para essa trajetória.

Em primeiro lugar, expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Barra, por ter me acolhido no grupo de pesquisa e por todo o aprendizado ao longo dessa caminhada. Tive a oportunidade de conhecê-lo ainda na graduação, como professor, e foi uma honra poder aprofundar essa convivência no mestrado, sempre com seu apoio, orientação e confiança.

Ao meu coorientador, Dr. Leonardo Santana, agradeço pela inteligência e dedicação com que conduziu sua orientação. Sua paciência, disponibilidade e atenção aos detalhes foram fundamentais em todas as etapas deste trabalho. Além de contribuir diretamente para a elaboração da dissertação e correções de textos, foi essencial nas análises de FTIR, DMA e TGA, realizadas em parceria com a coorientadora Dr^a. Danay Manzo, a quem também deixo meu sincero agradecimento pela contribuição nas análises, correções e constante disposição em ajudar. Além disso, agradeço pelos dias compartilhados no laboratório.

Agradeço também ao meu colega de laboratório Arthur Cruzeiro, com quem compartilhei momentos importantes desde a graduação. Suas dicas e apoio em várias etapas foram extremamente valiosos. Sua postura sempre tranquila e colaborativa tornou essa jornada mais leve.

Aos demais colegas do GPMA, meu muito obrigada pela convivência e pelas contribuições ao longo do processo: Dr^a Silvia Ramôa, que realizou os ensaios de tração; Dr^a Mayara Bertolini ajudou nos ensaios práticos na etapa de degradação; Lucas Binder, pelo auxílio nas análises de FTIR e correções; e aos colegas Enzo, Dr Roberto e Angie, cuja presença e colaboração foram importantes nessa trajetória. Trabalhar e aprender com todos vocês foi uma honra.

Estendo meus agradecimentos aos demais colaboradores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) que contribuíram com partes essenciais deste trabalho: à Dr^a. Luciana, pelas análises de colorimetria no CERMAT; à Dr^a. Karina, por disponibilizar a câmara do LCP para os testes de degradação; à Dr^a. Débora, pelas análises reológicas; à Patrícia, pelas análises de MEV; à Loise, do Laboratório de Biomecânica, pela realização das análises de DSC; ao Dr. Carlos, do LDRX, pelas

análises de DRX; e a todos os profissionais e pesquisadores que, direta ou indiretamente, colaboraram e se mostraram sempre dispostos a compartilhar conhecimento. Gostaria de agradecer também a CAPES por ter concedido a bolsa de pesquisa e possibilitado o meu estudo de mestrado.

Minha gratidão se estende às pessoas mais importantes da minha vida. Aos meus pais, Paulo Gama e Osiris Prado, meu exemplo de força, apoio e inspiração em todas as minhas escolhas. À minha irmã gêmea, Paola Gama, presença constante em cada passo, minha maior apoiadora e confidente. Aos meus irmãos Iuri Gama e Nicolle Gama, por me mostrarem o valor ir atrás dos seus objetivos com dedicação e sempre fazer tudo do melhor jeito que podem.

À minha companheira, Amanda Boabaid, agradeço com todo meu coração por ter sido meu porto seguro ao longo desta jornada. Sua presença constante, seus conselhos sábios e seu apoio incondicional foram fundamentais nos momentos de incerteza e superação. Obrigada por estar ao meu lado com tanto amor, paciência e compreensão, e por celebrar comigo cada conquista.

À Giulia Brocardo, minha cunhada e amiga, que viveu comigo uma parte dessa fase acadêmica e esteve presente em diversas trocas de aprendizado, ideias e incentivos. À Elfie Charles e ao Ítalo Gama, que me trouxeram muita alegria e leveza, tornando essa caminhada mais leve e especial.

Por fim, aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado com apoio, incentivo e presença nos momentos mais desafiadores e nos mais felizes: meu sincero agradecimento. A todos vocês, deixo registrada minha profunda gratidão por terem feito parte desta caminhada e contribuído para a realização deste sonho.

“The ocean is my sanctuary, my happy place. It teaches me to be patient, to trust myself, and to embrace the unknow.”

“O oceano é meu santuário, meu lugar feliz. Ele me ensina a ser paciente, a confiar em mim mesmo e abraçar o desconhecido”

John John Florence

RESUMO

O poli (tereftalato de etileno glicol) (PETG) vem ganhando destaque na manufatura aditiva por extrusão de filamento fundido (FFF) devido à sua printabilidade, estabilidade dimensional e resistência relativa à degradação ambiental, tornando-se uma alternativa promissora para a produção de peças funcionais. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de filamentos comerciais de PETG disponíveis no mercado brasileiro, bem como investigar os efeitos de degradação em meio aquoso e sob radiação ultravioleta (UV) nas propriedades e na estrutura do material impresso. Inicialmente, três marcas de filamento foram caracterizadas quanto às propriedades térmicas (TGA, DSC), químicas (FTIR), mecânicas (tração, DMA) e reológicas, além de ensaios de printabilidade qualitativa. Todos os materiais apresentaram comportamento compatível com o esperado para o PETG, mas diferenças de viscosidade e dispersão de resultados indicaram desempenho variável entre fornecedores. O filamento da marca B foi selecionado para os estudos de degradação por apresentar melhor relação custo-benefício, avançando para os estudos de degradação, onde foi realizado a impressão de corpos de prova por FFF. No estudo de imersão a 70 °C por dez semanas, em água destilada e salina, observou-se baixa absorção de água (< 1 %) e aumento na resistência à tração de aproximadamente 4 %, associado à relaxação de tensões e maior coesão interlaminar, sem indícios de degradação. Na exposição à radiação UV por até 1000 h, o PETG manteve sua estrutura amorfa e estabilidade térmica, apresentando variações discretas na Tg (85–88 °C) e aumento da resistência mecânica (~ 18 %), atribuídos a rearranjos físicos interlaminares induzidos pela temperatura da câmara (~ 50 °C). As análises de FTIR, DRX e DSC confirmaram ausência de reticulação ou degradação significativa, enquanto a colorimetria indicou amarelamento perceptível apenas após 800–1000 h de exposição. De forma geral, os resultados confirmam que o PETG apresenta elevada resistência à radiação UV e à umidade, mantendo suas propriedades estruturais e mecânicas sob condições aceleradas de envelhecimento, reforçando seu potencial para aplicações externas e em ambientes marinhos, desde que o processo de impressão seja conduzido com controle rigoroso dos parâmetros de extrusão e fluxo.

Palavras-chave: Poli Tereftalato de Etileno Glicol (PETG), Degradação, Manufatura Aditiva, Equipamentos para água, Envelhecimento acelerado, Esportes aquáticos.

ABSTRACT

Poly (ethylene terephthalate glycol) (PETG) has been gaining prominence in Fused Filament Fabrication (FFF) due to its good printability, dimensional stability, and relative resistance to environmental degradation, making it a promising material for functional components. This work aimed to evaluate the performance of commercial PETG filaments available in the Brazilian market and to investigate the effects of degradation under aqueous and ultraviolet (UV) exposure on the structure and properties of printed specimens. Initially, three filament brands were characterized through thermal (TGA, DSC), chemical (FTIR), mechanical (tensile, DMA), and rheological analyses, along with qualitative printability tests. All materials exhibited behavior consistent with typical PETG; however, differences in viscosity and data dispersion indicated variable performance among suppliers. The filament from brand B was selected for the degradation studies due to its better cost-to-performance ratio. Proceeding to the degradation studies, in which test specimens were manufactured by FFF. In the water immersion test at 70 °C for ten weeks, both in distilled and saline media, samples showed low water uptake (< 1%) and a slight increase in tensile strength (~ 4%), attributed to stress relaxation and enhanced interlayer cohesion, with no evidence of chemical degradation. Under UV exposure for up to 1000 h, PETG maintained its amorphous structure and thermal stability, presenting only minor variations in glass transition temperature (85–88 °C) and a moderate increase in tensile strength (~ 18%), likely related to interfacial rearrangements induced by the chamber temperature (~ 50 °C). FTIR, XRD, and DSC analyses confirmed the absence of crosslinking or significant degradation, while colorimetry indicated perceptible yellowing only after 800–1000 h of exposure. Overall, the results demonstrate that PETG exhibits excellent resistance to UV radiation and moisture, preserving its structural and mechanical integrity under accelerated aging conditions. These findings reinforce PETG's potential for outdoor and marine applications, provided that the FFF process is conducted with careful control of extrusion and flow parameters to ensure consistency and reliability of the printed parts.

Keywords: Poly (Ethylene Glycol Terephthalate) (PETG), Degradation, Additive Manufacturing, Nautical Equipment, Accelerated Aging.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS	24
2.1	OBJETIVO GERAL	24
2.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	25
3.1	MANUFATURA ADITIVA.....	25
3.1.1	Fabricação por filamento fundido (FFF).....	26
3.1.2	Materiais utilizados na FFF.....	27
3.2	Poli (tereftalato de etileno glicol) (PETG).....	29
3.2.1	Parâmetros de impressão aplicados ao PETG	31
3.2.1.1	Teste de qualidade em função dos parâmetros de impressão	36
3.3	DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS	38
3.3.1	Processos de degradação	39
3.3.1.1	Degradação térmica, hidrolítica e química.....	39
3.3.1.2	Degradação fotoquímica e foto oxidativa.....	42
3.3.2	Degradação através da radiação UV e absorção de água em polímeros.....	43
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
4.1	FILAMENTOS DE PETG	46
4.2	IMPRESSORA 3D	46
4.3	CORPOS DE PROVA.....	49
4.4	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO UTILIZADAS	52
4.4.1	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	52
4.4.2	Análise Dinâmico Mecânica (DMA)	52
4.4.3	Análise Termogravimétrica (TGA).....	53
4.4.4	Propriedades Reológicas	53

4.4.5	Ensaio Mecânico sob tração	53
4.4.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	54
4.4.7	Microscopia ótica (MO)	54
4.4.8	Difração de raios X (DRX)	54
4.4.9	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	54
4.5	ESTUDO 1: AVALIAÇÃO DAS TRÊS MARCAS DE FILAMENTO DE PETG55	
4.5.1	Teste de printabilidade	57
4.5.2	Crerios de seleção do material e estrategias de caracterização.....	62
4.6	ESTUDO 2: ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA ACELERADO	67
4.6.1	Procedimentos para o ensaio de absorção de gua	67
4.7	ESTUDO 3: ENSAIO ACELERADO DE ENVELHECIMENTO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA	69
5	RESULTADOS	72
5.1	ESTUDO 1	72
5.1.1	Caracterização dos filamentos	72
5.1.1.1	Análise de FTIR	72
5.1.1.2	TGA	75
5.1.1.3	DMA	76
5.1.1.4	Reologia	79
5.1.1.5	Ensaio Mecânico de tração	83
5.1.2	Printabilidade	85
5.1.2.1	Avaliação do Benchy	85
5.1.2.2	Avaliação da torre de temperatura	87
5.1.2.3	Avaliação do Overhang	89
5.1.2.4	Avaliação do multiplicador de extrusão	91
5.1.2.5	Avaliação da torre de velocidade	93
5.1.3	Seleção da marca para o estudo de degradação	96

5.2 ESTUDO 2.....	100
5.2.1 Caracterização de material após a imersão	101
5.2.1.1 Análise de FTIR.....	101
5.2.1.2 Ensaio Mecânico de Tração	103
5.2.1.3 DMA.....	104
5.3 ESTUDO 3.....	112
5.3.1 Caracterização do material	112
5.3.1.1 FTIR: Degradação UV	113
5.3.1.2 Ensaio de tração.....	115
5.3.1.3 DMA: Degradação UV	125
5.3.1.4 Ensaio de Colorimetria: degradação UV.....	127
6 CONCLUSÕES	130
7 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.....	132
8 INFRAESTRUTURA.....	133
9 APÊNDICES	137
10 REFERÊNCIAS	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na impressão.....	49
Tabela 2 – Número de amostras.	51
Tabela 3 – Especificações para o critério de seleção do PETG.	62
Tabela 4 – Regra de Classificação.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 5 - Valores de pontuação para os modelos.	65
Tabela 6 - Principais bandas características dos filamentos de PETG e suas respectivas atribuições.	73
Tabela 7 - Valores do processo de degradação térmica, obtidos através das curvas TGA, para as três marcas de PETG.	76
Tabela 8 – Valores de Tg e E' máximo para as marcas A, B e C.....	78
Tabela 9 – Valores das marcas A, B e C obtidos no teste de tração.....	84
Tabela 10 - Valores da medição do Benchy.....	86
Tabela 11 - Valores das médias e desvio padrão das análises quantitativas.	96
Tabela 12 - Coeficiente de variação (CV %) dos valores.	96
Tabela 13 – Notas de reprodutibilidade.....	97
Tabela 14 - Notas qualitativas.	97
Tabela 15 – Resultado das notas do teste qualitativo.	98
Tabela 16 - Valores de todas as análises e relação custo-benefício.....	98
Tabela 17 – Valores de Tg e E' máximo para as marcas A, B e C.....	105
Tabela 18 - Bandas características dos filamentos de PETG e suas respectivas atribuições.	113
Tabela 19 – Valor da Tg para as amostras submetidas ao teste de degradação UV.	126
Tabela 20 – Diferenciação de cor de acordo com os valores de ΔE	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Número de artigos publicados de 2013 a 2024 da base Scopus ...	21
Figura 2 - Representação esquemática do processo FFF.....	27
Figura 3 - Estrutura química do PETG	30
Figura 4 – Ilustração de alguns parâmetros de impressão.....	31
Figura 5 - Desenho ilustrativo da deposição de camada de uma peça fabricada por FFF	35
Figura 6 - Processo de união entre dois filamentos. A) Contato superficial. B) Crescimento de pescoço. C) Difusão molecular e randomização.	35
Figura 7 – Ilustração de uma peça contendo efeito de overhang	37
Figura 8 – Ilustração do efeito de <i>stringings</i>	37
Figura 9 – Ilustração de um <i>Benchy</i> em oito vistas	38
Figura 10 – Esquema ilustrativo das etapas de desenvolvimento do trabalho.	47
Figura 11 – Impressora 3D Ender 3 da Creality	48
Figura 12 – Medidas do corpo de prova de tração ASTM D638 tipo V.....	50
Figura 13 – Corpos de provas impressos por FFF com dimensões padronizadas para os ensaios de (A) colorimetria, (B) tração e (C) DMA.....	50
Figura 14 - Esquema ilustrativo do estudo 1	56
Figura 15 – Ilustração de todos os modelos impressos das peças para avaliar a printabilidade do PETG.	57
Figura 16 – Ilustração do Benchy descrevendo suas partes.	58
Figura 17 – Esquema ilustrativo das medições no Benchy.	59
Figura 18 – Ilustração dos modelos utilizados no teste de printabilidade. A) Torre do multiplicador de extrusão. B) Torre de velocidade. C) Torre de temperatura.	60
Figura 19 – Ilustração do modelo 5 de overhang	62
Figura 20 – Figura ilustrativa da separação dos níveis de desempenho.....	65
Figura 21 – Esquema ilustrativo do Estudo 2.	67
Figura 22 - Esquema do teste de degradação em água.....	68
Figura 23 - Desenho ilustrativo da Câmara de envelhecimento.	69
Figura 24 - A) Imagem ilustrativa das amostras dentro da câmara. B) Esquema ilustrativo da posição das peças dentro da câmara.	70

Figura 25 - Esquema ilustrativo do estudo 3.	71
Figura 26 - FTIR dos filamentos dos três fornecedores.....	73
Figura 27 - Curvas de TGA e de DTG dos filamentos das marcas A, B e C. A) Variação de massa em função da temperatura. B) Derivada termogravimétrica (DTG).	75
Figura 28 – Resultado das análises de DMA dos filamentos e dos corpos de prova impressos. A) Tan δ do filamento. B) E' do filamento. C) Tan δ da peça impressa. D) E' da peça impressa.	77
Figura 29 - Viscosidade das marcas A, B e C.	79
Figura 30 - Módulo de armazenamento e perda por frequência. A) Marca A. B) Marca B. C) Marca C.....	81
Figura 31 – Valores da tensão máxima e módulo das três marcas de PETG.	84
Figura 32 - Benchy impresso em PETG com três fornecedores diferentes... 85	
Figura 33 – Ilustração da Torre de temperatura com seus respectivos valores.	87
Figura 34 - Torre de temperatura impresso em PETG com três fornecedores diferentes.	88
Figura 35 – Ilustração que mostra o defeito de overhang.	89
Figura 36 - Esquema ilustrativo do overhang com os ângulos.	90
Figura 37 – Overhang da marca A, B e C visto de cima.....	90
Figura 38 – Imagem ilustrativa da torre do multiplicador de extrusão.	91
Figura 39 – Torre de multiplicador de extrusão impresso em PETG com três fornecedores diferentes.....	92
Figura 40 – Imagem ilustrativa da torre de velocidade.	93
Figura 41 - Torre de velocidade impresso em PETG com três fornecedores diferentes.	94
Figura 42 - Imagem de MO da região de 90 mm/s da peça do fornecedor C.	95
Figura 43 – Gráfico de radar dos materiais A, B e C	99
Figura 44 – Gráfico das porcentagens médias de absorção de água das amostras ao longo das semanas de imersão.....	100
Figura 45 – FTIR das peças do ensaio em água.....	102

Figura 46 – A) Tensão máxima e B) módulo de elasticidade do grupo de controle e amostras imersas a 70 °C em água por 10 semanas.	103
Figura 47 - Variação do: A) Módulo de armazenamento e B) Tan δ em função da temperatura para o grupo de controle e amostras imersas em água destilada ou salgada a 70 °C por 10 semanas.	105
Figura 48 – Curvas de DSC das amostras do grupo controle e grupo de água salina do ensaio de absorção de água. A) Primeiro aquecimento. B) Resfriamento. C) Segundo aquecimento.	107
Figura 49 – Imagens do MEV da secção transversal com ampliação de 250X. A) Grupo controle. B) Grupo exposto na água destilada à 70°C.	110
Figura 50 – Imagens do MEV com ampliação de 100X. A) Grupo controle. B) Grupo exposto na água salina à 70°C.	112
Figura 51 - FTIR das amostras submetidas a radiação UV.	113
Figura 52 – Gráfico com os valores de tensão máxima das amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento por radiação UV.	115
Figura 53 - Gráfico com os valores de tensão máxima corrigidas com a depreciação da lâmpada.	Erro! Indicador não definido.
Figura 54 - Gráfico com os valores do módulo de elasticidade das amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento por radiação UV.	117
Figura 55 – Resultado da análise de DRX das amostras expostas à radiação ultravioleta.	118
Figura 56 – Curvas de DSC das amostras dos grupos 0h, 100h e 1000h do ensaio de envelhecimento UV. A) Primeiro aquecimento. B) Resfriamento. C) Segundo aquecimento.	120
Figura 57 – Imagens do MEV da secção transversal com ampliação de 100X. A) Grupo controle. B) Grupo exposto a radiação UV por 1000 horas.	121
Figura 58 - Imagens do MEV da vista superior com ampliação de 500X. A) Grupo controle. B) Grupo exposto a radiação UV por 800 horas. C) Grupo exposto a radiação UV por 1000 horas.	122
Figura 59 – Amostra submetida a radiação UV por 100 horas. A) Ampliação de 100 X. B) Ampliação de 500 X.	124
Figura 60 - Valores da Tg na análise de DMA.	125
Figura 61 - Valores do módulo de armazenamento (E') máximo.	126
Figura 62 - Valores do ΔE para as amostras de colorimetria.	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB - **Absorção** de água

ABS – Poli acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno

ASTM – American Society for Testing and Materials

CCL - Cia Catarinense de Laminação

DSC – Differential Scanning Calorimetry

EPS – Poliestireno expandido

FFF – Fused Filament Fabrication

FTIR – Espetroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

PET – Polietileno tereftalato

PETG – Poli Tereftalato de Etileno Glicol

PLA – Poli Ácido Lático

SUP – Stand Up Paddle

GC – Grupo controle

UV – Ultra violeta

1 INTRODUÇÃO

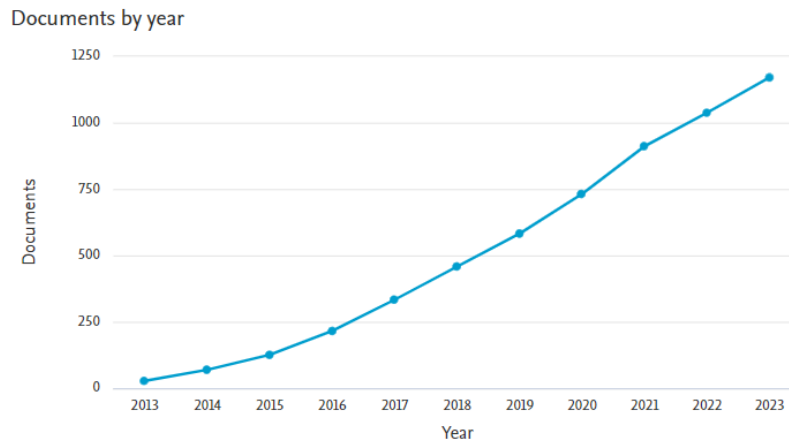
A Prototipagem Rápida surgiu no final da década de 1980 como uma nova tecnologia para obtenção de objetos 3D, cujo princípio de construção era baseado na adição de material em camadas planas. Inicialmente, o método tinha como aplicação a fabricação rápida de peças, com o intuito de permitir a visualização de ideias (protótipos) (CARVALHO *et al.*, 2020).

Com o avanço das tecnologias envolvidas, o termo Prototipagem Rápida passou a ser questionado por usuários e especialistas. Isso porque tais tecnologias demonstraram ser capazes de fabricar peças funcionais e destinadas ao uso final, e não apenas protótipos. Diante disso, com base nas diretrizes do comitê ASTM-F42 consolidou-se o uso do termo Manufatura Aditiva (MA), se tornando mais abrangente e condizente com essa nova realidade produtiva (SRIVASTAVA *et al.*, 2024). A MA oferece diversas vantagens em relação aos processos convencionais de fabricação (SANTANA *et al.*, 2018).

A popularização da MA ganhou força especialmente com o crescimento dos movimentos de código aberto, que contribuíram significativamente para o desenvolvimento da Manufatura Aditiva por Extrusão. A partir desse contexto, o termo "Impressão 3D" passou a ser amplamente utilizado, especialmente no meio popular, como sinônimo das tecnologias de manufatura aditiva (GIBSON *et al.*, 2015).

Com os avanços nas tecnologias e na diversidade de materiais disponíveis, a manufatura aditiva tem sido amplamente adotada em setores como engenharia, medicina e indústria automotiva, possibilitando a fabricação de componentes personalizados e otimizados para diferentes aplicações (CAVALCANTE *et al.*, 2022). O crescimento da utilização da Impressão 3D é evidenciado pelo aumento expressivo no número de publicações científicas na base Scopus nos últimos dez anos, como é ilustrado na Figura 1, demonstrando o crescente interesse tanto do meio acadêmico quanto da indústria nessa tecnologia inovadora.

Figura 1- Número de artigos publicados de 2013 a 2024 da base Scopus



Fonte: Scopus (2025).

Entre os diversos processos de Impressão 3D, a Fabricação por Filamento Fundido (FFF) se destaca devido à sua versatilidade e ampla disponibilidade de materiais poliméricos. Esse processo utiliza filamentos termoplásticos que são aquecidos até atingirem um estado semilíquido, ou pastoso, e, posteriormente, extrudados e solidificados para formar a peça final. A escolha do material é fundamental e depende das propriedades mecânicas, térmicas e ambientais exigidas pela aplicação (VOLTAPATO *et al.*, 2017; CAVALCANTE *et al.*, 2022).

Dentre esses materiais está por exemplo o poli (acrilonitrila-co-estireno-co-acrilato) (ASA), que apresenta alta resistência a intempéries e radiação UV (BESKO *et al.*, 2017) o poliuretano termoplástico (TPU), conhecido por sua flexibilidade e resistência ao desgaste, policarbonato (PC), que suporta altas temperaturas e solicitações mecânicas, e poliamida (PA), destacada por sua resistência mecânica, química e ao desgaste (GIBSON *et al.*, 2015)

Os filamentos mais utilizados no processo FFF são o poli (ácido láctico) (PLA), poli (acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno) (ABS) e, mais recentemente, o poli (tereftalato de etileno glicol) (PETG) (OLIVEIRA *et al.*, 2025). O PLA caracteriza-se por ser um polímero biodegradável com boa printabilidade, porém sua resistência térmica e mecânica limita seu uso em aplicações estruturais e ambientes úmidos. Já o ABS, apresenta melhor resistência mecânica ao impacto, sendo adequado para peças de engenharia e que requerem pós processamento. Contudo, esse material sofre com efeitos de contração durante a impressão, o que gera empenamento e delaminação

entre camadas, e pode ser suscetível à degradação em ambientes externos (BLOK *et al.*, 2018).

Diante dessas limitações, o PETG tem sido amplamente utilizado na Manufatura Aditiva devido às suas propriedades mecânicas, aliadas à sua printabilidade (GIBSON, *et al.*, 2015). Essa relação entre estrutura, propriedades e processamento o tornam uma escolha adequada para aplicações em engenharia. Por exemplo, foi demonstrada na literatura a viabilidade de utilização do PETG para a produção de pequenas embarcações por impressão 3D, com capacidade para até duas pessoas, chamados “*clear boats*”. Segundo Antolin *et al.*, (2023), o PETG é considerado um material promissor para a fabricação de protótipos de embarcações de pequeno porte, principalmente pelo seu desempenho mecânico e transparência. Além disso, o estudo conclui pela simulação por Método de Elementos Finitos (MEF) que os “*clear boats*” são capazes de apresentar resistência a carregamentos estáticos e dinâmicos aos quais estas embarcações estão normalmente sujeitas. No entanto, a exposição prolongada a fatores ambientais, como radiação ultravioleta (UV) e umidade, pode comprometer a sua estrutura e desempenho mecânico ao longo do tempo (COSTA *et al.*, 2015). Diante disso, torna-se essencial investigar os mecanismos de degradação do material para assegurar sua confiabilidade em ambientes adversos.

De acordo com a literatura, o PETG apresenta uma redução significativa na resistência à tração após exposição à radiação UV. No trabalho de Lee *et al.*, (2018) evidenciou-se que a exposição à intensidade UV resulta em uma diminuição da resistência mecânica e no aumento da fragilidade em polímeros como PLA e PETG. Essa queda de resistência ocorrer a partir da fotodegradação da cadeia polimérica, devido a cisão de cadeias e reações de oxidação fotoinduzida, resultando na diminuição do peso molecular e do grau de entrelaçamento entre as cadeias (CAVALCANTE *et al.*, 2022).

No estudo de Nicoara *et al.*, (2021) observou-se que apenas 24 horas de exposição à UV-B (lâmpadas de 313 nm) levaram a uma diminuição de aproximadamente 36% na resistência à tração do PETG. No experimento de exposição a UV-C por Amza *et al.*, (2021), a resistência à tração do PETG reduziu mais de 30% após 24h de UV-C.

A absorção de água é outro fenômeno que pode afetar o desempenho do material, induzindo alteração dimensional, rugosidade e redução da adesão entre as camadas do material impresso (BLOK *et al.*, 2018). Esses efeitos combinados podem

comprometer significativamente a durabilidade e o desempenho do PETG em aplicações expostas, por exemplo, ao ambiente marinho. Segundo a literatura, o PETG é um poliéster relativamente hidrofóbico, exibindo baixa absorção de água em condições de serviço. O PETG tem um índice de absorção de água de apenas cerca de 0,16% (em massa) (ANTOLIN *et al.*, 2023). O estudo de Nieto *et al.*, (2021) mostrou que amostras de PETG imersas em água, destilada e salgada, na temperatura ambiente, absorveram pouca água (~0,3%), estabilizando entre sete e nove semanas. Os autores afirmaram que o PETG não tem redução substancial na resistência a tração após a imersão em água por 9 semanas. O artigo de Revilla *et al.*, (2023) avaliou a degradação de PLA, PETG, PC e ASA em condições simuladas de absorção de água a 30°C por 21 dias. O PETG apresentou redução na resistência à tração de apenas 6,36%, um valor significativamente menor do que o observado no PLA que foi de 33,55%.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo avaliar a degradação de peças de PETG produzidas por manufatura aditiva, focando nos efeitos da radiação UV e da absorção de água. Para isso, foi feita a fabricação de peças por FFF que foram posteriormente submetidas a testes de absorção de água, incluindo experimentos com água em temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea do PETG, uma vez que a temperatura pode influenciar tanto a taxa quanto a quantidade de absorção em polímeros (FARIA *et al.*, 2017)). Como foram encontrados apenas artigos que avaliaram absorção de água do PETG em água de no máximo 30°C, foi avaliada, nesta dissertação, as mudanças de estrutura e propriedades de amostras de PETG imersas na água em temperaturas próximas à sua temperatura de transição vítrea (80°C) (SANTANA *et al.*, 2018). Embora a literatura indique que a radiação UV tem influência na resistência mecânica do PETG, poucos estudos abordam a relação entre o tempo de exposição e alteração das propriedades mecânicas a tração ao longo do tempo, um campo ainda pouco explorado. Assim, este estudo se propõe a investigar a alteração da estrutura do PETG com exposições simuladas de até cinco anos, contribuindo para um melhor entendimento dos impactos da radiação UV e da absorção de água na durabilidade e propriedades do material, como propriedades térmicas e termomecânicas, químicas, reológicas, mecânicas e físicas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo produzir peças impressas com filamentos de PETG pelo processo de Fabricação de Filamento Fundido, com o intuito de avaliar a capacidade de impressão e os efeitos da exposição à radiação ultravioleta e em meios aquosos na estrutura e propriedades do material.

2.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar a capacidade de impressão de três filamentos comerciais de PETG selecionados e caracterizar sua estrutura química e propriedades térmicas, reológicas, mecânicas e dinâmicas mecânicas;
- b) Escolher o filamento comercial de PETG com a melhor relação entre estrutura, propriedades, capacidade de processamento e custo para a confecção de peças para a avaliação de ensaios de degradação;
- c) Avaliar a influência das condições de ensaio de degradação UV e em meio aquoso na estrutura e propriedades das peças de PETG.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura Aditiva é um conjunto de tecnologias formado por sete famílias, entre elas: foto polimerização em cuba (VP), jato de material (MJ), jato de ligante (BJ), extrusão de material (ME), laminação de folha (SL), fusão em leito de pó (PBF) e deposição de energia direcionada (DED). Essas categorias estão alinhadas de acordo com seu consumo de energia (SRIVASTAVA *et al.*, 2024).

Para a produção de uma peça por impressão 3D é necessário primeiramente de um modelo 3D, que pode ser projetado utilizando softwares CAD, como SolidWorks®, Fusion 360® ou Blender® ou ser extraído diretamente de modelos disponíveis na internet (NOVAK *et al.*, 2021). Em seguida, escolhe-se o material, de acordo com os requisitos de projeto e da aplicação. O modelo 3D é então convertido para um formato compatível, tais como STL ou OBJ, e processado em um software de fatiamento, o qual converte o modelo virtual sólido em camadas, gerando um código de fabricação, muitas vezes em Gcode, para a impressora 3D. Durante essa etapa, ajustam-se parâmetros como espessura da camada, percentual e tipo de preenchimento, velocidade de impressão, temperatura de extrusão e da plataforma de construção, além da inserção de mecanismos de suportes, o que dependerá dos elementos geométricos e da orientação da peça (AMBROS *et al.*, 2019).

Antes da impressão, o equipamento deve ser calibrado para garantir o nivelamento da plataforma de construção, a correta alimentação do filamento e, se preciso, a aplicação de adesivos para melhor aderência entre a primeira camada do material a ser depositado (GIBSON *et al.*, 2015). Uma vez que a impressora 3D esteja calibrada, o usuário pode dar início ao processo de fabricação, cujo tempo impressão dependerá das dimensões e da complexidade peça, bem como do ajuste dos parâmetros de construção. Após a fabricação, a peça pode ser submetida a operações de pós-processamento, tais como remoção de suportes, lixamento, polimento, pintura ou tratamentos adicionais para melhorar a estética e resistência mecânica do objeto final (CARVALHO *et al.*, 2007)).

A Manufatura Aditiva, de modo geral, apresenta diversas vantagens em comparação aos processos de fabricação tradicionais em termos de eficiência, acessibilidade, capacidade de construção de geometrias complexas, custos e uso de

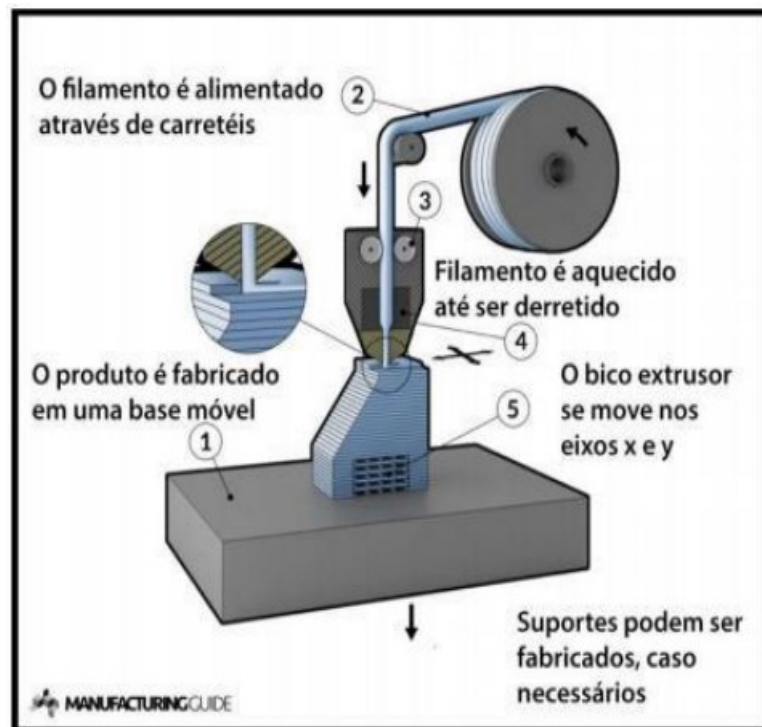
materiais mais ecológicos, tais como Politereftalato de Etileno Glicol (PETG) e o Polilático (PLA) (SANTANA *et al.*, 2018). Atualmente, a MA por extrusão se destaca como a família de tecnologias mais utilizadas no âmbito da Impressão 3D, com destaque para custo-benefício e facilidade de uso da Fabricação por Filamento Fundido (FFF) (KUNKEL *et al.*, 2020).

3.1.1 Fabricação por filamento fundido (FFF)

A tecnologia de Impressão 3D com filamentos começou a ser comercializada pela empresa americana *Stratasys* no início dos anos 90, com o nome de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) (KUNKEL *et al.*, 2020). O processo utilizava como matéria prima um filamento termoplástico, que era gradualmente aquecido e extrudado por um bico calibrado sobre uma plataforma de construção. O material depositado resfria, solidificando e se une às estruturas previamente depositadas. Ao final da construção de uma camada completa, a plataforma deslocava-se para baixo de modo a acomodar a próxima camada de material. Este processo era repetido até fabricação final da peça (GIBSON *et al.*, 2015).

Posteriormente, essa técnica foi aprimorada e chamada de FFF. Na Figura 2 é possível visualizar um esquema básico do processo de FFF, em que o filamento é aquecido e extrudado utilizando carretéis. Essa técnica se destaca devido a sua versatilidade e baixos custos de aquisição de máquina e materiais (SILVA *et al.*, 2020).

Figura 2 - Representação esquemática do processo FFF



Fonte: NIETO (2021).

3.1.2 Materiais utilizados na FFF

Os materiais usados na Impressão 3D variam de acordo com o perfil de cada aplicação, sendo a seleção influenciada tanto pelos objetivos funcionais que os projetos visam atingir, quanto pelas características geométricas do objeto a ser fabricado (SILVA *et al.*, 2020). Na impressão 3D é possível utilizar diferentes tipos de filamentos, cada um com uma composição própria, fabricados de forma distinta e com propriedades variadas, logo, a escolha do filamento depende do tipo de aplicação da peça final (VOLPATO *et al.*, 2017).

Diversos polímeros têm ganhado destaque na impressão 3D devido às suas propriedades específicas, fato que amplia o leque de aplicações da Manufatura Aditiva. Entre esses materiais, destacam-se o Poli(acrilonitrila-co-estireno-co-acrilato) (ASA), Termoplástico Poliuretano (TPU), Policarbonato (PC), e Poliamida (PA) (CALLISTER *et al.*, 2009). Os materiais comerciais mais utilizados são o Poli (ácido Lático) (PLA), Poli(acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno) (ABS) e o Poli (tereftalato de Etileno Glicol) (PETG) (BLOK *et al.*, 2018). Cada um desses materiais tem

características distintas que os tornam adequados para diferentes demandas (REVILLA *et al.*, 2023).

O ASA é um polímero semelhante ao ABS, porém com maior resistência à radiação UV e às intempéries, tornando-o uma escolha adequada para aplicações onde a exposição solar é direta, como por exemplo em peças automotivas e componentes de sinalização. Sua estabilidade térmica e mecânica o torna um material adequado para estruturas que precisam manter suas propriedades físicas mesmo após longos períodos de exposição ao ambiente (SEDLAK *et al.*, 2023).

O TPU, por sua vez, se destaca por sua flexibilidade e resistência ao desgaste, sendo amplamente utilizado na produção de peças que exigem elasticidade, tais como solados de calçados e amortecedores de impacto. A capacidade do TPU de resistir a deformações cíclicas, sem perda significativa de suas propriedades mecânicas (SRIVASTAVA *et al.*, 2024).

Já o PC é reconhecido por sua elevada resistência mecânica e térmica, suportando temperaturas superiores a 120°C, o que o torna uma opção viável para peças que precisam suportar altas cargas ou condições extremas, como carcaças de dispositivos eletrônicos e protetores balísticos. Entretanto, sua impressão requer altas temperaturas de extrusão e uma câmara fechada para evitar deformações e garantir a estabilidade dimensional da peça (JANUTENIENE *et al.*, 2024; GÓMEZ *et al.*, 2013).

A PA é amplamente utilizada na manufatura aditiva, sendo caracterizada por sua resistência mecânica, química e ao desgaste. No estudo de Goyanes *et al.* (2015), foi demonstrado que a PA possui elevada resistência à fadiga e à fluência (*creep*), sendo um dos materiais mais indicados para aplicações que envolvem cargas cíclicas ou movimento contínuo, como engrenagens, mancais e buchas industriais.

O ABS é um termoplástico amorfo que apresenta propriedades adequadas para diversas aplicações. Durante o processo de impressão, o ABS pode sofrer deformações devido à sua contração térmica, especialmente se não forem utilizadas mesas de aquecimento e impressoras de câmara fechada, condições recomendadas para garantir maior estabilidade dimensional e geométrica (BESKO *et al.*, 2017). Um dos principais benefícios do ABS é sua facilidade de acabamento, tornando-o uma escolha preferida para projetos que demandam pós-processamento, como lixamento ou pintura. Esse atributo, aliado às suas propriedades mecânicas e térmicas, faz do ABS uma opção versátil para diversas aplicações (ROSSATO *et al.*, 2019).

O PLA é biodegradável e bioabsorvível, e sua degradação se acentua em ambientes extremos, como temperaturas elevadas e locais úmidos ou com água (NIETO *et al.*, 2021). Considerando que a degradação é diretamente influenciada pelo ambiente de exposição é destacado a relevância da seleção adequada do material pensando no ambiente de aplicação (RODOLFO *et al.*, 2007).

O PETG é o material mais novo dentre os materiais mencionados para a impressão 3D por extrusão. Este termoplástico possui excelente resistência química, sendo pouco afetado por ácidos e bases moderados, o que o torna adequado para aplicações que exigem durabilidade e contato com substâncias químicas (SOLA *et al.*, 2022). É um polímero que possui transparência, apresentando baixa absorção de água, com um índice de apenas cerca de 0,16% (em massa) (ANTOLIN *et al.*, 2023).

A escolha do material na impressão 3D deve considerar não apenas a facilidade de impressão, mas também os requisitos mecânicos, térmicos e ambientais da aplicação final. Materiais como PLA e PETG são indicados para peças de uso geral, enquanto ABS e ASA se destacam pela resistência ao impacto e à exposição externa. Para aplicações que exigem flexibilidade ou alta resistência térmica, TPU, PC e PA são alternativas mais apropriadas. Dessa forma, a evolução dos materiais poliméricos na manufatura aditiva continua a expandir as possibilidades de produção, permitindo a personalização e otimização de peças para diversas indústrias (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

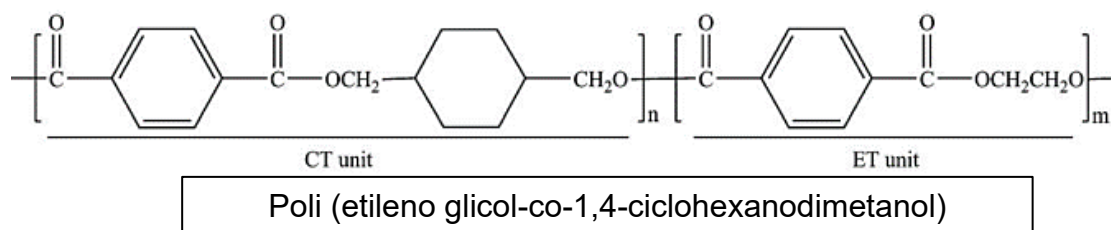
3.2 POLI (TEREFTALATO DE ETILENO GLICOL) (PETG)

O PETG é um polímero utilizado na manufatura aditiva devido às suas propriedades mecânicas favoráveis, resistência química e facilidade de processamento. Diferente do poli (tereftalato de etileno) (PET), o PETG possui glicol na sua estrutura molecular (Figura 3), o que reduz o grau de cristalinidade, tornando-o mais transparente, flexível e resistente ao impacto (SRI *et al.*, 2024; BESKO *et al.*, 2017).

O PETG é um copolímero derivado de ácido tereftálico, etilenoglicol e ciclohexanodimetanol (CHDM). A síntese envolve a esterificação de ácido tereftálico e etilenoglicol para formar bis(2-hidroxietil) tereftalato (BHET) e posteriormente a

policondensação de BHET com CHDM para formar o copolímero PETG (GARWACK *et al.*, 2022).

Figura 3 - Estrutura química do PETG



Fonte: CHEN (2016).

O processo de fabricação do PETG é dividido em três etapas. Primeiro o BHET e CHDM reagem pelo método de policondensação por fusão entre 200 a 270 °C sob vácuo para formar PETG. Depois é realizada a polimerização em estado sólido, em que o PETG de baixa massa molar é aquecido a 195-245 °C para aumentar a massa molar. A última etapa envolve a extrusão e peletização do material para posterior uso (LAKSHMAN *et al.*, 2024).

Por ter ótima relação entre estrutura, propriedades e processamento, o PETG é utilizado em vários setores da engenharia. Além disso pode ser reutilizado, sendo uma opção de material sustentável (SANTOS *et al.*, 2018). O PETG apresenta temperatura de transição vítrea próxima a 70°C, com propriedades mecânicas semelhantes às do PET, tendo como vantagens uma notável tenacidade, flexibilidade, e facilidade de processamento (SEDLAK *et al.*, 2023). Estudos como os de LAM *et al.*, (JOLANTA *et al.*, 2024) encontraram valores de resistências à tração, alongamento até a ruptura e módulo de elasticidade para o PETG próximos a 25 MPa, 93%, e 1,6 GPa, respectivamente. Já no trabalho de FOCKE *et al.* (2013), para as mesmas propriedades, os resultados foram seguindo a ordem, 50,4 MPa, 73%, e 2,02 GPa. No artigo de Baltic *et al.* (2024), foi investigado o potencial do PETG como material alternativo para a fabricação de peças de reposição em drones. Os autores analisaram propriedades como dureza, resistência ao desgaste abrasivo e impacto, além da resistência ao envelhecimento acelerado. Foi demonstrado que as peças impressas de PETG, quando tratadas termicamente, apresentam melhor desempenho mecânico e durabilidade, comparáveis ao ABS.

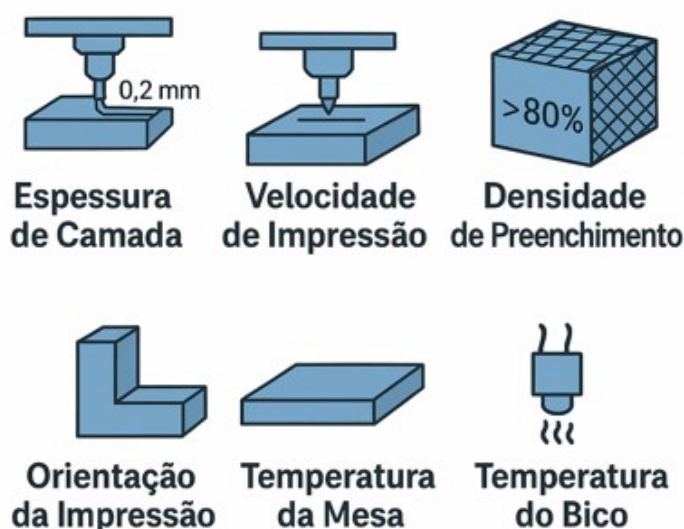
Segundo Hassan *et al.* (2022), a manufatura aditiva desempenha um papel fundamental na reciclagem e reutilização de plásticos, sendo uma ferramenta essencial para a economia circular. Os autores indicam que o PETG pode ser combinado com resíduos de biomassa para a produção de compósitos sustentáveis, aprimorando suas propriedades mecânicas e térmicas.

A obtenção de produtos impressos com qualidade e propriedades ajustadas para uma determinada aplicação exige ajustar os parâmetros de impressão (KAUTILYA *et al.*, 2024). Nesse contexto, é importante compreender a relação entre estrutura e propriedades do material e suas limitações do processo de impressão e aplicação.

3.2.1 Parâmetros de impressão aplicados ao PETG

O processo de FFF apresenta vários parâmetros de impressão que influenciam na qualidade de impressão, estrutura e propriedades das peças (SILVIA *et al.*, 2023). As dimensões e a resolução das peças produzidas por essa técnica dependem de fatores como parâmetros do processo, design do produto e propriedades do material de construção (GIBSON *et al.*, 2015). Na Figura 4 são ilustrados alguns parâmetros de impressão importantes, que serão discutidos ao longo do trabalho.

Figura 4 – Ilustração de alguns parâmetros de impressão



Fonte: Gerado por IA.

Conforme comentado anteriormente, cada parâmetro de processo influenciará na qualidade e propriedades da peça fabricada, conforme observado no Quadro 1.

Quadro 1 - Relação entre parâmetros de impressão e qualidade da peça.

Parâmetro	Efeito Positivo	Efeito Negativo	Referência
Espessura de Camada baixa (>0,2mm)	Maior resolução e melhor acabamento das superfícies	Aumento do tempo de impressão	(SANTANA <i>et al.</i> , 2018)
Velocidade de Impressão alta (>60mm/s)	Redução do tempo de impressão	Possível perda de qualidade superficial e problemas de adesão entre camadas	(KUMAR <i>et al.</i> , 2020)
Densidade de Preenchimento alta (>80%)	Maior resistência mecânica da peça	Aumento do tempo de impressão e consumo de material	(AMBRÓS <i>et al.</i> , 2019)
Orientação de Impressão	Otimização da resistência mecânica conforme a direção das camadas	Possível necessidade de suportes e aumento do tempo de impressão	(SAMPAIO <i>et al.</i> , 2022)
Temperatura do Bico	Boa fusão entre camadas e melhor aderência	Risco de excesso de extrusão e problemas de fluxo	(CAVALCANT E <i>et al.</i> , 2022)
Temperatura da Mesa	Melhor adesão da primeira camada, reduzindo warping	Se muito alta, pode causar aderência excessiva; se muito baixa, pode causar descolamento	(AMBRÓS <i>et al.</i> , 2019)

A configuração da espessura de camada corresponde a espessura de cada camada depositada, cujo valor depende do diâmetro do bico de extrusão. Geralmente é ajustada em um valor menor que 80% do diâmetro do bico. A espessura da camada determinará a resolução da impressão. Camadas mais finas produzem uma superfície menos rugosa e detalhada, mas aumentam o tempo de impressão (SANTANA *et al.*, 2018).

Por outro lado, a velocidade de impressão é outro parâmetro essencial. Quando ajustados velocidade de impressão mais alta, o tempo de impressão da peça tende a reduzir, mas também pode comprometer a qualidade do acabamento se estiver com velocidade acima do recomendado (KAUTILYA *et al.*, 2024). A densidade de preenchimento determina a proporção de material utilizado no interior do objeto impresso, influenciando diretamente na resistência da mecânica da peça fabricada. Uma densidade de preenchimento mais alta resulta em um objeto mais maciço, enquanto uma densidade mais baixa pode economizar material e reduzir o tempo de impressão, mas pode comprometer a resistência estrutural (KUMAR *et al.*, 2020).

A orientação de impressão é um fator essencial na manufatura aditiva, pois define como a peça será posicionada em relação ao eixo principal de construção durante o processo de fabricação. Essa escolha influencia diretamente a resistência mecânica do objeto, já que as propriedades do material variam entre as camadas e dentro delas. Além disso, a orientação impacta a qualidade superficial, o tempo total de impressão, o consumo de material e a necessidade de estruturas de suporte. Uma boa definição da orientação pode otimizar o desempenho funcional da peça, melhorar o acabamento em áreas críticas e reduzir custos, tornando-se uma etapa estratégica no planejamento da impressão 3D (AMBRÓS *et al.*, 2019).

Outro parâmetro de extrema importância está relacionado com as configurações de temperatura, na impressão pode ser ajustada a temperatura da mesa de impressão (base que o material é depositado) e a temperatura de impressão da peça. Cada material tem uma especificação de temperatura diferente.

Segundo Lakshman *et al.* (2024), a resistência mecânica do PETG é significativamente influenciada pelos parâmetros de impressão. O estudo demonstrou que a temperatura de extrusão exerce influência na integridade estrutural das peças, sendo que o desempenho mecânico do PETG aumenta à medida que a temperatura de impressão e da plataforma são ajustadas para 240°C e 80°C, respectivamente. Essa configuração favorece uma melhor adesão entre as camadas, reduzindo falhas estruturais e melhorando a durabilidade do material impresso. Além disso, os autores destacam que a densidade de preenchimento exerce influência na resistência mecânica do PETG. De acordo com os experimentos realizados, um preenchimento de 90% proporciona aumentos na resistência à tração e compressão. Por fim, o estudo indica que a velocidade de impressão também influencia a qualidade final das peças. Os resultados mostram que uma velocidade reduzida, em torno de 40 mm/s,

favorece a aderência entre camadas, resultando em peças com maior integridade estrutural e menor propensão a defeitos decorrentes de falhas de fusão entre os filamentos depositados.

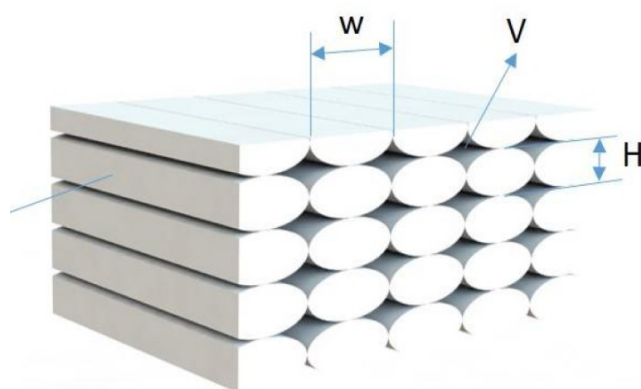
Patel *et al.*, (2024) mostram em seu trabalho que com configurações ajustadas é possível aumentar a resistência à tração e à flexão de peças impressas. Os autores mostraram que para uma impressora com bico de 0.4 mm, à configuração mais adequada para a fabricação de componentes em PETG é ajustando o ângulo de varredura para 0°, espessura de camada de 0,2 mm e velocidade de impressão de 40 mm/s.

A análise da qualidade da peça fabricada permite ajustar parâmetros de impressão e explorar os limites do equipamento, contribuindo para a melhoria contínua dos processos (SILVA *et al.*, 2023). Além disso, é essencial para garantir que as configurações de impressão atendam às especificações do projeto (KAUTILYA *et al.*, 2024).

Além da influência direta nas propriedades mecânicas e no desempenho global das peças, os parâmetros de impressão também determinam características importantes em nível microestrutural. A forma como o filamento fundido é depositado, espalhado e unido aos filamentos adjacentes está diretamente associada a variáveis como temperatura, velocidade, espessura de camada e densidade de preenchimento. Esses fatores definem a qualidade da adesão entre as camadas, a formação de vazios e o grau de difusão molecular entre os polímeros depositados, impactando a integridade estrutural e a resistência final do material. Assim, compreender os efeitos microestruturais do processo de FFF é essencial para correlacionar os ajustes de impressão com a estrutura interna e o desempenho das peças fabricadas.

O artigo de Nieto *et al.* (2021), conforme ilustrado na Figura 5, mostra o desenho esquemático da microestrutura de uma peça fabricada por impressão 3D, onde W é a largura do filamento depositado, H é a altura de camada e V é o vazio entre os filamentos.

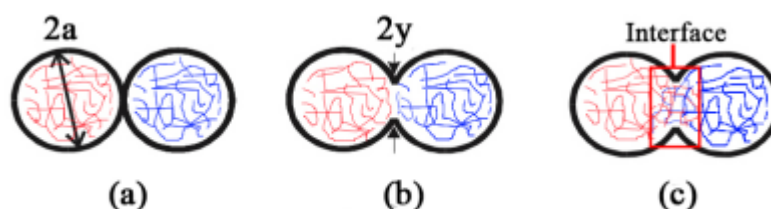
Figura 5 - Desenho ilustrativo da deposição de camada de uma peça fabricada por FFF



Fonte: NIETO *et al.*, (2021)

Uma estrutura ideal de deposição é homogênea, onde seus vazios apresentam tamanho e formato muito semelhantes. Quando a estrutura não está com os deposição homogênea é devido a formação de pescoço. O trabalho de Santana *et al.* (2015) descreve como ocorre a formação de pescoço durante o processo de deposição de material (Figura 6).

Figura 6 - Processo de união entre dois filamentos. A) Contato superficial. B) Crescimento de pescoço. C) Difusão molecular e randomização.



Fonte: LEONARDO *et al.*, (2015).

A formação de pescoço ocorre a partir do contato superficial entre filamentos depositados pelo processo de FFF em um estado semifundido. O processo é iniciado com o contato superficial entre filamentos adjacentes ou entre camadas sucessivas, seguido pelo crescimento de uma ponte de material fundido (chamado de pescoço) (SANTANA *et al.*, 2015).

A eficiência dessa união depende da temperatura do material no momento de deposição, da proximidade entre os filamentos e do tempo disponível para difusão. Quando a temperatura na interface permanece acima da temperatura de transição vítrea (T_g), há maior mobilidade molecular, favorecendo o entrelaçamento das

cadeias e resultando em uma adesão mais resistente. Estudos como o de Sun *et al.* (2003) demonstram que a taxa de crescimento do pescoço é diretamente influenciada pelas condições térmicas e pelo histórico de resfriamento da peça, sendo um dos principais fatores determinantes da qualidade estrutural das peças produzidas por FFF.

3.2.1.1 Teste de qualidade em função dos parâmetros de impressão

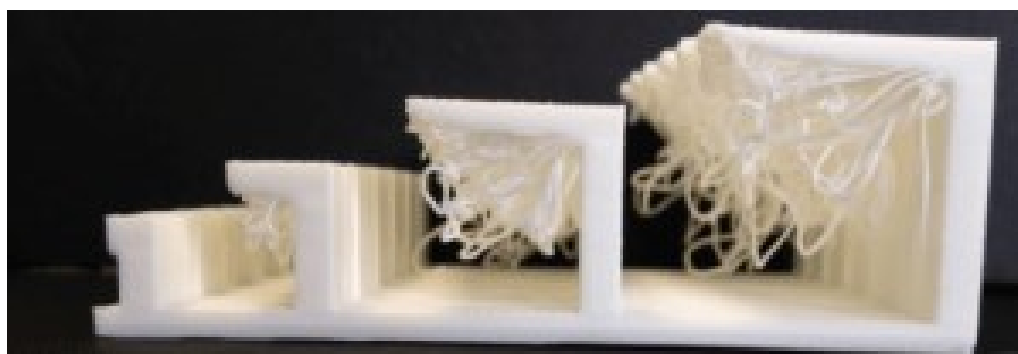
A qualidade de impressão pode ser monitorada por diversos modelos disponíveis. Os modelos são amplamente utilizados oferecendo uma abordagem prática e padronizada. Os modelos analisam características específicas, como qualidade da superfície da peça, capacidade de impressão sem suporte (*overhangs*), reprodução de detalhes finos e o controle de defeitos, sem *stringings* (SAMPAIO *et al.*, 2022).

A reprodução de detalhes finos, como arestas, furos ou padrões complexos, é outro parâmetro importante para avaliar a precisão e a resolução da impressora. O uso de geometrias padronizadas facilita a identificação de limitações, como problemas de retração, imprecisão nos movimentos dos eixos ou falhas no bico de impressão. A capacidade de reproduzir detalhes com precisão reflete o controle das configurações de impressão, diâmetro do bico e a qualidade geral do equipamento (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

A qualidade das superfícies é um dos aspectos avaliados, pois indica diretamente o quão refinado é o acabamento da peça. Esse parâmetro é influenciado por fatores como a temperatura de extrusão, a velocidade de impressão e as propriedades do material utilizado (SILVA *et al.*, 2023).

O teste de *overhang* é realizado sem a presença de suportes, testando a capacidade da impressora de lidar com ângulos inclinados. Peças com ângulos inferiores a 45° frequentemente requerem suportes para evitar deformações. A qualidade dessas peças de teste é verificada, observando-se falhas estruturais, como empenamento ou deformação na base, conforme observado na Figura 7. Quando bem executadas, as saliências indicam que o equipamento e os parâmetros estão ajustados para lidar com desafios específicos de materiais e geometria (GIBSON *et al.*, 2015).

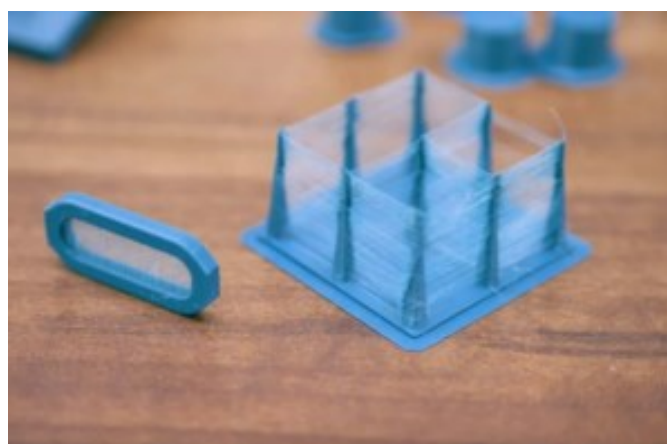
Figura 7 – Ilustração de uma peça contendo efeito de overhang



Fonte: 3DLAB (2024).

Por fim, os *stringings* (Figura 8) são defeitos que aparecem na forma de fios finos de material entre diferentes áreas da peça. Esses defeitos geralmente ocorrem devido a configurações inadequadas de retração durante a movimentação do bico. Testes específicos com geometrias separadas por distâncias variadas são realizados para ajustar parâmetros como velocidade de retração, distância e temperatura de extrusão. A eliminação dos *stringings* é um indicativo de um sistema bem calibrado (3DLAB, 2024).

Figura 8 – Ilustração do efeito de *stringings*



Fonte: 3DLAB (2024).

As peças padronizadas para esses testes podem ser encontradas nos repositórios *Thingiverse* e *PrusaPrinters*. Esses modelos permitem avaliar diversos parâmetros simultaneamente, garantindo que as configurações sejam ajustadas de forma eficaz. Exemplos, como o modelo *3D Benchy*, foram desenvolvidos para avaliar a capacidade das impressoras para imprimir sem falhas no *overhang*, com detalhes

bem estruturados e ausência de *stringings*. Essa abordagem sistemática é essencial para garantir que a qualidade das peças esteja adequada às exigências do projeto, promovendo confiabilidade e precisão no contexto da fabricação aditiva (OLIVEIRA *et al.*, 2021). O modelo *3D Benchy* (Figura 9) avalia vários aspectos como precisão dimensional. Para medir esses aspectos, utiliza-se paquímetro e inspeções visuais para identificar imperfeições. Existe uma tabela de medidas para o Benchy, onde você compara com seu resultado final. Esses critérios ajudam a garantir que a impressora e o material utilizados estejam funcionando adequadamente.

Figura 9 – Ilustração de um *Benchy* em oito vistas



Fonte: IMPRESSORAS3D (2024).

Dependendo da aplicação, a peça final pode manter sua integridade estrutural por longos períodos, sem sofrer alterações significativas. A preservação da peça dependerá, em grande parte, do ambiente em que será aplicada, pois, muitas vezes, ela estará sujeita a esforços, além de variações de temperatura e umidade. A degradação das peças poliméricas é um processo natural, sendo essencial compreendê-lo para otimizar a preservação do produto e até estimar sua vida útil (CAVALCANTE *et al.*, 2022).

3.3 DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS

A degradação de polímeros é definida como qualquer reação que pode ser causada por agentes químicos, físicos ou mecânicos ou em simultaneidade, induzindo uma modificação irreversível na estrutura e propriedades dos materiais poliméricos. Em alguns casos as reações de degradação podem ser desejáveis, como

por exemplo, para rejeitos poliméricos não recicláveis. Porém, em geral, as reações de degradação são indesejáveis (RODRIGUES *et al.*, 2007).

É um processo que resulta da interação complexa entre diversos fatores ambientais, tais como radiação, temperatura, umidade e outros elementos presentes no ambiente. Este processo não apenas afeta a estrutura dos polímeros, mas também suas propriedades mecânicas, óticas, químicas e térmicas (RODOLFO *et al.*, 2007). A taxa de degradação pode variar significativamente. Alguns polímeros podem levar décadas para se decompor, enquanto outros podem se desfazer completamente em algumas horas. Para entender sobre a degradação de algum polímero específico é necessário entender os processos de degradação dos polímeros (RAMALHO *et al.*, 2022).

3.3.1 Processos de degradação

Ao longo da vida útil dos polímeros, diversos tipos de degradação podem ocorrer. Esses processos podem ser originados por diversos tipos de reações químicas, como por exemplo: oxidação, despolimerização, reticulação, cisão de ligações químicas, entre outros (RAMALHO *et al.*, 2022).

O processo de iniciação de uma degradação é caracterizado pelo rompimento de uma ligação covalente, gerando elementos reativos que são responsáveis por dar continuidade ao processo. Uma das formas mais comuns de se iniciar o fenômeno de degradação é por uma fonte de energia externa (KATALIN *et al.*, 2023). A degradação dos polímeros é categorizada em diferentes tipos, incluindo degradação térmica (causada pelo calor), degradação termo oxidativa (causada pelo calor e pelo oxigênio), degradação termomecânica (causada pelo calor e pela aplicação de uma tensão ou taxa de cisalhamento), fotodegradação (causada pela luz), foto-oxidativa (causada pela luz e pelo oxigênio), biodegradação (causada por agentes naturais) e degradação mecânica (causada pelo estresse mecânico) (SALAZI *et al.*, 2022).

3.3.1.1 Degradação térmica, hidrolítica e química

A degradação térmica é um processo que ocorre quando os polímeros são expostos a temperaturas elevadas, seja durante o processo de fabricação, como na moldagem por injeção ou extrusão, ou durante o uso em aplicações que envolvam calor (COSTA *et al.*, 2015). Durante a degradação térmica ocorre a ruptura das ligações químicas das cadeias poliméricas, levando a alterações na estrutura química

A degradação química envolve a ação de líquidos corrosivos ou gases em polímeros, causando a quebra das macromoléculas ou oxidação de grupos funcionais (BRITO *et al.*, 2021; AYA *et al.*, 2022; SALLENAVE *et al.*, 2017). Por exemplo, em ambientes marinhos, polímeros como o PETG podem ser afetados por combinações de umidade e íons cloreto, o que pode acelerar processos de hidrólise ou oxidação. Outro exemplo comum é a exposição de polímeros à radiação UV, que pode induzir reações químicas dos grupos funcionais da superfície, como a formação de radicais livres, que subsequentemente reagem com o oxigênio do ar, levando a danos adicionais (SALLENAVE *et al.*, 2017).

A degradação hidrolítica é caracterizada pela sensibilidade de alguns polímeros à umidade. Esses materiais podem se degradar sob a ação da água, produzindo ácidos, ésteres e glicóis como produtos de degradação. A equação 1 demonstra o mecanismo de hidrólise no PET.



A matriz polimérica absorve água por um processo de difusão volumétrica, a cinética de absorção geralmente segue a lei de Fick, conforme mostrado na Equação (2) (MARMITT *et al.*, 2010).

$$J = -D \cdot \frac{\partial X}{\partial c} \quad (2)$$

Onde:

- J é o fluxo de água (quantidade de água que atravessa uma área por unidade de tempo).
- D é o coeficiente de difusão da água no polímero.
- $\frac{\partial X}{\partial c}$ é o gradiente de concentração de água ao longo do material.

O processo de difusão em polímeros pode ser descrito pela lei de Fick e fatores como a temperatura podem interferir no processo de difusão. Fan *et al.* apresentam uma comparação entre os mecanismos de absorção de água. Segundo os autores, a absorção ocorre em dois estágios, sendo o primeiro através da superfície do material e o segundo através de sua estrutura. Enquanto o transporte pela estrutura obedece a lei de Fick, através da superfície, a difusão depende fortemente das condições de umidade do ambiente e da química dos materiais (CALLISTER, 2009).

Quando o material polimérico está sob a ação de temperatura e umidade ocorre uma diminuição da temperatura de transição vítrea, devido ao efeito plastificante da água absorvida, e da resistência da interface fibra/matriz. Esses efeitos podem ser reversíveis quando a exposição ocorre por um período de curta duração. Porém, quando a exposição ocorre por tempos prolongados com a combinação de umidade e mudanças de temperatura, os efeitos podem ser irreversíveis, causando a degradação química da matriz e o descolamento da interface (PAIVA *et al.*, 2006).

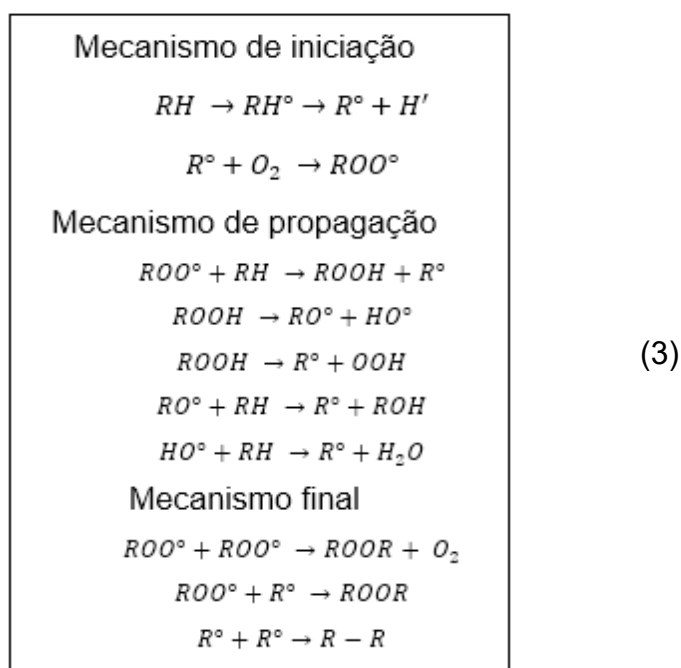
Santana *et al.*, (2015) demonstraram que o PETG é um material mais resistente à degradação térmica, ou seja, mais estável termicamente quando comparado com o PLA, além de ser flexível, propriedade que o torna muito interessante para aplicações na impressão 3D. Outro fator revelado pelos autores é a menor dispersão estatística dos resultados apresentados pelo PETG em relação ao PLA, sugerindo maior consistência e previsibilidade nas propriedades do PETG durante o processo de fabricação. Os autores concluíram que o PETG é uma opção atrativa e versátil em

diversas aplicações, especialmente na impressão 3D e em ambientes onde a resistência térmica é necessária.

3.3.1.2 Degradação fotoquímica e foto oxidativa

As reações fotoquímicas desencadeadas pela radiação UV e pelo oxigênio atmosférico podem causar a quebra das cadeias dos polímeros, resultando na redução de suas propriedades originais. A exposição à radiação UV, ao oxigênio atmosférico, a variações de temperatura e a tensões mecânicas estão entre os principais fatores que contribuem para degradação de materiais poliméricos (SAZALI *et al.*, 2022).

A degradação foto oxidativa é desencadeada pela exposição dos polímeros à radiação ultravioleta de alta energia. A equação 3 demonstra o mecanismo de reação da degradação foto oxidativa (KATALIN *et al.*, 2023).



Fonte: Adaptado de RAMALHO *et al.*, (2022).

Sob a luz do sol, a taxa de oxidação dos polímeros é acelerada e este efeito pode ser agravado pela presença de poluentes atmosféricos, como óxidos de enxofre, que são componentes frequentes da atmosfera industrial. Neste caso, a degradação ocorre devido aos fenômenos de fotólise, processo que consiste na dissociação de

moléculas orgânicas complexas por meio de luz ou radiação ultravioleta, e foto oxidação (MARMITT *et al.*, 2010).

3.3.2 Degradação através da radiação UV e absorção de água em polímeros

Alguns materiais como o PLA, PETG, PC e ASA, têm sido amplamente utilizados para a produção de peças por FFF, devido à sua flexibilidade de design e custo acessível. Desta forma, a degradação desses materiais em diferentes condições ambientais tem recebido atenção crescente, especialmente em contextos como ambientes marinhos, em que fatores como salinidade, radiação UV e temperaturas extremas podem comprometer suas propriedades físicas (REVILLA *et al.*, 2023).

O teste de envelhecimento pela degradação ultravioleta pode ser realizado em ambiente natural ou simulado. Nas exposições em ambientes simulados, as variáveis mais importantes são tipo de fonte geradora de radiação ultravioleta, intensidade de radiação, temperatura, umidade e ciclos térmicos. A resposta do material à exposição depende, portanto, da intensidade dessas variáveis (FECHUNE *et al.*, 2020).

O ensaio de envelhecimento UV em materiais poliméricos é uma técnica fundamental utilizada para avaliar a resistência desses materiais à degradação causada pela exposição à radiação ultravioleta (UV). Este ensaio envolve a utilização de câmaras de intemperismo, as quais simulam condições ambientais externas, incluindo radiação UV, umidade e temperatura. Dentro dessas câmaras as amostras são expostas a ciclos repetidos de radiação UV, replicando assim as condições de exposição ao sol ao longo do tempo. Durante o ensaio são realizadas medições periódicas para avaliar diversas propriedades dos materiais poliméricos, incluindo mudanças na cor e aparência, alterações nas propriedades mecânicas, degradação química e perda de propriedades ópticas (SILVA *et al.*, 2017).

A exposição à radiação UV induz a formação de radicais livres nas cadeias poliméricas, iniciando processos de foto-oxidação. Esses radicais reagem com oxigênio, gerando espécies como peróxidos que, por sua vez, promovem a cisão das cadeias poliméricas. Este processo é intensificado em ambientes externos, onde fatores como a temperatura e a umidade relativa atuam de forma sinérgica. Estudos como o de Lee *et al.* (2018) evidenciaram que a exposição prolongada à radiação UV resulta em uma diminuição da resistência mecânica e no aumento da fragilidade em polímeros como PLA e PETG.

No artigo de Amza *et al.* (2021), foi analisado o efeito do envelhecimento acelerado por exposição à radiação UV-B em polímeros de impressão 3D, incluindo PLA e PETG. Os resultados mostraram que a resistência à tração do PETG diminuiu em 36% e a resistência à compressão foi reduzida em 38,3% após a exposição à radiação UV-B. A análise por MEV revelou fissuras superficiais, indicando que a radiação UV acelera a quebra das cadeias poliméricas.

O artigo de Chen *et al.* (2016) explora o comportamento de fotodegradação do PETG quando exposto à radiação ultravioleta. O trabalho mostra que o teor de CHDM (1,4-ciclohexanodimetanol) no PETG está diretamente relacionado ao aumento do grau de reticulação e à elevação da temperatura de transição vítrea (T_g). O mecanismo segue reações principalmente de Norrish Tipo I e II, em que a cisão de cadeia e formação de macro radicais são predominantes. Além disso, uma cisão da cadeia causará mudanças no peso molecular e, conseqüentemente, diminuirá o T_g e aumentará o grau de cristalinidade.

Segundo Sedlak *et al.* (2023), foram analisados os efeitos da radiação UV, temperatura elevada e umidade em polímeros como PLA, PETG e ABS. O PETG apresentou menor resistência à degradação UV em comparação ao ABS, enquanto o PLA foi o mais suscetível à degradação, com queda na resistência mecânica e aumento da fragilidade.

Estudos indicam que o ambiente marinho apresenta desafios importantes para os polímeros impressos em 3D. O artigo de Ramírez Revilla *et al.* (2023) avaliou a degradação de PLA, PETG, PC e ASA em condições simuladas de absorção de água. Após a exposição a uma solução salina técnica (122,5 g/L) a 30°C por 21 dias, sugeriu-se uma redução significativa nas propriedades mecânicas, particularmente no PLA, que apresentou uma maior redução na resistência à tração (33,55 %). O PETG apresentou redução na resistência à tração de apenas 6,36%, um valor significativamente menor do que o observado no PLA. Isso indica que o PETG possui uma estrutura molecular mais resistente à penetração e interação com a molécula de água, tornando-o mais adequado para aplicações em ambientes úmidos, apresentando maior adequação para aplicações marinhas.

Nieto *et al.* (2021), estudaram o comportamento de absorção de água do PLA e PETG em ambientes aquáticos. O estudo revelou que o PETG possui menor taxa de absorção de umidade do que o PLA, tornando-se mais adequado para aplicações

em ambientes úmidos. No entanto, a exposição prolongada à água pode levar a alterações dimensionais e redução das propriedades mecânicas

No estudo de Glowacki *et al.* (2022), foi analisada a resistência de componentes impressos em 3D sob diferentes condições ambientais, incluindo variações de temperatura. Foi observado que o PETG apresenta maior estabilidade térmica do que o PLA, mas temperaturas acima de 70°C podem causar amolecimento e perda de rigidez estrutural.

Diante dos estudos analisados, observa-se que o PETG apresenta propriedades favoráveis para diversas aplicações, incluindo a fabricação de pequenas embarcações por impressão 3D, devido à sua transparência e resistência mecânica. No entanto, sua durabilidade em ambientes externos pode ser comprometida pela degradação induzida por radiação UV. Além disso, embora o PETG tenha menor absorção de umidade em comparação ao PLA, sua estabilidade pode ser afetada por longos períodos de contato com a água e temperaturas elevadas. Assim, compreender os mecanismos de degradação desse material em condições de exposições específicas é essencial para aprimorar sua aplicabilidade e vida útil em diferentes contextos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia experimental proposta para esse trabalho de mestrado, Figura 10, foi estruturada em três estudos:

- Estudo 1: Avaliação de três filamentos comerciais de PETG;
- Estudo 2: Estudo de degradação em água em peças impressas por FFF;
- Estudo 3: Estudo acelerado de envelhecimento por radiação ultravioleta em peças impressas por FFF.

Foram avaliadas a estrutura (grupos funcionais, microestrutura e morfologia) e propriedades térmicas, mecânicas e viscoelásticas das amostras impressas foram avaliadas. Considerando o escopo da análise e as especificidades das técnicas utilizadas, diferentes conjuntos de amostras foram preparados.

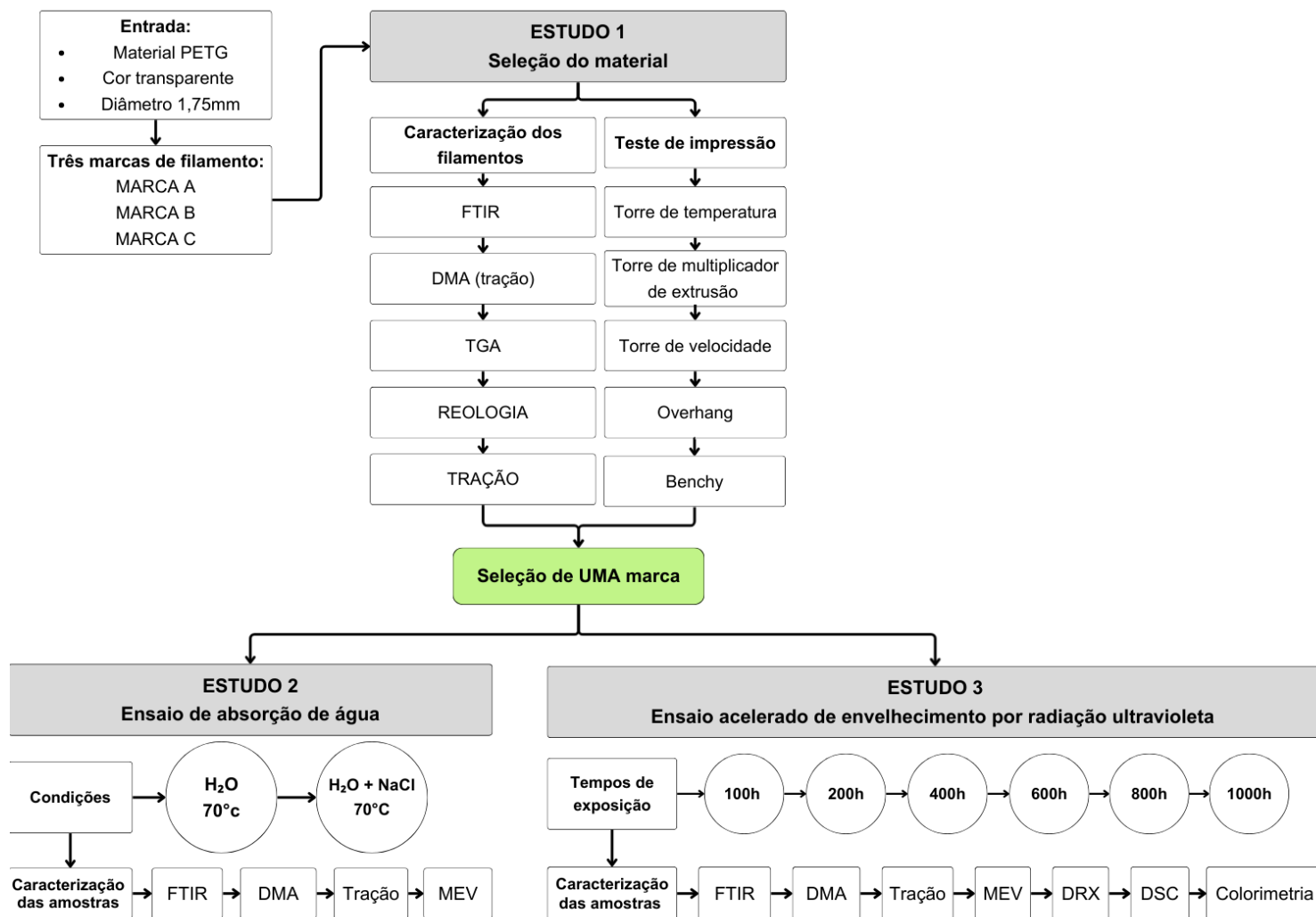
4.1 FILAMENTOS DE PETG

Para a realização da Etapa 1, foram selecionados três fornecedores nacionais de filamentos de PETG, para não expor no nome das empresas as marcas foram identificadas como A, B e C. A escolha foi baseada na popularidade entre usuários de Impressão 3D, priorizando as marcas mais utilizadas no mercado brasileiro. Foram adquiridos filamentos transparentes, com diâmetro nominal de 1,75 mm. O valor cotado em Junho de 2024 foi de R\$138,00; R\$123,69; R\$95,00, respectivamente, para as três marcas.

4.2 IMPRESSORA 3D

A impressora 3D Ender-3 V1 da *Creality*® (Figura 11) foi utilizada em todas as etapas da pesquisa. O equipamento dispõe de um volume de trabalho de (220x220x250) mm, com temperaturas máximas de extrusão e base de 250 °C e 110 °C respectivamente.

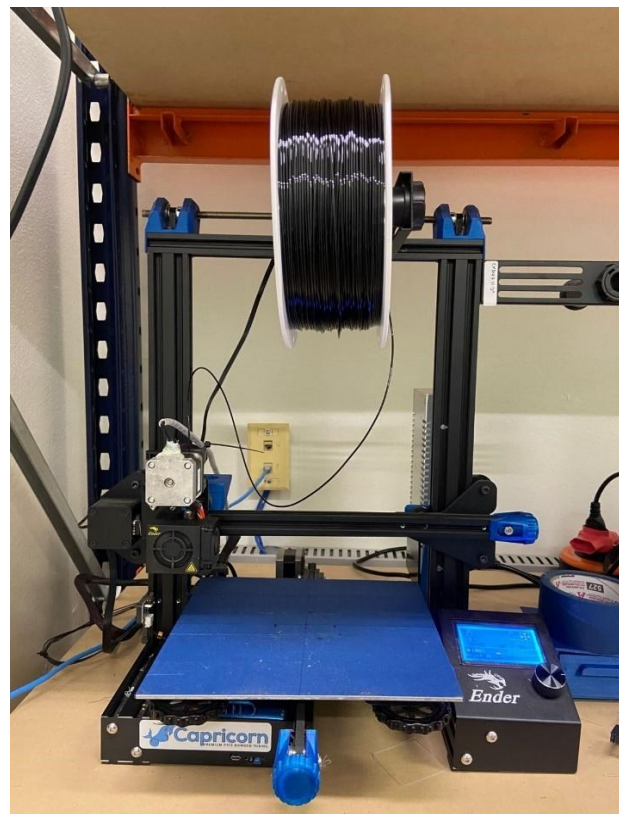
Figura 10 – Esquema ilustrativo das etapas de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autoral.

A configuração dos parâmetros de impressão utilizados ao longo da fabricação das amostras deste estudo encontra-se disponível na Tabela 1. Esses parâmetros serviram como base para a impressão dos modelos utilizados nos testes de printabilidade e para a produção dos corpos de prova destinados aos ensaios de degradação. No teste de printabilidade foram realizadas alterações pontuais em variáveis específicas, tais como nas torres de temperatura, essas diferenças serão explicadas na sessão 4.4.2.

Figura 11 – Impressora 3D Ender 3 da Creality



Fonte: Autoral.

Com o modelo 3D em formato STL, utilizou-se o software de fatiamento PrusaSlicer versão 2.9.0 para definir os parâmetros do processo FFF e gerar o arquivo G-code, responsável por orientar todas as etapas de movimentação, extrusão e temperatura da impressora durante a construção das peças deste projeto.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na impressão.

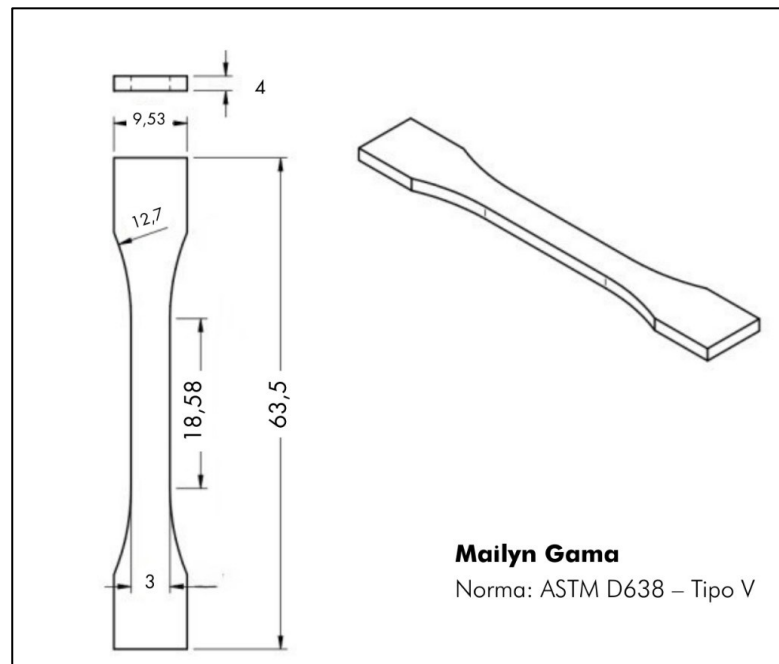
Parâmetro	Valor
Temperatura de impressão (°C)	235°C
Temperatura da mesa (°C)	70
Altura de camada (mm)	0,2
Diâmetro do bico (mm)	0,4
Velocidade de impressão (mm/s)	50
Preenchimento	15%

Fonte: Autoral.

4.3 CORPOS DE PROVA

As amostras destinadas aos ensaios de tração, colorimetria e análises de DMA foram produzidas com dimensões definidas por normas específicas, ou modelos customizados para os equipamentos de análise disponíveis. As dimensões adotadas personalizadas foram: (60×10×3) mm para DMA, (30×30×3) mm para colorimetria. O corpo de prova para tração, por sua vez, foi projeto de acordo a norma ASTM D638 tipo V (ISSAYEY *et al.*, 2021) e está ilustrado na Figura 12.

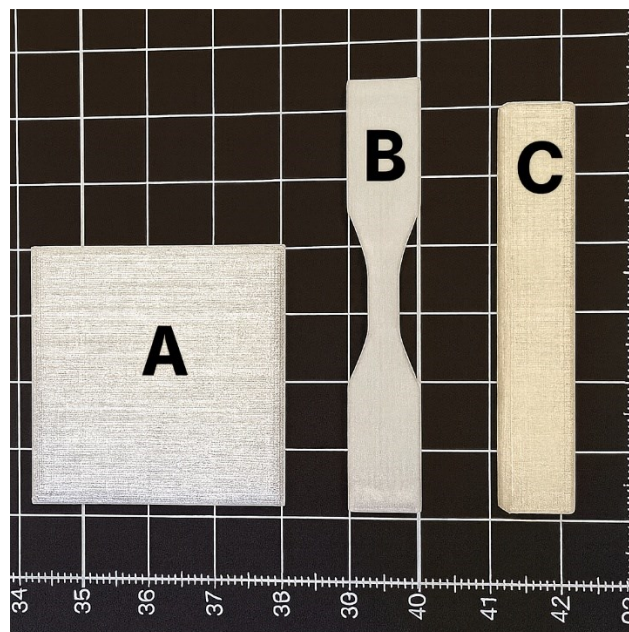
Figura 12 – Medidas do corpo de prova de tração (dimensões em mm).



Fonte: Autoral

Na Figura 13 é apresentada uma imagem com os modelos impressos para cada um dos testes: (a) colorimetria, (b) tração e (c) DMA.

Figura 13 – Corpos de provas impressos por FFF com dimensões padronizadas para os ensaios de (A) colorimetria, (B) tração e (C) DMA.



Fonte: Autoral.

Para cada caracterização, foi estabelecido um número mínimo de amostras com o objetivo de garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos através da média e dispersão em torno dos dados. Para as análises de colorimetria, foram utilizadas três amostras por condição de degradação acelerada (Figura 13 A). Nos ensaios de tração, foram preparados sete corpos de prova por grupo (Figura 13 B), conforme recomendado pela norma ASTM D638. Para os ensaios de DMA, foram impressas cinco amostras por condição sendo utilizadas as três melhores nos ensaios (Figura 13 C).

Tabela 2 – Número de amostras.

Ensaio	Número de amostras por condição	Condição	Quantidade de condições	Número total de amostra
Colorimetria	3	Exposição UV	6	18
Tração	7	Grupo controle	1	7
Tração	7	Exposição UV	6	42
Tração	7	Absorção de água	2	14
DMA	5	Grupo controle	1	5
DMA	5	Exposição UV	6	30
DMA	5	Absorção de água	2	10

Fonte: Autoral.

Como parâmetro de comparação, foram impressos corpos de prova que não foram submetidos a nenhuma condição de degradação, denominados grupo controle (GC). Esse grupo foi utilizado como referência para avaliar as possíveis alterações nas propriedades dos materiais após os ensaios de envelhecimento.

As amostras destinadas ao teste de envelhecimento acelerado por radiação UV foram denominadas grupo UV, com seis tempos de exposição (100, 200, 400,

600, 800 e 1000 horas). Já o ensaio de absorção de água, denominado grupo AB, contou com duas condições diferentes, água destilada a 70°C e água salina a 70°C.

4.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO UTILIZADAS

Esse trabalho utilizou diversas técnicas de caracterização de materiais, dentro do Estudo 1, 2 e 3. Cada uma delas é apresentada de forma detalhada, incluindo especificações do equipamento utilizado, local que foi feito e parâmetros de operação.

Algumas análises foram feitas apenas para um estudo específico e outras utilizadas nos três estudos, sendo assim, todas as caracterizações realizadas serão apresentadas neste tópico e posteriormente no início de cada Estudo será descrito a técnica de caracterização utilizada nele especificamente.

4.4.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Três filamentos de PETG transparente de fornecedores diferentes, em sua forma filamentar e/ou impressa, foram analisadas por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier, em modo de reflexão total atenuada (ATR), utilizando um espectrômetro Bruker TENSOR 27, no Laboratório de Materiais (LABMAT) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). As medições abrangeram a faixa de 4000 a 600 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} . O objetivo foi identificar e comparar os grupos funcionais característicos do PETG entre os diferentes filamentos, confrontando-os com referências da literatura, bem como verificar possíveis variações de composição, tais como a presença de aditivos especiais para ajuste da extrudabilidade e printabilidade dos materiais.

4.4.2 Análise Dinâmico Mecânica (DMA)

Os ensaios de DMA foram realizados em um equipamento DMA 242 E *Artemis*® (*Netzsch*®), disponível no LABMAT/UFSC. As medições foram conduzidas em uma faixa de temperatura de 25 °C a 120 °C, com taxa de aquecimento de 2 °C/min, frequência de 1 Hz e amplitude de oscilação configurada para 20 μm .

A análise de DMA feita diretamente no filamento foi em modo de tração, enquanto na análise feita na peça impressa foi em dual cantiléver (32 mm).

O objetivo principal da DMA foi determinar as propriedades dinâmico-mecânicas dos materiais e a temperatura de transição vítrea (T_g).

No Estudo 1, foram analisadas amostras de filamento e de peças impressas, e nos demais estudos foi feito apenas em peças impressas. O filamento possuía diâmetro de 1,75 mm e comprimento de 30 mm.

4.4.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise de TGA foi realizada em amostras de filamento dos três fornecedores de PETG, utilizando o equipamento STA 449 F1 *Jupiter®* (Netzsch), LABMAT/UFSC. O ensaio foi realizado com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera de ar, na faixa de temperatura de 23 a 700 °C. Essa análise foi aplicada com o objetivo de comparar a estabilidade térmica dos filamentos, identificando as perdas de massa e a temperatura de início de decomposição (Tonset) para cada amostra, além da quantidade percentual de resíduo depois da decomposição.

4.4.4 Propriedades Reológicas

O comportamento reológico dos filamentos de PETG foi analisado em um Reômetro oscilatório modelo *Hybrid Discovery HR1* da *TA Instrument*. O equipamento, de placas paralelas, encontra-se localizado no Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O teste foi realizado no regime de viscoelasticidade linear em atmosfera de nitrogênio a uma temperatura de 235°C, em frequência variando entre 0,1 e 100 Hz e deformação de 0,5%. Através desta análise foram obtidas as curvas de módulo de armazenamento (G'), de perda (G'') e da viscosidade complexa (η^*) em função da frequência. Para essa análise, foram fabricados corpos de prova por FFF com 1 mm de espessura e 25 mm de diâmetro.

4.4.5 Ensaio Mecânico sob tração

O ensaio mecânico sob tração foi realizado conforme a norma técnica ASTM D638, utilizando corpos de prova do Tipo V impressos. Para cada filamento foram impressos sete corpos de prova. Os testes foram conduzidos em uma máquina de ensaio universal Criterion 45 (MTS), equipada com célula de carga de 100 kN, no Laboratório de Materiais (LabMat) da UFSC. A velocidade de ensaio foi de 10 mm/min.

O objetivo do ensaio foi avaliar o comportamento mecânico dos filamentos de PETG dos três fornecedores, analisando a resistência máxima à tração e módulo de

elasticidade. Esses resultados permitiram comparar o desempenho estrutural das peças fabricadas com os diferentes filamentos.

4.4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A mesoestrutura das peças impressas foi analisada em um microscópio eletrônico VEGA3® (TESCAN®), no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME/UFSC). Todas as amostras foram recobertas com ouro por 40 s em plasma de argônio (40 V) e, em seguida, analisadas com tensão de aceleração de 10 kV.

4.4.7 Microscopia ótica (MO)

As microestruturas das peças impressas foram analisadas em um microscópio vertical ótico Leica® modelo DM4000 com câmera digital acoplada e software de análise de imagens no laboratório de materiais (LABMAT/UFSC) com variadas ampliações.

4.4.8 Difração de raios X (DRX)

As análises de difração de raios X foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios X (LDRX) do Departamento de Química da UFSC, em modo de reflexão, utilizando um difratômetro X'Pert PRO (PANalytical) equipado com tubo PW3373/00 Cu LFF (ânodo de cobre, $\lambda K\alpha = 1,541874 \text{ \AA}$), operando a 45 kV e 40 mA, e detector X'Celerator (RTMS). Os difratogramas foram obtidos no intervalo de 3° a 100° (2θ), com passo de $0,0501^\circ$ e tempo de contagem de 59,69 s por ponto, em três varreduras consecutivas no modo contínuo. Adotou-se distância feixe–amostra de 240 mm, fenda divergente fixa de $1/2^\circ$, fenda antiespalhamento fixa de 1° e filtro de níquel (0,020 mm) para supressão da radiação $K\beta$.

4.4.9 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A exploratória diferencial (DSC) foi conduzida em um equipamento NETZSCH Instruments® modelo DSC PerkinElmer 6000, localizado no Laboratório de Engenharia Biomecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Foi utilizada apenas no estudo 3, com o objetivo de determinar as temperaturas de transição térmica do material. verificar a existência da formação de estruturas cristalinas no PETG em função dos mecanismos de degradação. Aproximadamente 10 mg de amostra foram submetidos a três ciclos térmicos consecutivos: aquecimento

de 20 °C a 250 °C, resfriamento de 250 °C a 20 °C e novo aquecimento até 250 °C, sob atmosfera de nitrogênio. Empregou-se taxa de aquecimento de 3 °C·min⁻¹ em todo o ensaio.

4.4.10 Análise Colorimétrica (Espectrofotometria)

Para realizar a análise de colorimetria das peças foi utilizado um espectrofotômetro KONICA MINOLTA™ modelo CM-3600 A, no modo de transmitância para a faixa de comprimento de onda de 360 nm a 740 nm, do núcleo de pesquisa em materiais cerâmicos e vidros (CERMAT) da UFSC.

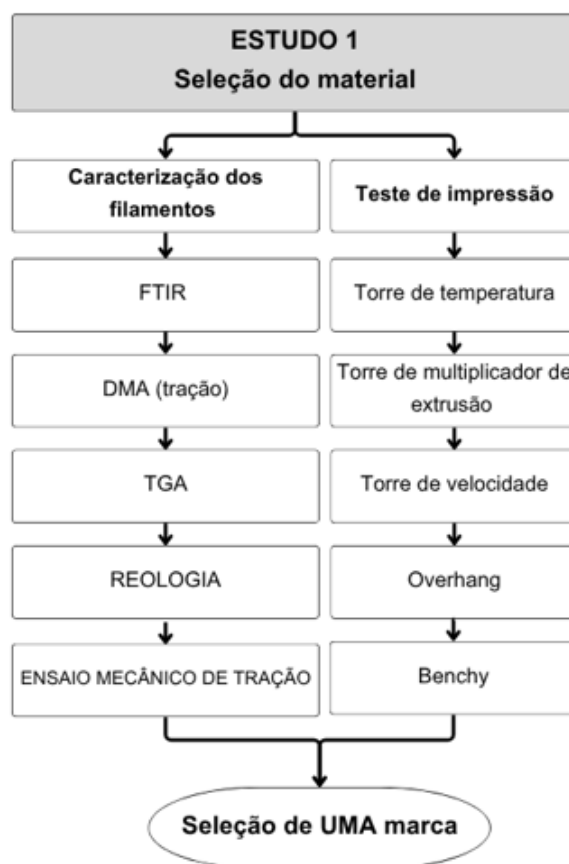
O instrumento utiliza um sistema hemisférico ótico de esfera integrada e é utilizado para medir transmitância e refletância de materiais líquidos e sólidos transparentes, translúcidos e opacos. O software utilizado para auxiliar na seleção dos dados do ensaio e resultados foi o OnColor da CYBERCHROME®.

4.5 ESTUDO 1: AVALIAÇÃO DAS TRÊS MARCAS DE FILAMENTO D E PETG

O esquema ilustrativo do estudo 1 está representado na Figura 14 e compreende de duas etapas principais: a caracterização dos três filamentos de PETG e a avaliação da sua printabilidade.

A caracterização dos materiais abrange cinco técnicas distintas, sendo a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Análise Termogravimétrica (TGA), Análise Dinâmico Mecânica (DMA), análise reológica, ensaio Mecânico de tração. Posteriormente foram realizados testes de printabilidade com cinco modelos 3D diferentes.

Figura 14 - Esquema ilustrativo do estudo 1



Fonte: Autoral.

O objetivo principal desta etapa foi realizar um estudo comparativo entre os três filamentos de PETG de diferentes fornecedores, a fim de escolher o mais adequado para o Estudo 2. Os critérios de seleção I estão descritos no item 4.4.3. Buscou-se garantir que o filamento escolhido apresentasse características compatíveis com a composição química correspondente ao PETG, bom desempenho mecânico e térmico. A escolha criteriosa do filamento é fundamental para assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados nas etapas seguintes do trabalho.

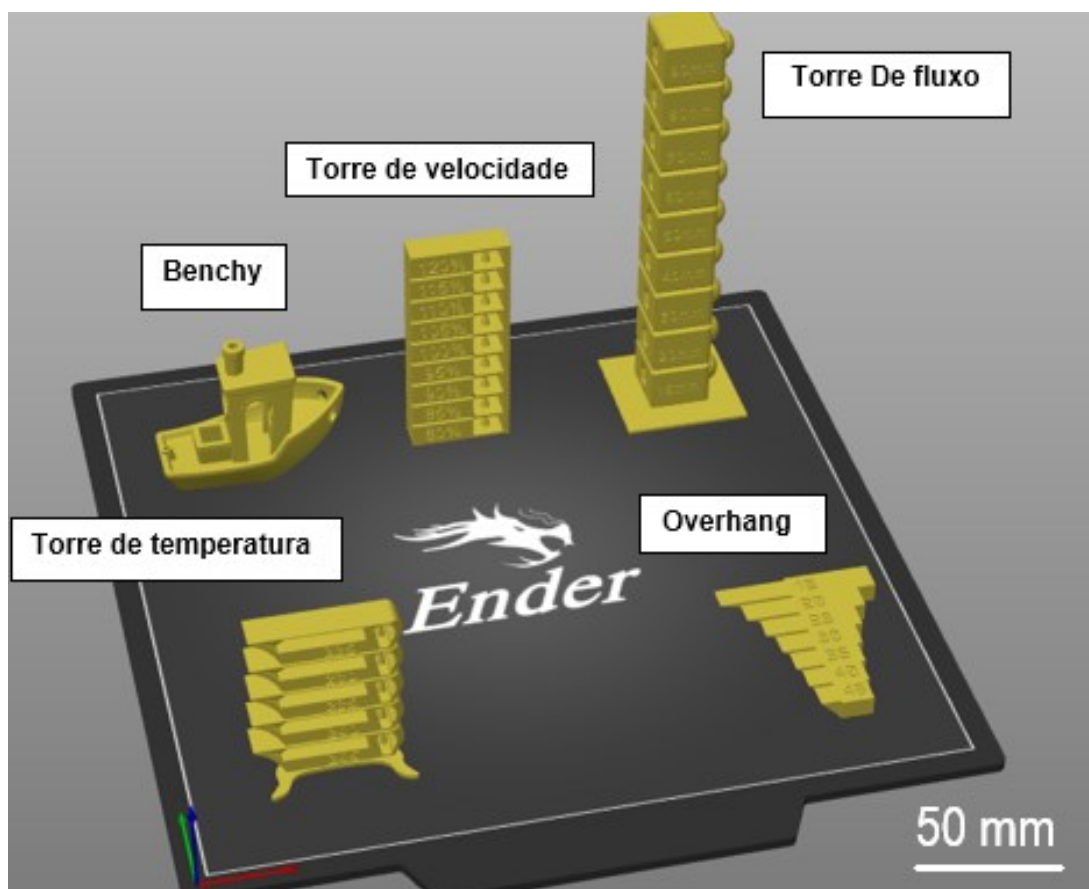
Verificar a printabilidade do material e definir parâmetros de impressão adequados é fundamental, já que a qualidade dos corpos de prova influencia diretamente os resultados dos testes de degradação. Peças com falhas de impressão, como falta de adesão entre camadas, porosidades ou contrações excessivas, podem introduzir ruídos que possam suprimir os efeitos da degradação do polímero, comprometendo a interpretação dos resultados. Assim, garantir uma boa qualidade

de impressão é essencial para que os efeitos observados nos ensaios sejam exclusivamente atribuídos ao processo de degradação do material, e não a defeitos decorrentes da fabricação dos corpos de prova.

4.5.1 Teste de printabilidade

Para o teste de printabilidade, onde foi avaliado a capacidade de impressão dos filamentos, foram impressos cinco modelos de calibração distintos, com variações projetadas para avaliar diferentes aspectos do processo. Os parâmetros de impressão utilizados estão detalhados no **ANEXO I**. Os modelos impressos incluíram: (i) *Benchy*, (ii) torre de multiplicador de extrusão, (iii) torre de velocidade, (iv) torre de temperatura e (v) teste do *overhang*. A Figura 15 ilustra os modelos 3D utilizados nos testes de printabilidade.

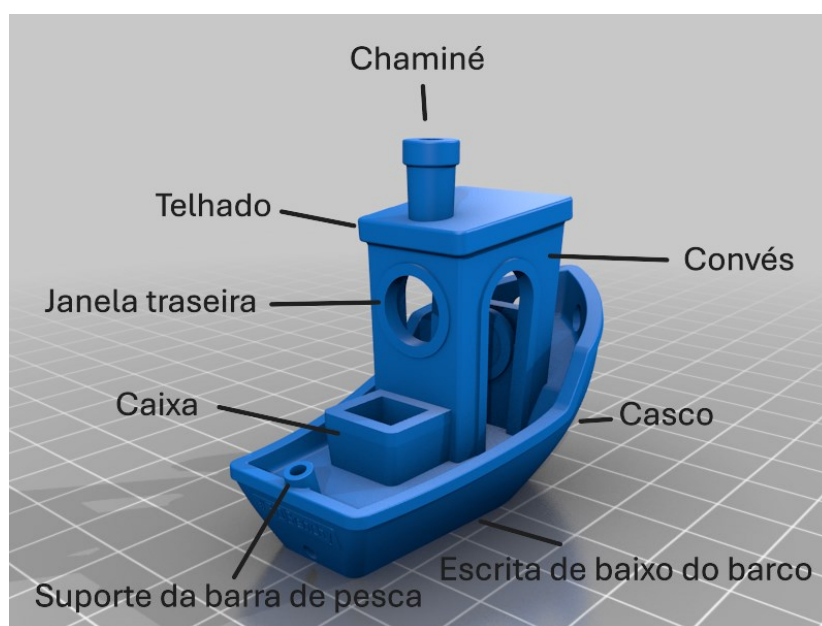
Figura 15 – Ilustração de todos os modelos impressos das peças para avaliar a printabilidade do PETG.



Fonte: Autoral.

O *Benchy* (Figura 16) utiliza um barco como objeto de teste para avaliar a qualidade de impressão. Criado pela *Creative Tools* em 2015, o modelo consolidou-se como uma das principais geometria de referência para calibração e avaliação da qualidade de impressão no processo de FFF e tornando-se um padrão de calibração e validação de desempenho de impressoras, parâmetros e materiais. Ele foi projetado para testar simultaneamente precisão dimensional, acabamento superficial, estabilidade térmica entre outros (GOMÉZ *et al.*, 2019).

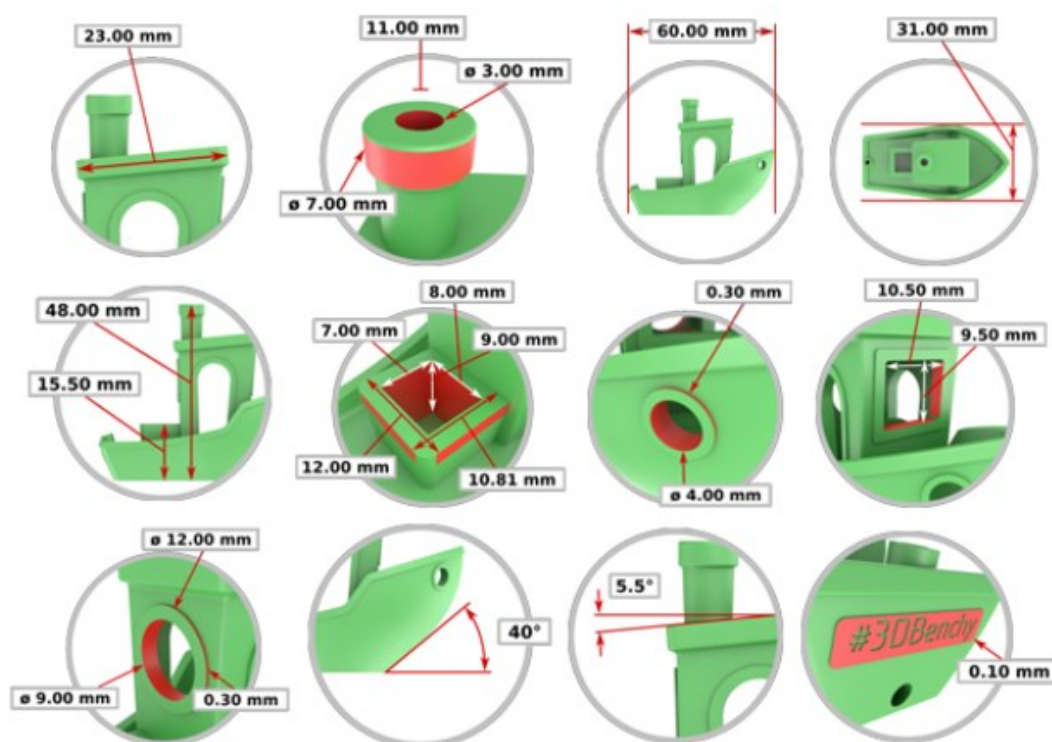
Figura 16 – Ilustração do Benchy descrevendo suas partes.



Fonte: Adaptado de THINGIVERSE (2024).

A Figura 17 mostra como avaliar o Benchy 3D para determinar a qualidade de impressão da peça.

Figura 17 – Esquema ilustrativo das medições no Benchy.



Fonte: IMPRESSORAS 3D (2024).

A análise foi feita através das medições da peça com um paquímetro digital da marca Mitutoyo® com precisão de 0,02mm, além de uma inspeção visual para verificar a qualidade de impressão.

De acordo com Volpato *et al.*, (2017) os principais parâmetros avaliados, destacam-se:

1) Acabamentos no casco: trata-se de uma superfície curva de dimensões consideráveis e uniformes, representando um desafio para a técnica de impressão 3D, uma vez que qualquer imperfeição será evidenciada. É necessário observar se o casco está uniforme e sem efeito “escada”.

2) Simetria: o objeto em questão apresenta simetria, o que facilita a detecção de quaisquer distorções. Recomenda-se avaliar o modelo sob diferentes ângulos, a fim de identificar possíveis irregularidades.

3) Faces horizontais planas: as superfícies superiores do convés, caixa e chaminé devem ser uniforme, horizontais e paralelas ao plano de referência inferior, garantindo assim a qualidade do acabamento.

4) Detalhes da superfície: elementos como as letras na popa, com altura inferior a 2 mm, e a espessura da placa de identificação de apenas 0,1 mm, demandam atenção especial para a avaliação de detalhes refinados.

5) Formas cilíndricas: a chaminé foi concebida para apresentar formas cilíndricas com diâmetros internos e externos distintos, permitindo a identificação clara de quaisquer desvios nas circunferências.

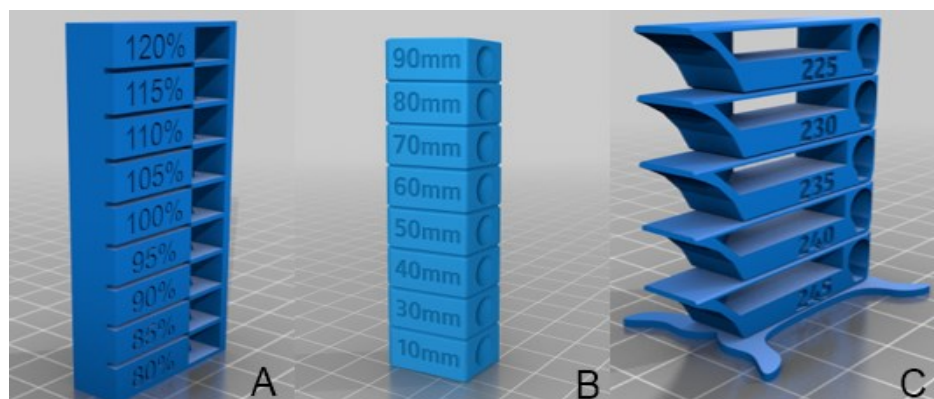
6) Superfícies de saliência: representam um desafio significativo na impressão 3D. O modelo Benchy oferece várias áreas desafiadoras, incluindo locais de difícil acesso, que devem ser avaliados com cuidado meticuloso. Destacam-se os grandes furos horizontais, como a janela traseira, e o círculo isolado, como exemplos de características que requerem atenção especial.

7) Orifícios inclinados: o suporte da barra de pesca apresenta um orifício de dimensões reduzidas e levemente inclinado. Esta característica permite a verificação da impressão de detalhes e de áreas que formam ângulos, exigindo precisão na avaliação.

8) Detalhes da primeira camada: as letras rasas localizadas na parte inferior do barco constituem um indicativo claro da qualidade da primeira camada de impressão. Caso esteja excessivamente comprimida, as letras não serão visíveis, sendo este um aspecto crucial a ser observado durante a avaliação do objeto impresso.

A Figura 18 ilustra as torres de multiplicador de extrusão, velocidade e temperatura.

Figura 18 – Ilustração dos modelos utilizados no teste de printabilidade. A) Torre do multiplicador de extrusão. B) Torre de velocidade. C) Torre de temperatura.



Fonte: Adaptado de Thingiverse (2025).

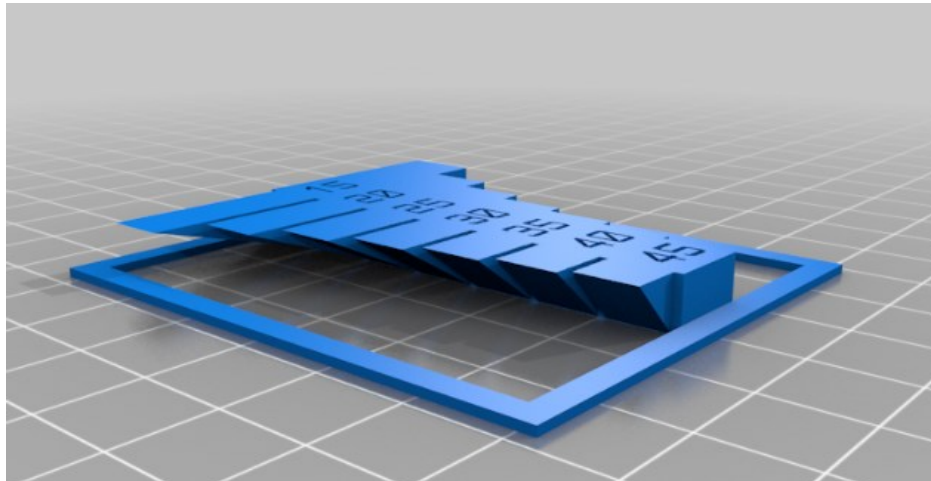
A torre de fluxo (Figura 18 A) foi projetada para avaliar a influência da taxa de extrusão no processo de impressão. O multiplicador de extrusão foi ajustado de 80% a 120%, em incrementos de 5% por bloco. O ensaio permite identificar o ponto ótimo de fluxo para evitar sub-extrusão (*under-extrusion*) e sobre-extrusão (*over-extrusion*), assegurando precisão dimensional e qualidade das superfícies das peças.

Já a torre de velocidade (Figura 18 B) foi projetada para avaliar o comportamento do material frente a variações da velocidade de impressão, permitindo identificar a faixa em que há equilíbrio entre qualidade superficial, precisão dimensional e adesão entre camadas. Nesse teste apresentou diferentes velocidades de impressão, variando de 10 mm/s a 90 mm/s ao longo da altura da peça, possibilitando observar defeitos típicos associados a velocidades extremas.

Por fim, a torre de temperatura (Figura 18 C) teve início com temperatura de extrusão de 225 °C, sendo acrescidos 5 °C a cada bloco, até atingir 245 °C. Esse teste permite identificar a faixa ideal de temperatura para garantir boa adesão entre camadas e qualidade superficial da peça.

A Figura 19 apresenta o teste de “overhang”, utilizado para avaliar a capacidade de impressão de geometrias inclinadas sem a utilização de suportes. Quando ângulos superiores a 45° são impressos sem suporte, o material tende a ser depositado sem autossustentação, sem ancoragem adequada na camada anterior, o que pode gerar deformações. O modelo de teste foi projetado com inclinações variando de 15° a 45°, permitindo determinar o limite máximo de impressão estável para o material e os parâmetros utilizados.

Figura 19 – Ilustração do modelo 5 de overhang



Fonte: Adaptado de Thingiverse (2025).

Assim, esses testes contribuem para a definição de configurações ideais de impressão, aumentando a confiabilidade e a precisão geométrica e dimensional das peças produzidas por manufatura aditiva.

4.5.2 Critérios de seleção do material

Para escolher uma marca de filamento de PETG entre as três marcas estudadas no Estudo 1 foram elencados critérios de seleção.

O primeiro critério foi verificar se a marca atendia as especificações indicadas na literatura, em relação as suas propriedades mecânicas, térmicas, química e reológicas. Posteriormente foi avaliada a capacidade de impressão de cada marca de PETG. Para isso foi feito uma análise de qualidade nas peças impressas por cada material, sendo avaliada em 5 modelos testes, sendo eles, as torres de temperatura, velocidade e fluxo, o Benchy e o modelo de overhang.

Para isso foi feito uma comparação dos valores obtidos nas análises com a Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações para o critério de seleção do PETG.

Critério Técnico	Propriedade Avaliada	Análise	Valor de referência	Referência
Propriedade Mecânica	Tensão máxima (MPa)	Ensaio de tração	45–60	AARON <i>et al.</i> , 2021

	E' (MPa)	DMA	800–1000 (peça)	SILVA <i>et al.</i> , 2017
	Tg (°C)	DMA (tan δ)	78–88 (peça)	NIETO <i>et al.</i> , 2021
Estabilidade Térmica	Comportamento de degradação (°C)	TGA	370 – 490	ANTOLIN <i>et al.</i> , 2023; SANTANA <i>et al.</i> , 2018
Estabilidade Química / Estrutural	Presença de grupos funcionais	FTIR	Espectro compatível com PETG padrão	(AMZA <i>et al.</i> , 2024) * *entre outros citados na tabela 6
Reologia	Viscosidade	Reômetro	800 e 200 na faixa de 10–100 s ⁻¹	GIBSON <i>et al.</i> , 2015
Printabilidade	Benchy	Testes práticos de impressão	Variação dentro de $\pm 0,2$ mm	GOMÉZ <i>et al.</i> , 2019; VOLPATO <i>et al.</i> , 2017.
	Overhang		Resolução até 45°	
	Torre de velocidade		Sem defeitos até 50 mm/s	
	Torre de fluxo		Escrita nítida e preenchimento uniforme até 100%	
	Torre de temperatura		Peça uniforme até 245°C	

Fonte: Autoral.

Para obter os valores e analisar os dados foram realizados ensaios de tração, nos quais se determinaram a tensão máxima e o módulo de elasticidade, bem como análises dinâmico-mecânicas (DMA), dedicada a obtenção do módulo de armazenamento e da temperatura de transição vítrea. Em seguida, examinou-se a reprodutibilidade do processo de impressão. Tal etapa consistiu na verificação da dispersão estatística dos valores médios de cada resposta, considerando a variação observada em lotes de peças fabricadas simultaneamente, isto é, amostras produzidas em conjuntos com os mesmos parâmetros de processamento, variando apenas a sua posição na plataforma de construção, para cada filamento (variando fornecedor) e tipo de ensaio.

Tabela 4 – Desempenho para os critérios das propriedades dos materiais

Critério	Referência	Desempenho muito baixo (0%)	Desempenho baixo (20%)	Desempenho médio (40%)	Bom desempenho (60%)	Alto desempenho (80%)	Desempenho máximo (100%)
$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	45 – 60	< 45	45 – 48,7	48,7 – 52,5	52,5 – 56,2	56,2 – 60	> 60
E (GPa)	1,6 – 2,1	< 1,6	1,6 – 1,72	1,72 – 1,85	1,85 – 1,97	1,97 – 2,1	> 2,1
E' (MPa)	800 – 1000	< 800	800 – 850	850 – 900	900 – 950	950 – 1000	> 1000
Tg (°C)	78 – 88	> 88	86 – 88	83 – 86	81 – 83	78 – 81	≤ 78
Reprodutibilidade (%)	5 – 20	> 20	15 – 20	10 – 15	7,5 – 10	5 – 7,5	≤ 5

Fonte: Autoral

No caso da tensão máxima, valores mais elevados foram considerados desejáveis por estarem diretamente associados à maior resistência mecânica do material, o que é particularmente relevante para aplicações estruturais. De forma análoga, o módulo de elasticidade e o módulo de armazenamento foram avaliados priorizando valores mais elevados, uma vez que refletem a rigidez do material e sua capacidade de manter desempenho mecânico sob solicitações estáticas e dinâmicas (NICOARA *et al.*, 2021).

De maneira similar, a temperatura de transição vítrea (Tg) mais elevada dos filamentos de PETG foi priorizada, uma vez que a mesma exerce influência direta na adesão e estabilidade entre as camadas da peça impressa, principalmente para impressoras de câmara aberta. Nesse contexto, torna-se preferível a utilização de materiais com Tg mais baixa para reduzir os efeitos negativos decorrentes da elevada troca térmica com o meio externo, que gera distorções na peça.

A avaliação da capacidade de impressão dos modelos de printabilidade foi classificada em termos percentuais de desempenho (0–100%), que mostra se a peça apresentou defeitos. No caso de o defeito ocorrer, o avaliador deveria identificar o nível paramétrico correspondente ao ponto de falha. É importante lembrar que os modelos de calibração consideravam, de modo geral, efeitos de temperatura, velocidade, fluxo, inclinação e fidelidade dimensional/geométrica. Peças sem defeitos apresentaram percentual de desempenho de 100%.

Essa abordagem permitiu converter os resultados experimentais das impressões em métricas comparáveis aos demais critérios de avaliação, garantindo

consistência metodológica. A Figura 20 apresenta um exemplo de como foi realizada a análise dos corpos de prova, utilizando como referência a peça do modelo de torre de velocidade, que foi dividida em faixas de desempenho conforme sua altura. Cada faixa foi associada a um nível percentual, permitindo a classificação visual dos resultados segundo o desempenho obtido em cada região da amostra. Quanto maior o nível de velocidade sem falhas, melhor o percentual de desempenho do material.

Figura 20 – Figura ilustrativa da separação dos níveis de desempenho.



Fonte: Autoral.

A Tabela 5 apresenta o sistema de avaliação adotado para os demais modelos.

Tabela 5 - Valores de pontuação para os modelos.

Critério	Desempenho					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Torre de Temperatura (225–245 °C)	< 225	225	230	235	240	245
Torre de Velocidade (15–90 mm/s)	15 - 40	50	60	70	80	90
Torre de Fluxo (80–120%)	80-90	95 – 100	105	110	115	120
Overhang (45°–15°)	45° e 40°	35°	30°	25°	20°	15°

Benchy 3D (Precisão Dimensional, % de acerto)	0 – 19%	20 – 39%	40 – 59%	60 – 79%	80 – 99%	100%
---	---------	----------	----------	----------	----------	------

Na avaliação da Torre de Temperatura (225–245 °C), materiais que falharam próximo a base da torre, em 225 °C se mostraram com baixa capacidade de impressão. Na temperatura de 245 °C (patamar mais alto) mostraram capacidade de 100%. As faixas intermediárias (225–230 °C, 230–235 °C, 235–240 °C e 240–245 °C) foram avaliadas também.

Na Torre de Velocidade (15–90 mm/s), a avaliação segue a mesma lógica anterior. Defeitos de impressões em 15 mm/s ganham 0 pontos, e em velocidades entre 75–90 mm/s recebem 10 pontos. As demais faixas crescem progressivamente em pontuação, variando de 2 a 8 pontos conforme o aumento da velocidade e a manutenção da qualidade da peça.

A Torre de Fluxo (80–120%) mede o desempenho em relação à taxa de extrusão. Fluxos entre 80–90% recebem 0 pontos, enquanto o patamar mais elevado de 120% atinge a pontuação máxima (10 pontos). As faixas intermediárias (95-100%, 105%, 110% e 115%) recebem entre 2, 4, 6 e 8 pontos respectivamente.

O critério de Overhang (45°–15°) avalia a capacidade da impressora de fabricar saliências sem suporte. Quanto menor o ângulo de sustentação sem falhas, maior a pontuação. Ângulos de 45° e 40° recebem 0 pontos, enquanto 15° (o mais crítico) garante a pontuação máxima de 10. Os ângulos de 35, 30, 25 e 20° tem nota de 2, 4, 6 e 8 respectivamente.

Por fim, o desempenho dimensional do modelo *Benchy* foi calculado a partir da razão entre o número de dimensões medidas que se mantiveram dentro da faixa de tolerância especificada e o número total de medições realizadas (total de 17 medidas). O resultado foi expresso em percentual, conforme a Equação 4 (NIETO *et al.*, 2021). Um percentual de precisão de apenas 0–19% resulta em 0 pontos, enquanto 100% de acerto assegura a nota máxima. As demais faixas são graduadas entre 2 e 8 pontos, proporcionalmente ao nível de precisão atingido.

$$Desempenho(\%) = \frac{N^{\circ} \text{ medições corretas}}{17} \times 100 \quad (4)$$

O Desempenho final foi calculado através da média de todos os critérios avaliados.

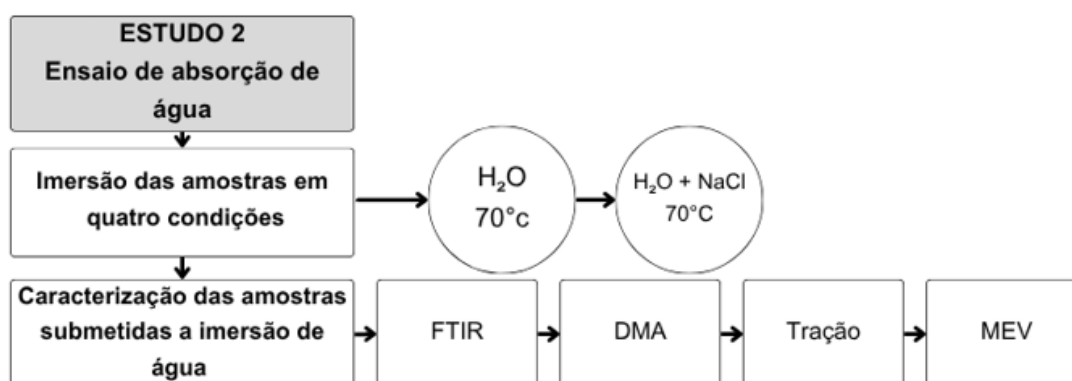
Posteriormente, foi avaliado um último critério, sendo uma análise relacionada ao custo-benefício das marcas. Foi obtido pelo desempenho final da marca dividido pelo seu custo, obtendo um valor numérico final que representou o custo-benefício de cada filamento.

$$\text{Custo benefício} = \text{Desempenho final} \div \text{Custo} \quad (5)$$

4.6 ESTUDO 2: ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA ACELERADO

A Figura 21 apresenta as condições do teste de absorção de água e as caracterizações realizadas nas amostras submetidas ao processo de degradação. As peças foram imersas em dois meios líquidos distintos: i) água destilada e ii) água destilada com adição de NaCl, ambos mantidos a 70°C.

Figura 21 – Esquema ilustrativo do Estudo 2.



Fonte: Autoral.

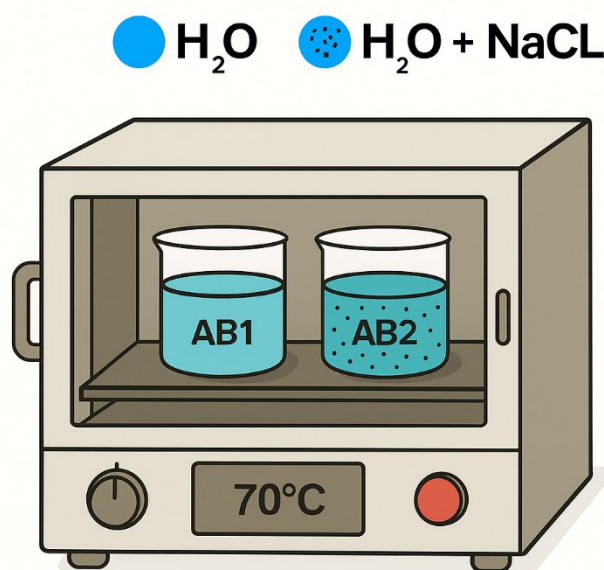
4.6.1 Procedimentos para o ensaio de absorção de água

Para a realização do ensaio de absorção de água, os corpos de prova foram impressos e, posteriormente, submetidos a um processo de secagem na estufa da marca Marconi® modelo MA030/12/2057/1 a 60 °C por 24 horas, a fim de eliminar umidade residual. Após a secagem, foram realizadas medições das dimensões (largura e espessura) com o paquímetro digital da marca Mitutoyo® com precisão de

0,02mm e da massa inicial de cada amostra, utilizando a balança analítica (modelo AD500, marca Marte) com precisão de 0,001g.

As amostras foram submersas nos meios líquidos armazenados em um Becker. Cada condição de ensaio foi denominada por códigos de AB1(água destilada) e AB2 (água com NaCl). Para a solução salina, preparou-se uma mistura contendo 7 gramas de NaCl dissolvidos em 200 mL de água destilada, correspondendo a uma concentração de 3,5% (similar à salinidade da água do mar). Posteriormente as amostras foram submersas nos respectivos meios (água destilada e solução salina) e os recipientes misturas foram colocados em estufa a 70°C. O esquema experimental encontra-se ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Esquema do teste de degradação em água.



Fonte: Autoral.

A análise consistiu em uma medição da massa da amostra diária sempre no mesmo horário, na balança analítica. O ensaio teve duração total de 10 semanas.

Para calcular a absorção de água foi utilizada a equação 5.

$$\text{Absorção de água (\%)} = \frac{(\text{Massa final} - \text{Massa inicial})}{\text{Massa inicial}} * 100 \quad (5)$$

4.7 ESTUDO 3: ENSAIO ACELERADO DE ENVELHECIMENTO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

O teste de envelhecimento por radiação UV foi realizado em uma câmara de envelhecimento (Figura 23) do Laboratório de Controle e Processos de Polimerização (LCP) na UFSC. O equipamento é composto por oito lâmpadas fluorescentes de mercúrio de baixa pressão de vapor (Philips, modelo CLEO Performance 80W-R), que emitem uma radiação ultravioleta na faixa de 310 a 400 nm (PHILIPS, 2006).

Figura 23 - Desenho ilustrativo da Câmara de envelhecimento.

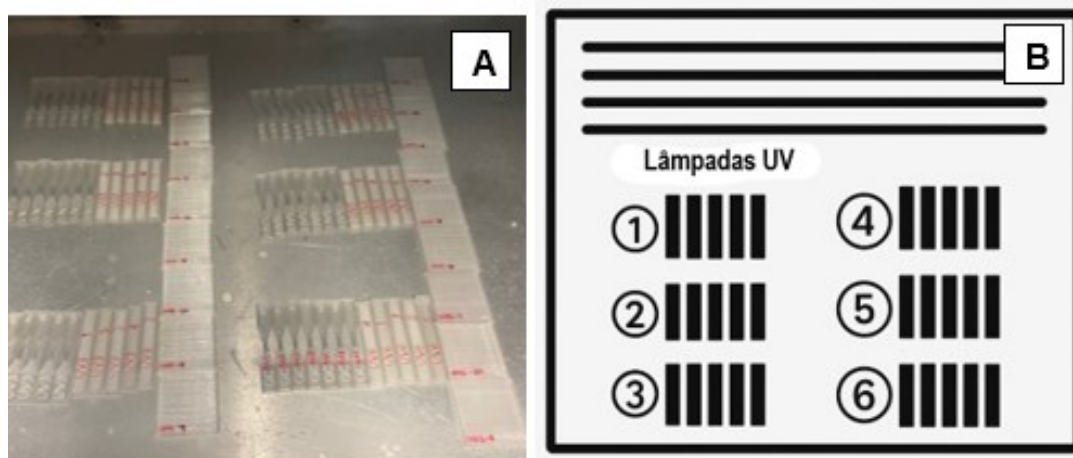


Fonte: Autoral

A câmara foi operada sem controle de temperatura ativa, porém, o calor gerado pela radiação das lâmpadas elevou a temperatura interna para aproximadamente 50° C. As amostras de PETG fabricadas por FFF foram distribuídas em grupos, cada um submetido a diferentes tempos de exposição: 100, 200, 400, 600, 800 e 1000 horas. Considerando que 200 horas de exposição equivalem a 1 ano de exposição em condições ambientais naturais, este estudo simulou, portanto, períodos equivalentes a meio ano até 5 anos de envelhecimento (AMZA *et al.*, 2021).

Todos os grupos foram adicionados simultaneamente na câmara para garantir uniformidade nas condições experimentais. A Figura 24 A apresenta a disposição das amostras no interior da câmara, enquanto a Figura 24 B ilustra o esquema de posicionamento adotado.

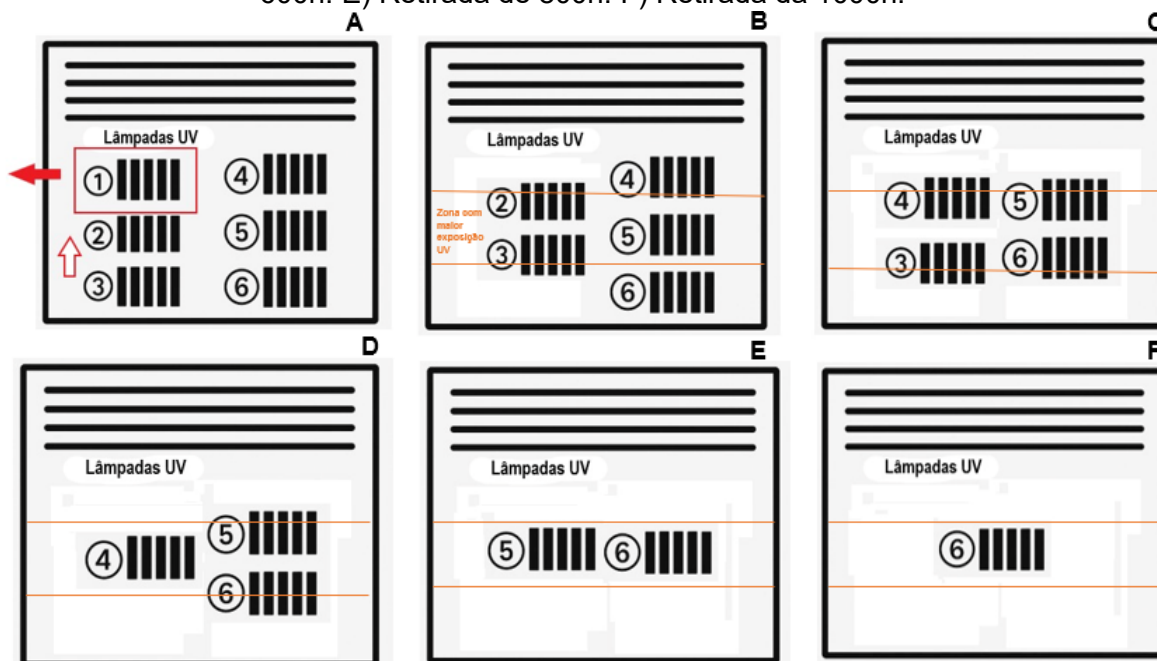
Figura 24 - A) Imagem ilustrativa das amostras dentro da câmara. B) Esquema ilustrativo da posição das peças dentro da câmara.



Fonte: Autoral

Como a posição na câmara influencia a intensidade da radiação recebida, foi realizado um remanejamento sistemático a cada retirada de corpos de prova, tentando sempre manter as amostras o mais centralizadas possível. A Figura 24 apresenta o esquema de reorganização dos grupos dentro da câmara ao longo do ensaio, onde as linhas horizontais laranja destacam a zona com maior intensidade de radiação.

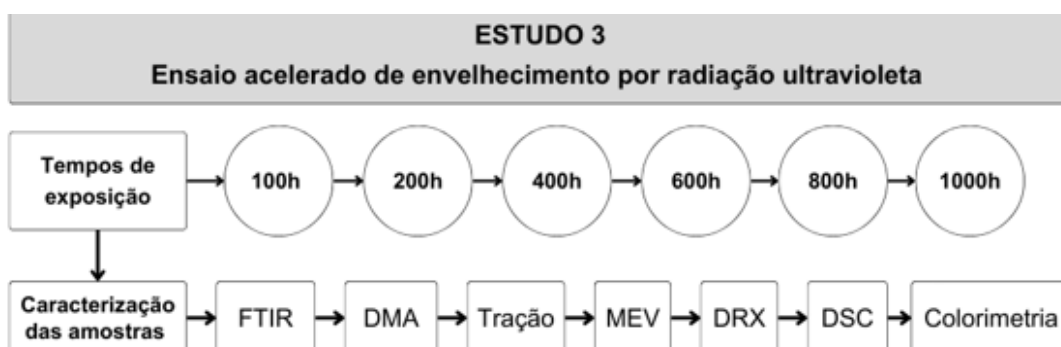
Figura 21 – Imagem ilustrativa do reposicionamento dos grupos dentro da câmara a cada retirada. A) Retirada de 100h. B) Retirada de 200h. C) Retirada de 400h. D) Retirada de 600h. E) Retirada de 800h. F) Retirada da 1000h.



Fonte: Autoral.

A Figura 25 apresenta o esquema ilustrativo do Estudo 3, destacando os tempos de exposição aos quais as amostras foram submetidas (100, 200, 400, 600, 800 e 1000 horas) e as caracterizações realizadas após o envelhecimento por radiação UV. As análises incluíram FTIR, DMA, ensaio mecânico de tração, MEV, DRX e colorimetria.

Figura 25 - Esquema ilustrativo do estudo 3.



Fonte: Autoral.

5 RESULTADOS

5.1 ESTUDO 1

O Estudo 1 engloba a análise de três marcas de filamento de PETG, incluindo a caracterização dos materiais e o estudo de printabilidade a partir da impressão de cinco modelos de teste.

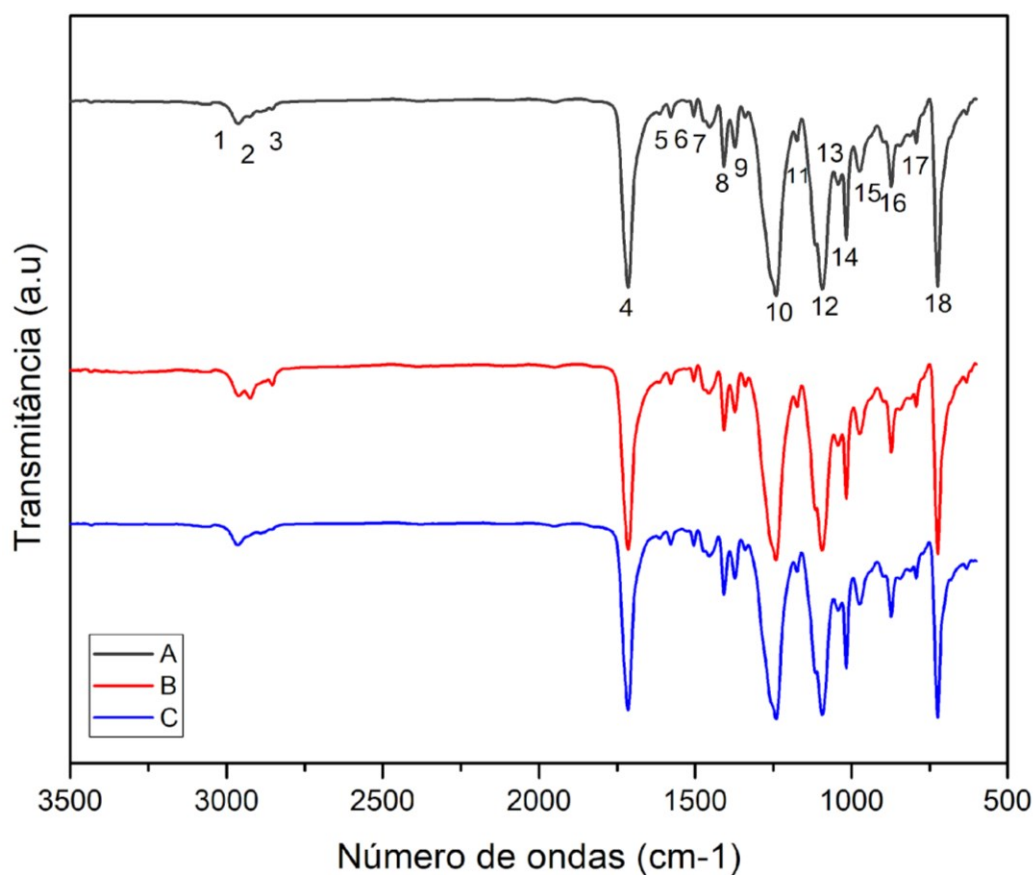
5.1.1 Caracterização dos filamentos

A caracterização dos filamentos dos fornecedores A, B e C foi realizada a partir dos ensaios de FTIR, mecânico por tração, reologia, TGA e DMA.

5.1.1.1 Análise de FTIR

A Figura 26 apresenta os espectros de FTIR dos filamentos de PETG, com identificação e atribuição das bandas correspondentes aos grupos funcionais característicos do material.

Figura 26 - FTIR dos filamentos dos três fornecedores.



Fonte: Autoral.

A Tabela 6 apresenta as principais bandas observadas no espectro de IR das amostras de PETG, bem como suas respectivas atribuições vibracionais, de acordo com a literatura.

Tabela 6 - Principais bandas características dos filamentos de PETG e suas respectivas atribuições.

Identificação	Número de Onda (cm ⁻¹)	Atribuição Vibracional	Fonte
1	2962	Estiramento do grupo – CH	(CASTRO, 2021)
2 e 3	2920; 2850	Estiramento do grupo metileno (-CH ₂ -)	(PERIM, 2018)
4	1712	Estiramento da ligação carbonila (C=O)	(CUTHBERTSON <i>et al.</i> , 2024)

5, 6, 7 e 8	1577; 1506; 1454 e 1406	Deformações do anel aromático e ligação metila/ metileno ($-\text{CH}_2-$), ($-\text{CH}_3$)	(AMZA <i>et al.</i> ,2024)
9	1373	Deformação simétrica de $-\text{CH}_3$; bandas de escorregamento C–H	(RIVATON, 2000)
10	1238	Estiramento assimétrico da ligação C–O–C	(AMZA <i>et al.</i> ,2024)
11	1174	Estiramento simétrico da ligação C–O–C	(PASZKIEWICZ <i>et al.</i> ,2017)
12, 13 e 14	1095; 1093; 1016	Estiramento C–O ou C–C–O	(PAVIA, 2015)
15	977	Vibração de cisalhamento dos grupos $=\text{C}-\text{H}$	(SILVERSTEIN, 2014))
16	871	Vibrações fora do plano de anéis aromáticos	(PAVIA, 2015)
17 e 18	792; 723	Balanço dos grupos $-\text{CH}_2$	(PAVIA,2015)

Todas as bandas identificadas nos espectros de IR dos filamentos analisados são características do PETG e indicam que não houve variações significativas na estrutura principal do polímero (AMZA *et al.*,2024). Observam-se bandas comuns a todos os filamentos. Por exemplo, a banda de absorção em 2966 cm^{-1} é atribuída ao estiramento $-\text{CH}$, conforme relatado por Castro (CASTRO, 2021). A banda em 1712 cm^{-1} é atribuída ao estiramento da ligação carbonila ($\text{C}=\text{O}$), indicando a presença dos grupos éster na cadeia polimérica. Já as bandas em 1454 e 1406 cm^{-1} estão associadas às deformações de grupos metila ($-\text{CH}_3$) e metileno ($-\text{CH}_2-$) da cadeia principal do polímero (AMZA *et al.*,2024). Já as bandas em 1238 , 1095 e 1016 cm^{-1} são atribuídas, respectivamente, ao estiramento assimétrico da ligação C–O–C (ROSTAMPOUR *et al.*,2024), ao estiramento C–O ou C–C–O, geralmente associado a estruturas de éteres ou cadeias alifáticas oxigenadas e estiramentos das ligações C–O (PAVIA *et al.*,2015).

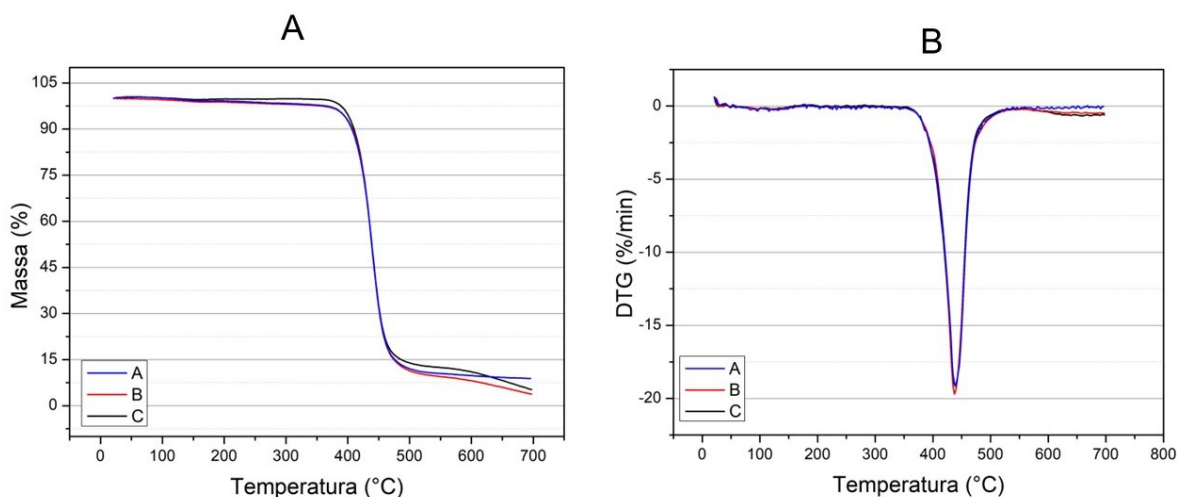
As bandas em 956 , 871 e 723 cm^{-1} são relacionadas, nesta ordem, à vibração de cisalhamento dos grupos $=\text{C}-\text{H}$ (SILVERSTEIN, 2014); vibrações fora do plano de anéis aromáticos substituídos e vibração dos grupos $-\text{CH}_2$ presentes nos segmentos de etileno da cadeia (PAVIA, 2015). Por fim, a banda em 628 cm^{-1} está relacionada às deformações fora do plano dos grupos C–H do anel aromático tereftálico, confirmando a estrutura característica do PETG (BEDI, 2023; PASZKIEWICZ, 2017).

5.1.1.2 TGA

A Figura 27 apresenta as curvas de análise termogravimétrica (TGA) dos filamentos de PETG das marcas A, B e C.

Figura 27 - Curvas de TGA e de DTG dos filamentos das marcas A, B e C.

A) Variação de massa em função da temperatura. B) Derivada termogravimétrica (DTG).



Fonte: Autoral

Observa-se que os três filamentos apresentam comportamento térmico semelhante. Inicialmente, há uma região de estabilidade térmica, sem perda significativa de massa até aproximadamente 380 °C. A partir dessa temperatura, ocorre a primeira etapa de degradação, caracterizada por uma rápida redução da massa, atingindo praticamente a totalidade da perda até cerca de 480 °C. Essa etapa está associada à quebra das ligações éster, característica dos poliésteres (KUNKEL *et al.*, 2020). A segunda etapa, menos pronunciada, ocorre acima de 490°C e pode estar relacionada à decomposição de aditivos incorporados aos filamentos, resíduos carbonáceos ou subprodutos da degradação, que necessitam de maior energia térmica para decompor completamente (CAVALCANTE, 2022). As curvas de DTG reforçam esse comportamento, apresentando picos de degradação bem definidos próximos a 440 °C, sendo a temperatura de máxima taxa de degradação térmica.

A Tabela 7 apresenta uma comparação da temperatura inicial de degradação (T_i), temperatura final (T_f), perda de massa (P_m) e massa residual (Resíduo) referentes à primeira etapa de degradação térmica de cada filamento analisado.

Tabela 7 - Valores do processo de degradação térmica, obtidos através das curvas TGA, para as três marcas de PETG.

MARCA	Ti (°C)	Tf (°C)	Pm (%)	Resíduo (%)
A	380	480	93	7
B	380	480	97	3
C	380	480	95	5

*Ti é a temperatura inicial, Tf é a temperatura final e Pm é a perda de massa.

Os valores de resíduo obtidos para os filamentos de PETG analisados variaram entre 3 % e 7 %, sendo 7 % para a marca A, 3 % para a marca B e 5 % para a marca C.

Segunda a literatura, a degradação térmica do PETG inicia próximo a 380°C (SANTANA, 2018) e a temperatura do final da decomposição ocorre em aproximadamente 490°C (ANTOLIN *et al.*, 2023). O material pode apresentar resíduos que variam de valores próximos de 0,1 %, até cerca de 13 %, esse valor depender da composição do copolímero e da presença de aditivos ou cargas (PASZKIEWICZ *et al.*, 2017).

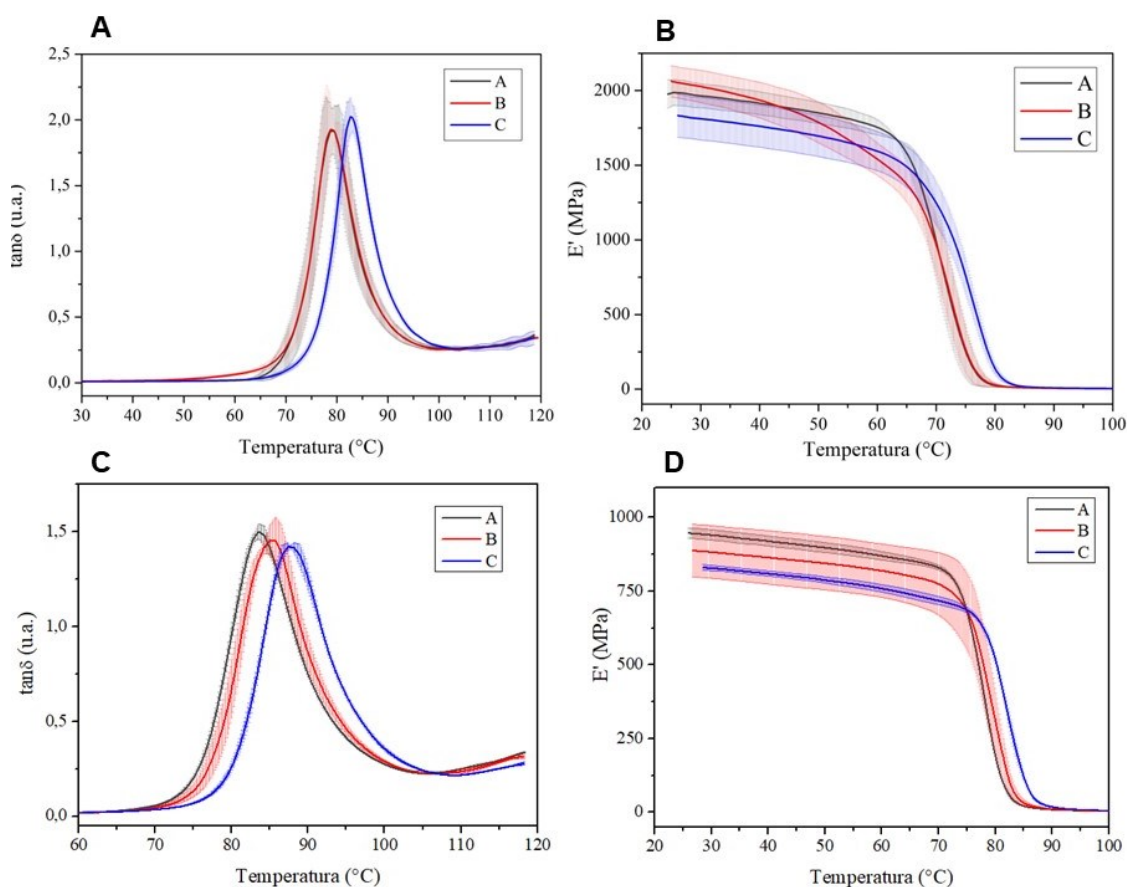
Os resultados obtidos confirmam que todos os filamentos analisados se encontram dentro dessa faixa, apresentando comportamento térmico compatível com o esperado para o material. Pequenas diferenças entre as marcas podem estar associadas a variações na formulação, como aditivos ou cargas, mas, de modo geral, os materiais apresentam estabilidade térmica semelhante, compatível com a faixa esperada para o PETG.

5.1.1.3 DMA

As análises de DMA foram realizadas tanto nos filamentos quanto nos corpos de prova impressos dos três fornecedores avaliados, permitindo comparar o efeito do processamento por FFF nas propriedades viscoelásticas do PETG.

A Figura 28 apresenta as curvas do módulo de armazenamento (E') e da tangente de perda ($\tan \delta$) em função da temperatura dos filamentos de PETG analisados. A Figura 28 A e B refere-se às análises realizadas diretamente em segmentos de filamento das três marcas, enquanto a Figura 28 C e D correspondem às análises realizadas em corpos de prova impressos a partir desses filamentos.

Figura 28 – Resultado das análises de DMA dos filamentos e dos corpos de prova impressos. A) Tan δ do filamento. B) E' do filamento. C) Tan δ da peça impressa. D) E' da peça impressa.



Fonte: Autoral.

A partir dos gráficos apresentados (Figura 28) é possível determinar a temperatura de transição vítrea (T_g) de cada filamento de PETG, bem como o valor do módulo de armazenamento (E') ao longo do aquecimento.

A T_g foi obtida a partir do pico máximo da curva de Tan δ , que representa a transição em que há maior mobilidade das cadeias poliméricas. Já a curva de E' em função da temperatura foi utilizada para acompanhar a variação da rigidez do material desde a temperatura ambiente até 110°C. Em temperaturas menores que a temperatura de transição vítrea do material, são observados valores elevados de E' que indicam maior rigidez (região vítrea), enquanto a queda acentuada próxima à T_g reflete a transição para um estado mais flexível.

Essas análises são importantes para compreender o desempenho mecânico dos filamentos, especialmente em aplicações que demandam resistência e

estabilidade dimensional, a T_g e o módulo de armazenamento estão ligados a rigidez, adesão entre camadas e estabilidade dimensional durante a deposição de material, desta forma, esses valores são importantes para alinhar os melhores parâmetros de impressão e alinhar o melhor material com as condições do impressora 3D com o objetivo de obter uma peça com melhor printabilidade. Os resultados obtidos para T_g e E' máximo estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de T_g e E' máximo para as marcas A, B e C.

MARCA	Filamento		Peça impressa	
	TG (°C)	E' máximo (MPa)	TG (°C)	E' máximo (MPa)
A	82 ± 0,9	1979 ± 66,1	84 ± 0,3	946 ± 15,0
B	82 ± 0,9	2059 ± 78,5	85,5 ± 0,6	886 ± 73,1
C	85 ± 0,5	1831 ± 113,8	88 ± 0,4	829 ± 8,4

Na caracterização dos filamentos, as temperaturas de transição vítrea (T_g) obtidas para os filamentos A e B foram semelhantes, em torno de 82°C, apresentando desvios padrão próximos. O filamento C apresentou T_g ligeiramente superior, de aproximadamente 85°C.

Para as amostras impressas, verificou-se um aumento nos valores de T_g em relação aos filamentos, atingindo 84 °C, 85,5 °C e 88°C para as marcas A, B e C, respectivamente. Todos os valores obtidos encontram-se dentro da faixa típica para o PETG, reportada na literatura entre 78°C e 88°C (NIETO *et al.*, 2021).

A avaliação dos dados obtidos nas análises de DMA podem seguir dois caminhos: printabilidade e a peça no ambiente de aplicação. Como as peças foram fabricadas em uma impressora com câmera aberta, é mais indicado selecionar o material com menor T_g , para esse critério a marca A e B seriam mais indicadas e a marca C a menos indicada. Entretanto, se olharmos para a T_g do ponto de vista de aplicação de material, a escolha seria diferente, uma T_g mais alta e com menor dispersão favorece a resistência térmica em serviço (SHANMUGAM *et al.*, 2024), sendo mais recomendada para este caso, a marca C.

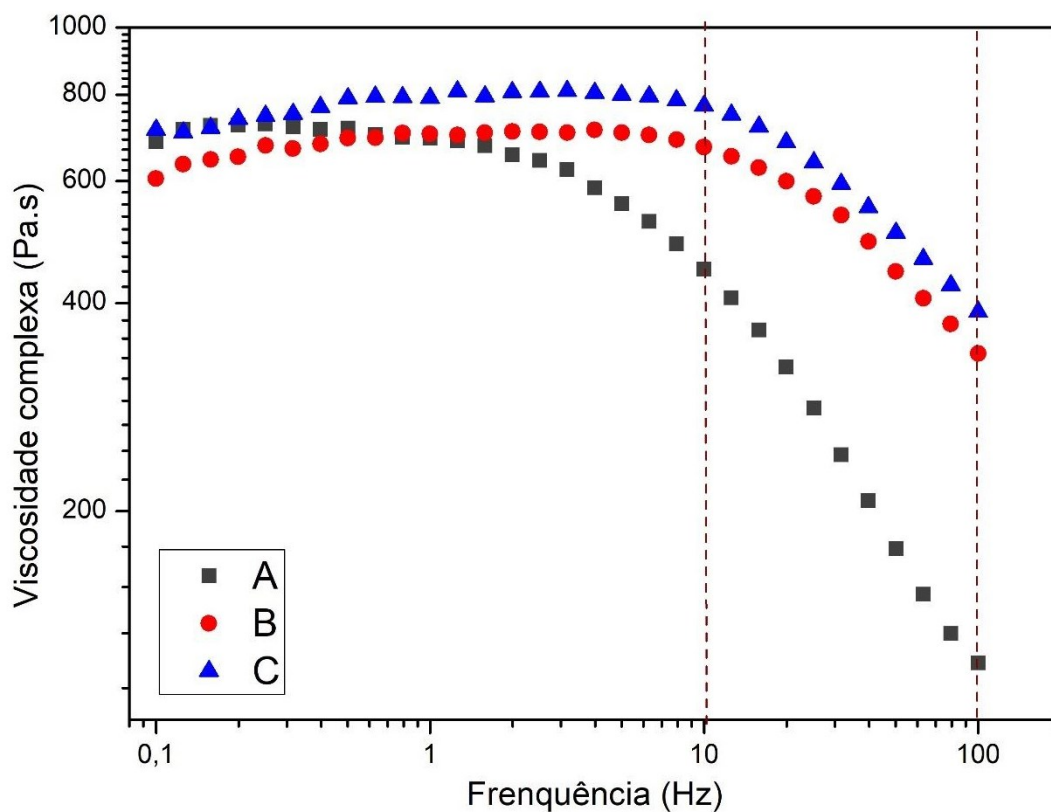
O material A mostrou maior E' máximo da peça impressa, sendo o melhor material para aplicação em relação a resistência mecânica. Além disso apresentou baixa dispersão dos resultados, mostrando boa reprodutibilidade.

Segundo os dados obtidos no ensaio de DMA as marcas mais indicadas seriam a A e C.

5.1.1.4 Reologia

A Figura 29 apresenta a variação da viscosidade complexa (η^*) em função da frequência para os três fornecedores.

Figura 29 - Viscosidade das marcas A, B e C.



Fonte: Autoral

Observa-se que os três filamentos apresentam comportamento típico de materiais pseudoplásticos, evidenciado pela redução da viscosidade complexa com o aumento da frequência. Na análise, considerou-se a faixa de frequências de 10 a 100 Hz, na escala Log, que corresponde aproximadamente à região de taxas de cisalhamento experimentadas pelo material durante o processo de extrusão em

Impressão 3D (GOMES, 2015). De acordo com a literatura, a viscosidade complexa típica do PETG para essa faixa de taxa de cisalhamento deve situar-se entre 300 a 800 Pa.s (GIBSON *et al.*, 2015). Embora o ensaio de reologia oscilatória utilize uma faixa de frequência e geometria diferentes das condições reais de extrusão no processo de FFF, ele permite avaliar o comportamento viscoelástico intrínseco do polímero e compará-lo entre os diferentes filamentos.

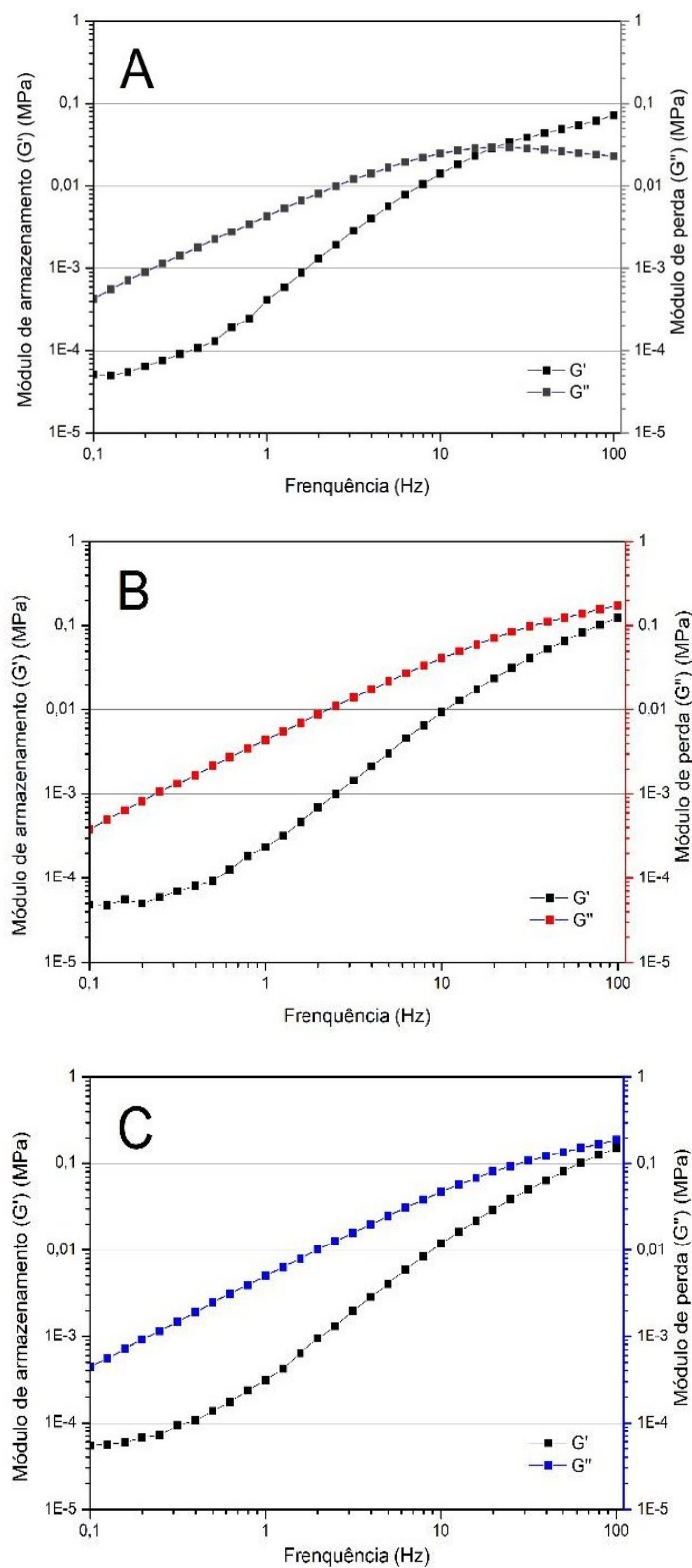
Nota-se que os filamentos das marcas B e C apresentam comportamento muito semelhante, exibindo viscosidades mais elevadas do que o filamento da marca A. Maior viscosidade implica em maior resistência ao fluxo, resultando em menor fluidez do material em seu estado semilíquido. Essa viscosidade elevada faz com que o material apresente uma impressão com menor ocorrência de *stringings*, além disso, segundo Gibson *et al.*, (2015) materiais com viscosidade elevada tendem a apresentar maior resistência ao cisalhamento, o que prejudica a capacidade de processamento na Impressão 3D por FFF.

A viscosidade cerca de 800Pa.s é considerada alta para o PETG, e compromete o fluxo contínuo do filamento fundido, aumentando a probabilidade de entupimento no bico ou interrupções no processo de impressão. A eficiência de coalescência entre filamentos, essencial para a integridade mecânica e visual da peça final, também é negativamente afetada por viscosidades elevadas (SUN *et al.*, 2018).

O filamento da marca A apresenta uma queda mais acentuada na viscosidade complexa dentro da faixa de frequência analisada. Essa menor viscosidade sob altas taxas de cisalhamento facilita o fluxo do material no bico de impressão, no entanto quando o material apresenta viscosidade muito baixa pode comprometer a estabilidade dimensional da peça durante a deposição, resultando em deformações ou colapsos em regiões com saliências (SIACOR, 2021). No entanto, a menor viscosidade permite preencher bem os contornos da peça, promovendo melhor definição geométrica e uma melhor adesão entre camadas (GOMES, 2015).

A análise do filamento da marca A (Figura 30) revela um comportamento viscoelástico típico com um ponto de cruzamento entre G' e G'' em altas frequências. Em baixas frequências, observa-se $G'' > G'$, indicando um comportamento predominantemente viscoso. À medida que a frequência aumenta, G' ultrapassa G'' , sugerindo uma transição para um comportamento pseudo-sólido (TATINI *et al.*, 2022).

Figura 30 - Módulo de armazenamento e perda por frequência. A) Marca A. B) Marca B. C) Marca C.



Fonte: Autoral

O ponto de cruzamento entre G' e G'' indica a frequência na qual o material passa de um comportamento predominantemente líquido para um comportamento pseudo-sólido. Em processos de impressão 3D, essa transição é crucial para entender como o material se comportará durante o processo de extrusão e após a deposição. Em baixas frequências, onde G'' é dominante, o material apresenta maior fluidez, facilitando a extrusão através do bico da impressora, mas pode comprometer a estabilidade dimensional da peça, principalmente em estruturas complexas ou com saliências. À medida que a frequência aumenta e G' se torna dominante, o material adquire maior rigidez, o que é benéfico para manter a forma da peça após a deposição (TATINI *et al.*, 2022). Entretanto, essa maior rigidez pode comprometer o fluxo contínuo do filamento fundido, aumentando a probabilidade de entupimento no bico ou interrupções no processo de impressão (SUN, 2018).

Segundo Siacor *et al.*, (2021) a combinação adequada de propriedades viscoelásticas é crucial para a qualidade da impressão 3D, materiais com perfil viscoelástico predominantemente sólido tendem a apresentar melhor adesão entre camadas e maior integridade estrutural.

Na análise reológica dos filamentos B e C, observa-se que ambos os módulos, G' e G'' , aumentam com a frequência; entretanto G'' permanece superior a G' em toda a faixa analisada, não ocorrendo cruzamento entre as curvas como identificado na curva da marca A. Esse comportamento indica que esses materiais mantêm um carácter viscoelástico e predominantemente viscoso, mesmo sob altas frequências.

Na prática, essa predominância da componente viscosa sugere que os filamentos B e C apresentam maior fluidez durante a extrusão, mas menor capacidade de manter a forma após a deposição, o que pode resultar em instabilidades dimensionais e maior dependência de parâmetros de resfriamento para garantir qualidade superficial e adesão entre camadas. Esse perfil pode aumentar a probabilidade de defeitos, como *stringing* e colapsos em geometrias com ângulos pronunciados.

Segundo Goyanes *et al.*, (2015) materiais com $G'' > G'$ tendem a apresentar maior fluidez e menor retenção de forma durante a impressão por extrusão, o que exige ajustes nos parâmetros para evitar deformações. Segundo Sauer *et al.*, (2021) a predominância da componente viscosa é característica de sistemas que necessitam de maior tempo de cura ou solidificação pós-extrusão.

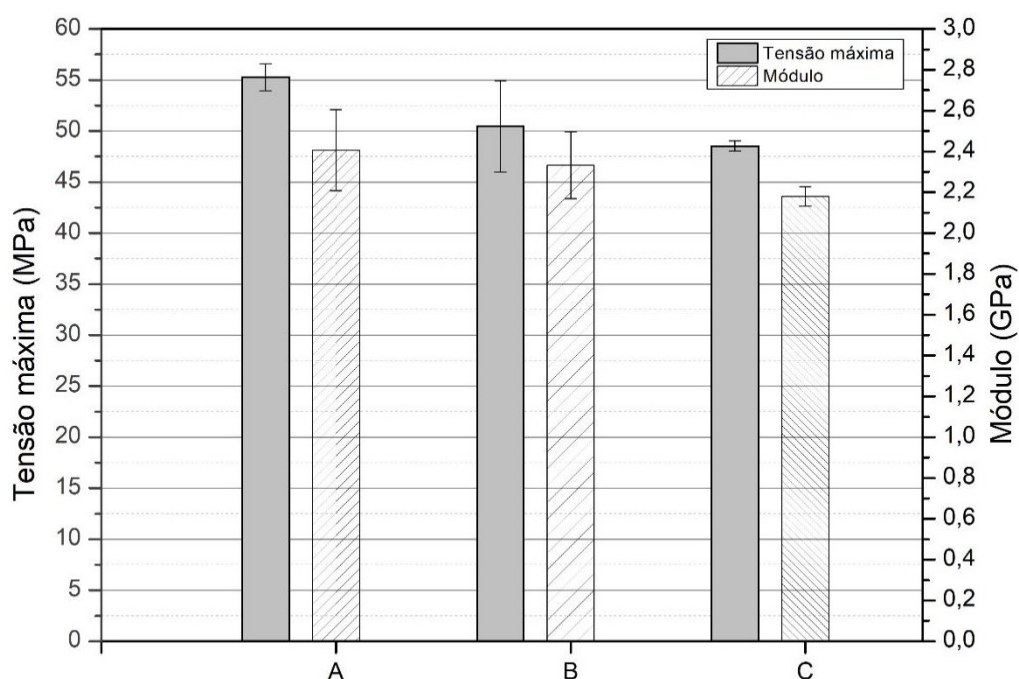
A análise conjunta dos gráficos de viscosidade complexa e dos módulos viscoelásticos (G' e G'') indica que o filamento da marca A apresenta um comportamento mais adequado para manufatura aditiva. Inicialmente, o material apresenta comportamento predominantemente viscoso indicando alta fluidez durante o processo de extrusão e em frequências elevadas (10 e 100 Hz) o material muda seu comportamento e passa a ser predominantemente pseudo-sólido. Essa transição é vantajosa no contexto da manufatura aditiva porque permite que o material flua facilmente ao ser extrudado e em seguida adquira a rigidez suficiente para manter a forma após ser depositado, contribuindo para um melhor acabamento superficial (SAUER *et al.*, 2021).

A viscosidade é uma propriedade essencial no processo de extrusão, influenciando diretamente a fluidez do material, a adesão entre camadas e a qualidade final da peça impressa. Materiais com viscosidade elevada podem dificultar a extrusão, enquanto aqueles com viscosidade muito baixa podem comprometer a estabilidade dimensional e a resolução da impressão (GOYANES *et al.*, 2015). Dessa forma, o estudo da reologia permite prever o comportamento de cada filamento durante a impressão, auxiliando na escolha do material mais adequado para aplicações específicas e garantindo maior controle sobre o processo de fabricação de extrusão.

5.1.1.5 Ensaio Mecânico de tração

Os valores de tensão máxima e módulo de elasticidade obtidos a partir do ensaio de tração para os três fornecedores de PETG estão apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Valores da tensão máxima e módulo das três marcas de PETG.



Fonte: Autoral

A Tabela 9 apresenta os valores médios de tensão máxima e módulo de elasticidade para os filamentos dos fornecedores A, B e C.

Tabela 9 – Valores das marcas A, B e C obtidos no teste de tração.

Fornecedor	Tensão Máxima	Módulo de elasticidade
A	55 MPa ± 1,34	2,4 GPa ± 0,41
B	50 MPa ± 4,47	2,3 GPa ± 0,30
C	48 MPa ± 0,49	2,2 GPa ± 0,23

Os valores de tensão máxima (MPa) representam a resistência do material até início da zona plástica enquanto o módulo de elasticidade (GPa) indica a rigidez do material e sua capacidade de deformação elástica antes do escoamento. Entre os três filamentos, a amostra A apresentou a maior tensão máxima, indicando melhor desempenho mecânico à tração. A amostra C exibiu a menor resistência, com valor médio de aproximadamente 48 MPa, e foi o material que apresentou menor desvio padrão entre todos. O filamento do fornecedor B apresentou capacidade de

Quanto ao módulo de elasticidade, os valores obtidos para os três fornecedores foram semelhantes, sem diferenças estatisticamente significativas. A sobreposição dos intervalos de confiança sugere que, independentemente da marca, a rigidez do material permanece próxima. Quando comparados à literatura, que reporta valores típicos para PETG entre 45–60 MPa para tensão máxima e módulo na faixa de 2,0–2,4 GPa, os resultados obtidos encontram-se dentro do esperado (AARON *et al.*, 2021).

5.1.2.1 Avaliação do Benchy

Figura 32 - Benchy impresso em PETG com três fornecedores diferentes.



As peças produzidas com os filamentos de PETG de diferentes fornecedores foram avaliadas com base nos critérios especificados na etapa de metodologia. Primeiro foi avaliado aspectos de acabamento de impressão, posteriormente foi realizado as medidas de massa e dimensional. As medições dimensionais foram realizadas com paquímetro e seus valores estão ilustrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores da medição do Benchy.

Local de medição	Marca A	Marca B	Marca C	Valor de referência
Telhado	22,9	22,8	22,8	23
Chaminé	11 $\varnothing 3 / \varnothing 7$	11 $\varnothing 3 / \varnothing 7$	11 $\varnothing 3 / \varnothing 7$	11 $\varnothing 3 / \varnothing 7$
Comprimento Benchy	60,8	60,7	60,5	60
Largura Benchy	30,3	30,9	30,8	31
Altura do convés barco	48 / 15,3	47,8 / 15,5	48 / 15,4	48 / 15,5
Entrada do barco traseira	7/9/8/ 10,81/12	7/9/8/ 10,81/12	7/9/8/ 10,81/12	7 / 9 / 8 / 10,81 / 12
Janela redonda dianteira	0,30	0,30	0,30	0,30
Janela quadrada dianteira	10,5/ 9	10,4/ 8,9	10,4/ 9	10,5 / 9

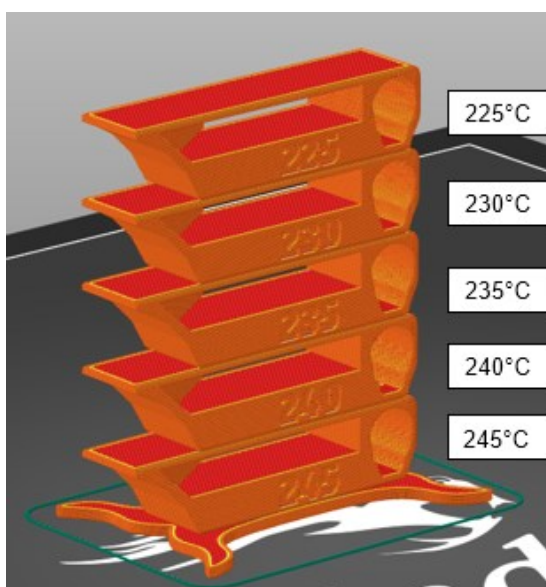
Para todos os filamentos de PETG analisados, o acabamento do casco foi uniforme, mesmo em superfícies curvas. A simetria do objeto foi mantida, sem distorções perceptíveis ao ser analisada sob diferentes ângulos. As superfícies horizontais planas e formas cilíndricas, como o convés, caixa e chaminé, apresentavam bom acabamento na superfície. Foram avaliadas as superfícies de inclinadas e orifícios pequenos inclinados, incluindo locais de difícil acesso, como por exemplo, a janela traseira e o suporte da barra de pesca (pequeno furo localizado na traseira do barco).

De forma geral, todas as medidas ficaram dentro do valor referência, obtendo bom desempenho, sugerindo, portanto, que todos os filamentos de PETG comerciais testados atenderam aos requisitos de qualidade do Benchy.

5.1.2.2 Avaliação da torre de temperatura

A torre de temperatura é um teste de impressão no qual há uma variação de temperatura na impressão de cada andar da peça projetada. Esse conceito pode ser compreendido na Figura 33, onde está ilustrado a torre de temperatura com a indicação das suas respectivas temperaturas por estágios da peça. A impressão ocorreu na faixa de temperatura de 225°C a 245°C, onde cada novo andar teve o aumento de 5°C.

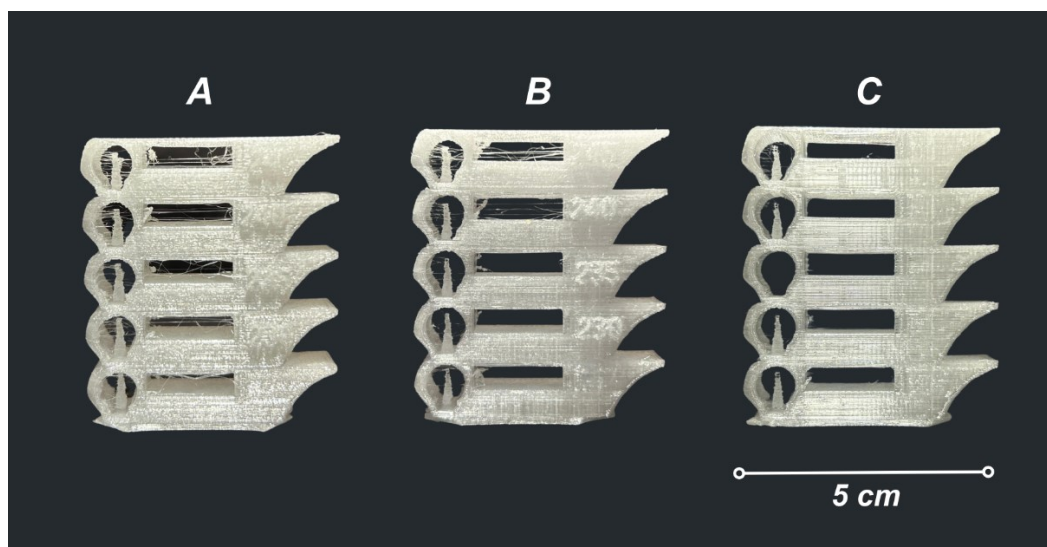
Figura 33 – Ilustração da Torre de temperatura com seus respectivos valores.



Fonte: Autoral

A Figura 34 apresenta as torres de temperatura impressas com os filamentos de PETG do material do Fornecedor A, B e C.

Figura 34 - Torre de temperatura impresso em PETG com três fornecedores diferentes.



Fonte: Autoral.

Observa-se que, de modo geral, as peças não apresentaram defeitos aparentes com a variação de temperatura. No entanto, na maior temperatura de teste (245°C), todas as amostras exibiram uma leve ocorrência de *stringings*. O *stringings* é um efeito inerente ao material, relacionado à sua viscosidade e temperatura de extrusão. Essa redução da viscosidade prolonga o tempo necessário para que o filamento recupere sua forma original, retardando sua solidificação. Como consequência, pequenas quantidades de material podem ser arrastadas pelo movimento do bico extrusor, formando camadas com imperfeições ao longo da peça (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

As faixas de temperaturas de extrusão recomendadas¹ pelos fornecedores são de 220°C a 250°C para os fornecedores A e B, e de 230°C a 260°C para o fornecedor C. Portanto, nenhum dos filamentos deveria apresentar *stringings* perceptível em 245°C, mesmo que a ocorrência tendo sido mínima. Esse efeito pode ocorrer quando a velocidade de impressão está acima do valor recomendado para um determinado material, no entanto as peças foram impressas a 50mm/s, sendo uma velocidade adequada para o PETG (SILVA *et al.*, 2023), indicando que a causa do defeito não está relacionada à velocidade de impressão.

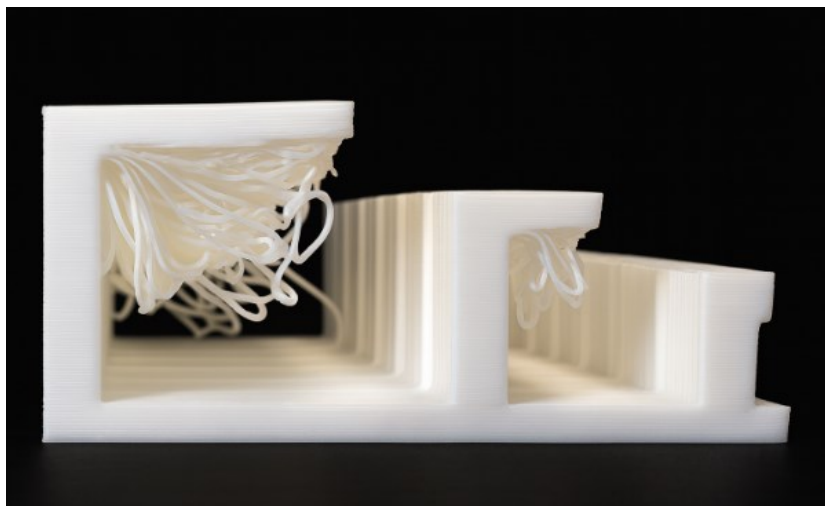
¹ todas informações dos filamentos então indicadas na tabela 2 na metodologia

Embora não seja classificado como um defeito, esse fenômeno confere um aspecto indesejado na peça, podendo ser corrigido posteriormente por meio de acabamento. Embora o fornecedor C tenha indicado que a temperatura máxima de impressão seja de 260°C, o mesmo apresentou *stringings* a temperatura de teste (245°C). Isso sugere menor estabilidade térmica comparada com a temperatura indicada, sendo 15°C de diferença, os demais filamentos tiveram janela de 5°C da sua recomendação. Dessa forma o filamento da marca C se torna o menos indicado entre as três marcas segundo o teste de torre de temperatura.

5.1.2.3 Avaliação do Overhang

Um exemplo de deformação de overhang pode ser observado na Figura 35. Esse defeito ocorre porque as regiões em que formam os *overhangs* não possuem suporte suficiente na camada anterior para garantir a deposição correta do material (SRIVASTAVA *et al.*, 2024). Como resultado, o filamento extrudado tende a ceder ou envergar devido à gravidade e à falta de ancoragem, especialmente se a velocidade de impressão for alta ou a refrigeração inadequada. Esse tipo de defeito é comum em geometrias com saliências acentuadas, sendo mais pronunciado quanto maior o ângulo em relação à vertical (VOLPATO, 2017).

Figura 35 – Ilustração que mostra o defeito de overhang.



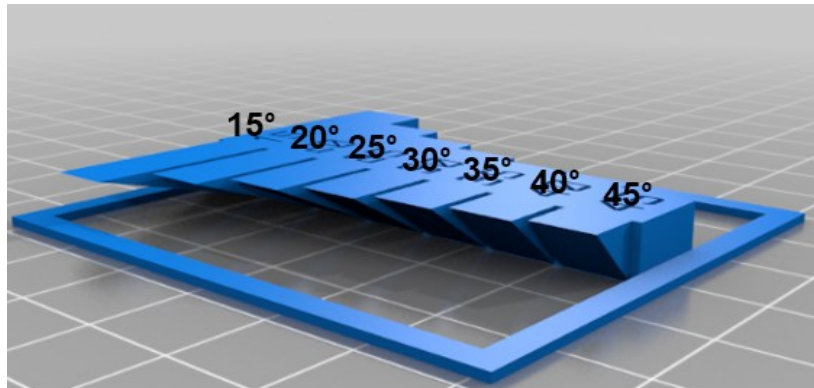
Fonte: 3D LAB (2025).

É possível realizar a impressão de peças com um ângulo inferior a 45° de inclinação sem suporte, porém se a viscosidade do material ou temperatura não

estiver adequada pode ocorrer defeitos, mesmo tendo um ângulo dentro do limite permitido.

A Figura 36 mostra o esquema ilustrativo da peça que foi utilizada para o teste do *overhang*, onde foi feito o estudo da variação do ângulo de 15° a 45°, tendo aumento de 5° ao longo da peça impressa.

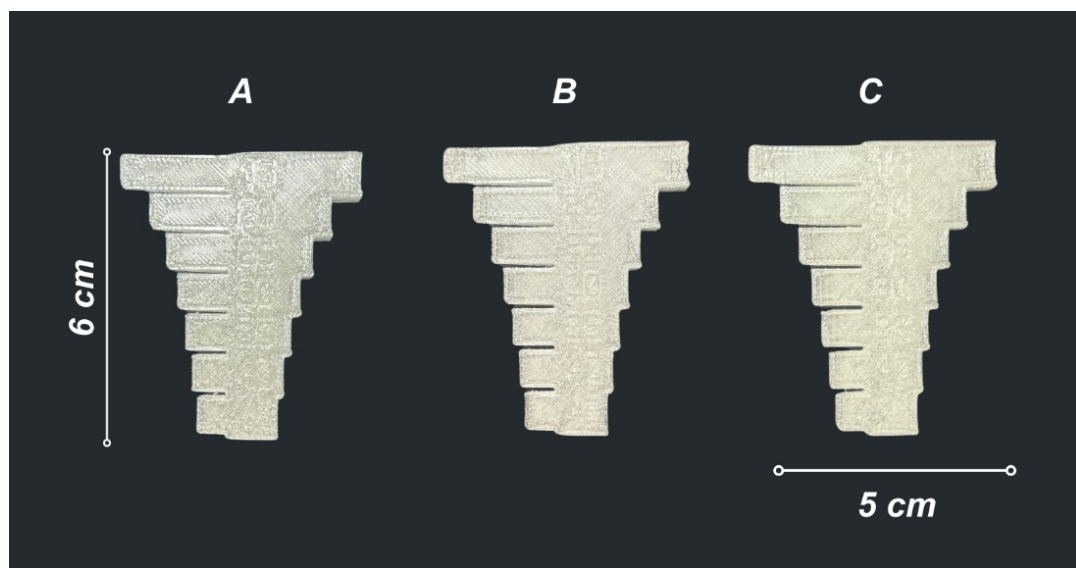
Figura 36 - Esquema ilustrativo do overhang com os ângulos.



Fonte: Adaptado de THINGVERSE (2025).

A Figura 37 mostra as peças de *overhang* impressas com os filamentos de PETG fornecidos pela marca A, B e C.

Figura 37 – Overhang da marca A, B e C visto de cima.



Fonte: Autoral

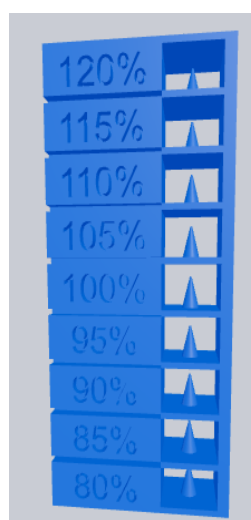
As amostras não apresentaram nenhum defeito visual relevante, como queda de camadas, empenamento ou falta de aderência entre as camadas, mesmo nas regiões com maior grau de *overhang*. Esse desempenho indica que os parâmetros de impressão estão configurados adequadamente e que os três materiais apresentam propriedades térmicas e mecânicas boas. O PETG possui boa adesão entre camadas e menor tendência a contrações térmicas, por isso é um material que apresenta bom comportamento em geometrias com ângulos moderados, sem a necessidade de suportes até certos ângulos críticos (até 45°) (KRAWULSKI *et al.*, 2024). Desta forma, os resultados indicaram que, para os ângulos testados, o PETG apresentou comportamento estável e boa qualidade superficial para as três marcas estudadas.

5.1.2.4 Avaliação do multiplicador de extrusão

O objetivo do teste do multiplicador de extrusão foi avaliar a quantidade de material extrudado em diferentes quantidades, de forma a garantir a fabricação de peças com qualidade de impressão e precisão dimensional. Para isso, foram comparadas torres de calibração produzidas com os filamentos dos fornecedores A, B e C.

A Figura 38 mostra o esquema ilustrativo da peça que foi utilizada para o teste de multiplicador de extrusão, onde foi feito a variação do multiplicador de extrusão de 80% até 120%, tendo um aumento de 5% a cada bloco de altura ao longo da peça.

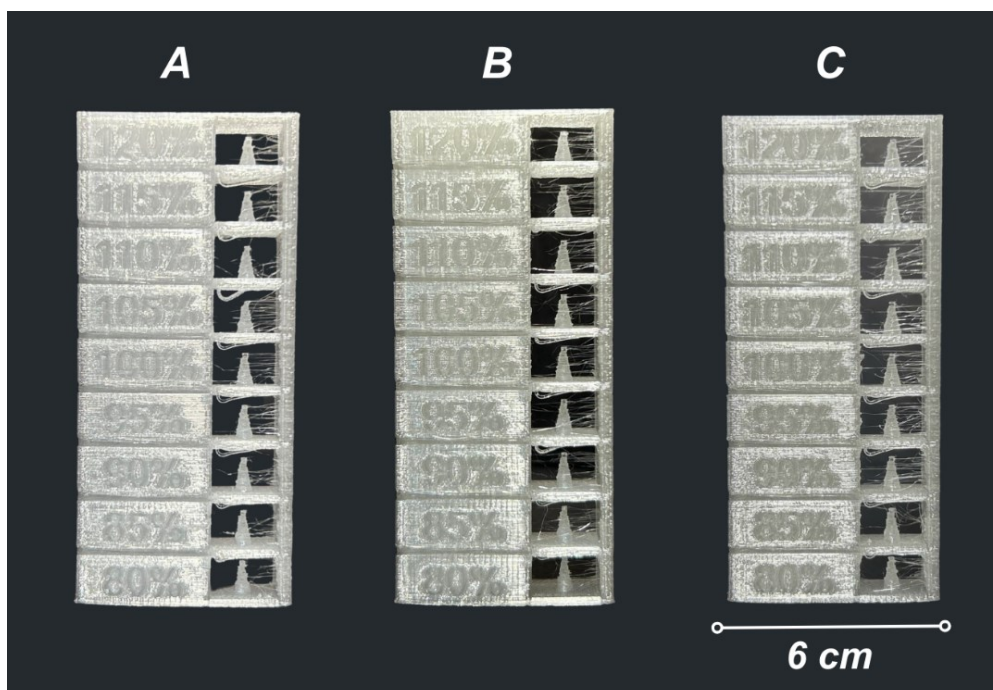
Figura 38 – Imagem ilustrativa da torre do multiplicador de extrusão.



Fonte: Autoral.

As peças impressas a partir do filamento de PETG fornecido pela marca A, B e C estão ilustradas na Figura 39.

Figura 39 – Torre de multiplicador de extrusão impresso em PETG com três fornecedores diferentes.



Fonte: Autoral

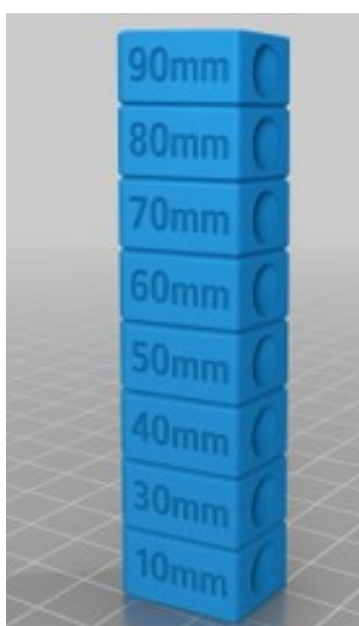
Observou-se uma diferença visual entre as peças, especialmente na região em que estão os números escritos nas torres. A peça impressa com o filamento do fornecedor C apresentou menor nitidez na escrita antes do multiplicador de extrusão de 100%, com contornos mais suavizados e menos definidos em comparação aos filamentos dos fornecedores A e B. Já o material A e B se mostraram estáveis na peça inteira.

Essa falha pode estar relacionada à instabilidade na taxa de fluxo e variação da viscosidade do material durante o processo de extrusão. Materiais com maior viscosidade exigem pressão de extrusão maior para manter o fluxo de material, o que pode gerar irregularidades na taxa de fluxo ocasionando falhas na extrusão (NICOARA *et al.*, 2021). Esse efeito explica a menor nitidez na escrita da peça impressa com o filamento da marca C.

5.1.2.5 Avaliação da torre de velocidade

O teste da torre de velocidade é feito para verificar se o material apresenta falhas na impressão em velocidades mais altas. A Figura 40 mostra o esquema ilustrativo da peça que foi utilizada para o teste de velocidade. Foi programada a velocidade de inicial de 15mm/s até a velocidade final de 90mm/s, ocorreu um aumento gradativo de 5mm/s a cada bloco de altura ao longo da peça. Como já mencionado neste trabalho, a velocidade ideal de impressão do PETG é de 50mm/s.

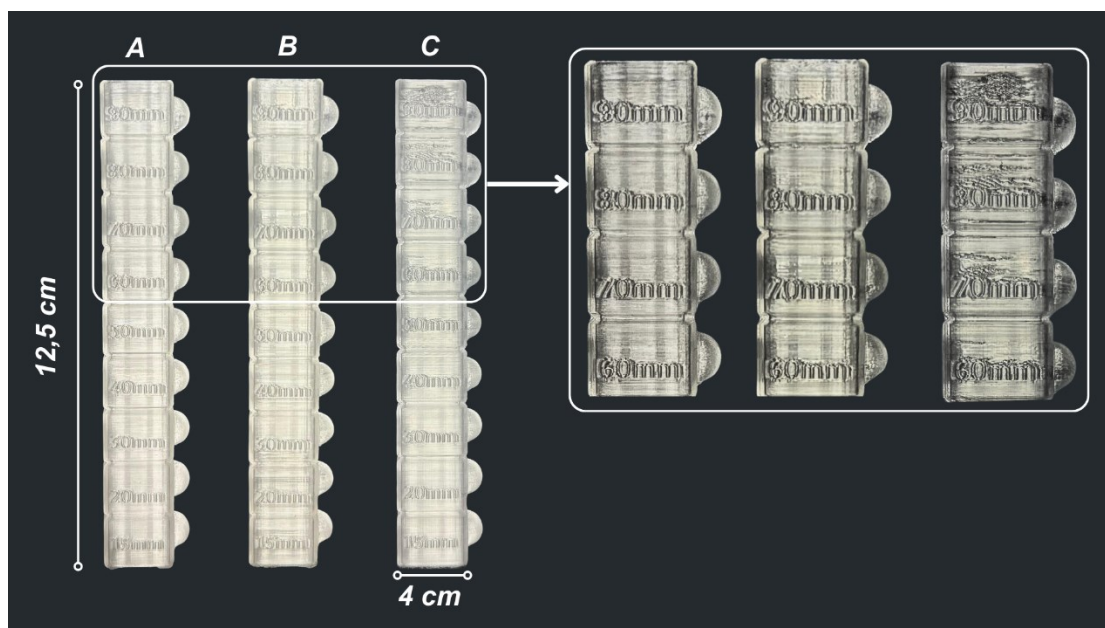
Figura 40 – Imagem ilustrativa da torre de velocidade.



Fonte: Adaptado de THINGVERSE (2025).

As peças impressas pelo filamento de PETG do fornecedor A, B e C encontram-se ilustradas na Figura 41.

Figura 41 - Torre de velocidade impresso em PETG com três fornecedores diferentes.



Fonte: Autoral

A peça com fornecedor A demonstrou boa estabilidade dimensional e acabamento superficial em todas as velocidades. O material do fornecedor B começou a apresentar falhas a partir de 80 mm/s, enquanto o filamento do fornecedor C exibiu piores resultados, começou a apresentar falhas leves em 50 mm/s e foi piorando, em 90 mm/s mostrou defeitos significativos.

Correlacionando esses comportamentos com as propriedades reológicas, térmicas e mecânicas obtidas na etapa de caracterização do material, nota-se que o material A apresentou maior rigidez e resistência mecânica, tornando-o mais robusto frente a variações de parâmetros de processo, como velocidades elevadas. No DMA o material A obteve o maior módulo de armazenamento (E') entre as três marcas estudadas. Já para o ensaio de tração o material A apresentou maior tensão máxima.

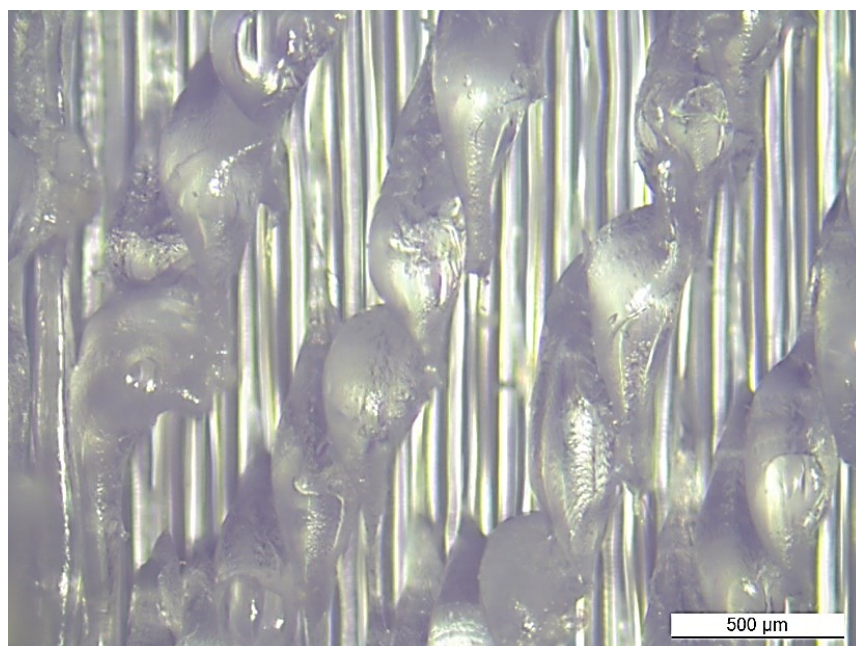
A reologia mostrou que o material A apresentou menor viscosidade, o que favorece um fluxo mais estável e controlado durante a extrusão até mesmo em altas velocidades (90mm/s). Além disso, com a análise de TGA foi possível observar que o material A tem a melhor estabilidade térmica entre os PETGs avaliados.

Já o filamento B apresentou um comportamento intermediário. Esse resultado pode estar relacionado com a sua viscosidade intermediária em relação ao filamento A e C e elevado desvio padrão nas propriedades mecânicas (E' e tensão máxima), o que aponta para inconsistência no processo de fabricação do filamento, tornando seu

comportamento menos previsível e confiável sob variações no processo de impressão. Por outro lado, o material C apresentou maior viscosidade e demanda maior pressão para extrusão em altas velocidades. Essa resistência ao fluxo pode ter causado sub-extrusão nas camadas superiores da peça, levando a falhas visuais e estruturais mais acentuadas. O fato de o material C apresentar maior T_g (tanto no estado filamentar quanto na peça impressa) deveria ocasionar maior dificuldade de adesão, porém não mostrou boa estabilidade térmica durante o processo, o que indica que seu desempenho sob aquecimento durante a impressão foi inferior ao esperado. Além disso, o valor do E' máximo e tensão máxima são inferiores ao material A, contribuindo para uma qualidade em termos de integridade mecânica e dimensional inferior ao material A.

Para uma melhor visualização dos defeitos presentes na torre de velocidade impressa com o filamento do fornecedor C, foram obtidas imagens de microscopia óptica na região de 90 mm/s (Figura 42).

Figura 42 - Imagem de MO da região de 90 mm/s da peça do fornecedor C.



Fonte: Autoral.

É possível observar na microscopia óptica a presença de falhas severas na deposição de material, caracterizada pela formação de bolhas e vazios porque o material não se depositou de forma homogênea devido à alta velocidade de

deposição. Esses defeitos são atribuídos à menor estabilidade reológica do material, possivelmente associada a uma maior viscosidade (SANTOS et al., 2018).

Assim, os resultados reforçam a importância de considerar não apenas uma propriedade isolada do material, mas um conjunto de características reológicas, mecânicas e térmicas para selecionar o filamento mais adequado à aplicação desejada. Além disso, esse estudo evidencia que a qualidade e a estabilidade do filamento têm impacto direto na reprodutibilidade e na confiabilidade dos testes realizados com peças impressas.

5.1.3 Seleção da marca para o estudo de degradação

Foi elaborada uma tabela-síntese (Tabela 11) reunindo, para cada critério previamente definido, os valores médios e respectivos desvios-padrão (média $\pm$ DP). Essa consolidação organiza os resultados já apresentados e serve de base para a atribuição posterior de escores aos filamentos.

Tabela 11 - Valores das médias e desvio padrão das análises quantitativas.

Respostas	Filamento		
	A	B	C
	$\bar{X} \pm s$	$\bar{X} \pm s$	$\bar{X} \pm s$
Tensão Máxima (MPa)	55,00 (1,34)	50,00 (4,47)	48,00 (0,49)
Módulo de elasticidade (GPa)	2,40 (0,41)	2,30 (0,30)	2,20 (0,23)
Módulo de armazenamento (MPa)	946,0 (15,00)	886,0 (73,10)	829,0 (8,40)
Tg (°C)	84,00 (0,30)	85,50 (0,60)	88,00 (0,40)
Nota: média $\bar{X}$, desvio padrão (s)			

A reprodutibilidade foi avaliada através do coeficiente de variação, sendo uma medida estatística que expressa, em termos percentuais, a razão entre o desvio padrão (dispersão) e a média da resposta. Na Tabela 12 é apresentado o coeficiente de variação (CV %) de cada critério, para os materiais das marcas A, B e C.

Tabela 12 - Coeficiente de variação (CV %) dos valores.

Critério	A	B	C
Tensão Máxima (%)	2,40	8,90	1,00
Módulo de elasticidade (%)	17,00	13,00	10,40
Módulo de armazenamento (%)	1,60	8,30	1,00
Tg (%)	0,30	0,70	0,45

O coeficiente de variação (CV %) também foi classificado de 0 a 10 pontos, sua regra está destacada na Tabela 9. As notas para os valores de CV estão ilustradas na Tabela 13. Para a avaliação da reprodutibilidade final foi feito uma média de todas as notas dos coeficientes de variação.

Tabela 13 – Desempenho de reprodutibilidade.

Critério	A	B	C
Tensão Máxima (MPa)	100%	60%	100%
Módulo de elasticidade (GPa)	20%	40%	40%
Módulo de armazenamento (MPa)	100%	60%	100%
Tg (°C)	100%	100%	100%
Desempenho geral da reprodutibilidade	80%	65%	85%

Ao avaliar o coeficiente de variação (CV %) e convertê-lo em uma escala de desempenho, foi possível quantificar a consistência dos resultados experimentais entre diferentes grupos de amostras. O material da marca B obteve menor valor de score mostrando menor reprodutibilidade, o C obteve maior número se mostrando mais estável e o A valor intermediário.

Utilizando as regras de classificação destacadas na Tabela 4 da metodologia, foram atribuídos os desempenhos para cada critério, destacadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Desempenho das propriedades dos materiais.

Critério	A	B	C
Tensão Máxima (MPa)	60%	40%	20%
Módulo de elasticidade (GPa)	100%	100%	100%
Módulo de armazenamento (MPa)	60%	40%	20%
Tg (°C)	40%	20%	20%
Reprodutibilidade	80%	65%	85%
Média dos desempenhos propriedades	68%	53%	49%

Para o desempenho da capacidade de impressão, a Tabela 15 mostra as notas para cada modelo com as marcas A, B e C dos filamentos de PETG.

Tabela 15 – Desempenho da capacidade de impressão.

Modelos	A	B	C
Torre de temperatura	0%	0%	0%
Torre de velocidade	100%	80%	40%
Torre de fluxo	100%	100%	100%
Overhang	100%	100%	100%
Benchy	100%	100%	100%
Média das notas qualitativas	80%	76%	68%

Para a torre de temperatura todas as peças apresentaram o efeito de *stringing* em todos os níveis, além disso não apresentaram escrita nítida em todos os níveis, obtendo nota 0 para as três marcas. Na torre de velocidade a marca A apresentou bons resultados de impressão em todos os níveis testados, diferente da marca C na qual a peça apresentou falhas de fluxo a partir de 60 mm/s. O material da marca B mostrou-se intermediário, tendo falhas leves de fluxo na velocidade de 80 e 100 mm/s. A modelos de torre de fluxo, overhang e Benchy obtiveram nota máxima para os três modelos, pois não apresentaram defeitos, assegurando boa precisão dimensional e estabilidade estrutural nos modelos testados.

Após a atribuição das notas referentes às análises qualitativas e quantitativas, foi calculado o *Score Final* de cada marca. Esse *Score Final* foi calculado a partir da média das médias quantitativas e qualitativas. Em seguida, realizou-se a análise de custo-benefício, obtida pela razão entre o *Score Final* e o preço por quilograma do filamento, resultando no Índice de Custo-Benefício. Os valores correspondentes estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores de todas as análises e relação custo-benefício.

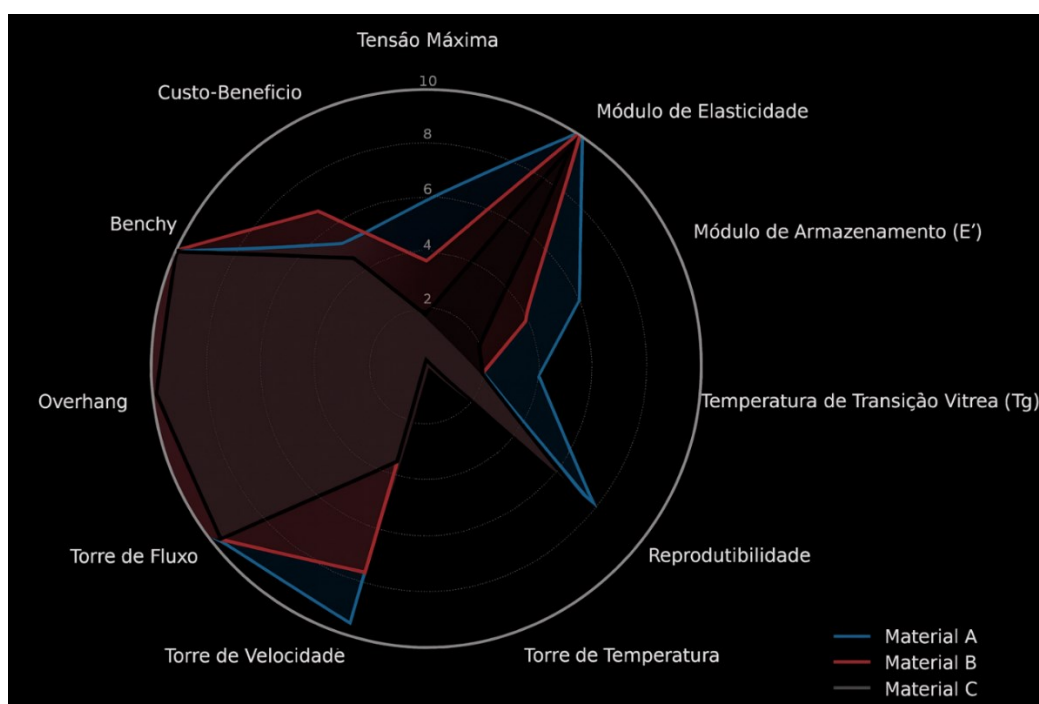
Filamento	Média Propriedades	Média printabilidade	Score Final (qualidade)	Preço (R\$)	Índice Custo-Benefício
A	68%	80%	74%	138,00	0,536
B	53%	76%	64,5%	95,00	0,679
C	49%	68%	58,5%	123,69	0,473

A marca com melhor custo-benefício é a marca B, que apresentou índice de custo-benefício de 0,679 superior aos valores obtidos pela marca A e C. Apesar da marca A ter alcançado o maior *Score Final* (74%), seu preço por quilo é o mais

elevado (R\$138,00) e comprometeu o desempenho no índice. Já a marca C, além de apresentar o menor score Final (58,5%), possui custo elevado (R\$123,69), resultando no pior custo-benefício entre as opções avaliadas.

Para ilustrar de forma mais clara as informações discutidas nesse tópico foi feito um gráfico radar com a nota de cada material, o gráfico pode ser observado na Figura 43.

Figura 43 – Gráfico de radar dos materiais A, B e C



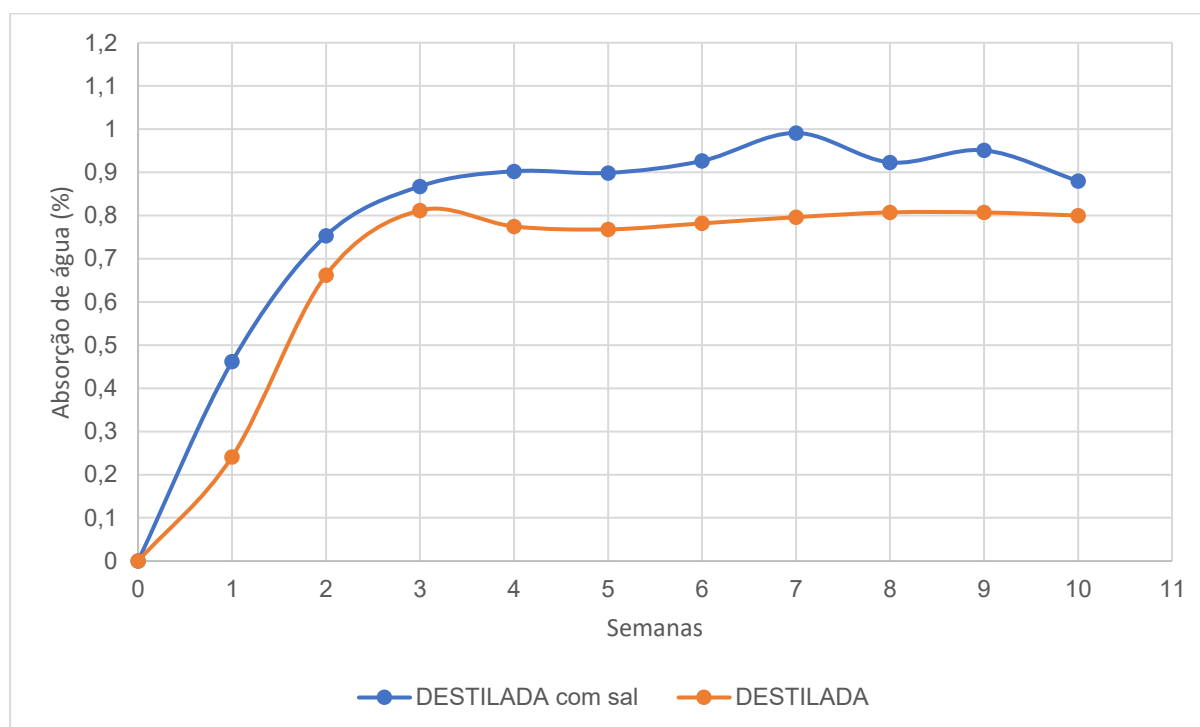
Fonte: Autoral.

É importante destacar que as diferenças entre as marcas A, B e C foram de pequena magnitude. Nenhuma apresentou desempenho significativamente inferior. Dessa forma, todos os materiais atenderam aos requisitos mínimos de printabilidade de reprodutibilidade. Além disso, os três filamentos mostraram-se compatíveis para serem aplicados no estudo de degradação. Diante dessa equivalência optou-se por priorizar o critério de custo-benefício. Sendo assim, observa-se que a marca B oferece o equilíbrio mais favorável entre desempenho técnico e preço, tornando-se a opção mais atrativa para continuidade do estudo de degradação.

5.2 ESTUDO 2

O estudo 2 abrange o ensaio de absorção de água acelerado em amostras de PETG fabricadas por FFF, as quais foram imersas em água destilada e água destilada com sal, ambas à 70 °C, durante 10 semanas. O gráfico de absorção de água está ilustrado na Figura 44.

Figura 44 – Gráfico das porcentagens médias de absorção de água das amostras ao longo das semanas de imersão.



Fonte: Autoral.

Observa-se que nos dois meios de imersão as amostras apresentaram um aumento acentuado na absorção de água nas semanas 1 e 2. Após a terceira semana ocorre uma estabilização da massa, comportamento típico de difusão Fickiana em matrizes poliméricas amorfa (SPERLING, 2006). Esse fenômeno ocorre devido ao preenchimento inicial dos sítios de sorção (regiões de volume livre) na matriz polimérica pelas moléculas de água, resultando em uma taxa de absorção mais elevada no início do processo. À medida que o tempo de exposição aumenta, a taxa de difusão diminui gradualmente até atingir o equilíbrio.

Entretanto, a comparação entre os dois meios evidencia diferenças. As amostras imersas em água destilada com sal apresentaram uma absorção de água superior ao longo de todo o período de exposição, atingindo valores finais entre 1,0 e 0,9 %, enquanto as amostras expostas à água destilada estabilizaram-se em torno de 0,8 %. Essa diferença pode estar associada à presença de íons dissolvidos no meio salino, que aumentam a polaridade da solução e potencializam a interação entre as moléculas de água e os grupos funcionais polares da cadeia do PETG. Essa interação promove maior penetração e retenção de água no interior da matriz polimérica (RODRIGUES et al., 2021).

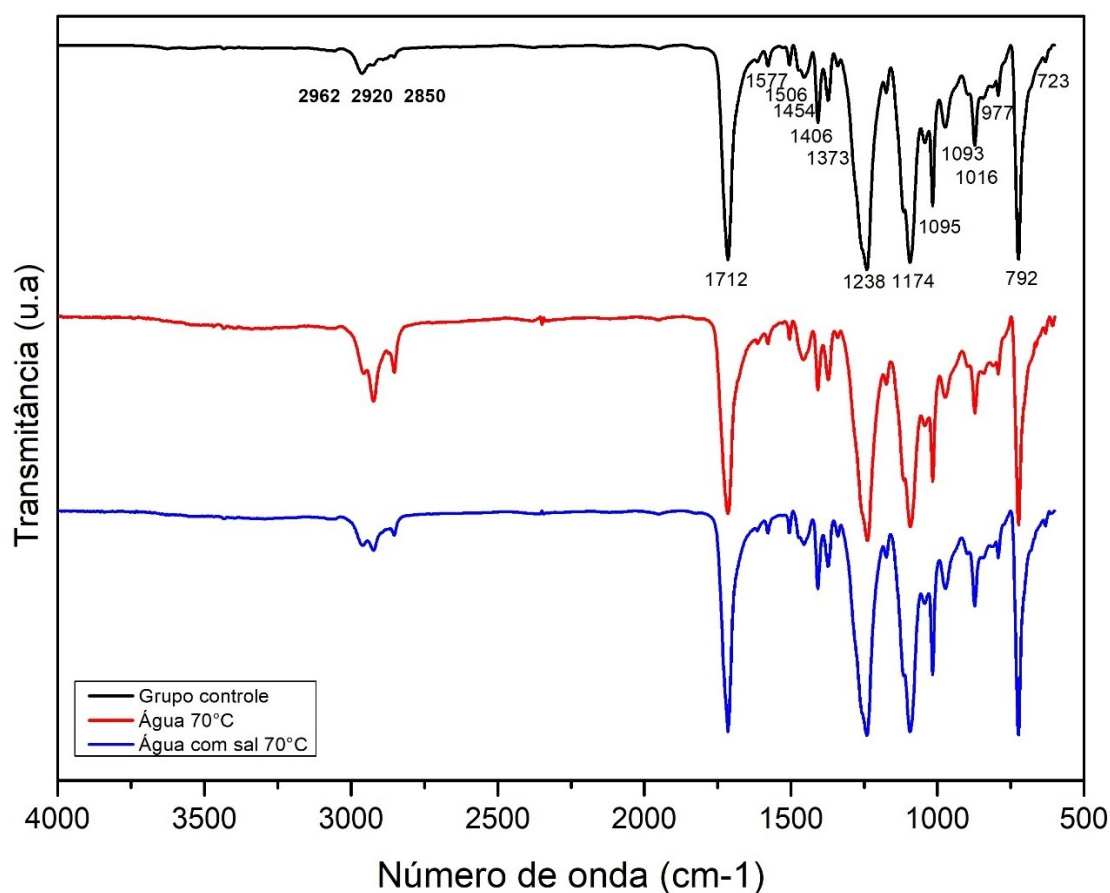
Além disso, a absorção total observada para os dois meios líquidos foi inferior a 0,9 %, evidenciando a baixa higroscopicidade do PETG, reforçando sua estabilidade dimensional e integridade estrutural mesmo após longos períodos de exposição em meio aquoso e salino

5.2.1 Caracterização de material após a imersão

5.2.1.1 Análise de FTIR

A Figura 45 – FTIR das peças do ensaio em água. Figura 45 apresenta os espectros de FTIR das amostras do filamento do fornecedor B, referentes ao grupo controle, bem como das amostras submetidas à imersão em água destilada a 70 °C e em solução salina a 70 °C ao longo das 10 semanas.

Figura 45 – FTIR das peças do ensaio em água.



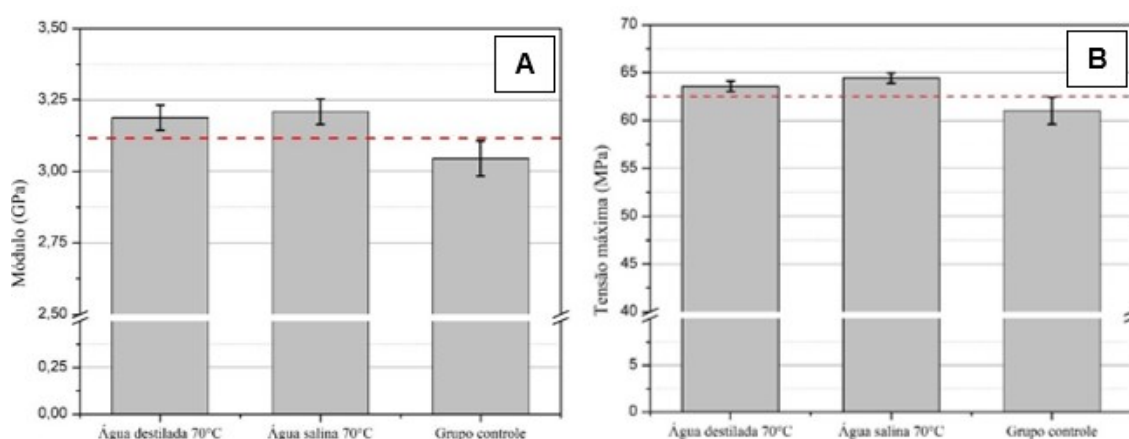
Fonte: Autoral

As amostras imersas em água, com e sem NaCl, mantiveram a estrutura molecular típica do PETG, sem desaparecimento, deslocamento ou surgimento de bandas. Isso indica ausência de alterações significativas na estrutura principal do polímero, mesmo após 10 semanas de imersão. As bandas observadas são compatíveis com as do Estudo 1 para o mesmo filamento do fornecedor B. Ressalta-se que, no Estudo 1, os espectros foram obtidos no filamento tal como recebido (“as-received”). No caso apresentado nesta seção, o grupo controle foi analisado no material impresso; as diferenças de histórico térmico e morfológico entre as peças impressas em FFF e o filamento pode explicar o desdobramento ou duplicações de dois picos no grupo controle, sem implicar propriamente na modificação química do polímero, sendo a banda 2920 e 2850, que se encontram menos destacadas para o grupo controle.

5.2.1.2 Ensaio Mecânico de Tração

A partir do ensaio mecânico de tração foi possível obter os valores de tensão máxima e módulo de elasticidade das amostras submetidas ao estudo de absorção de água de 10 semanas (Figura 46).

Figura 46 – A) Tensão máxima e B) módulo de elasticidade do grupo de controle e amostras imersas a 70 °C em água por 10 semanas.



Fonte: Autoral

Observa-se que os valores do módulo de elasticidade e tensão máxima das amostras imersas em água destilada e salina apresentam resultados bem próximos. Observamos que ocorre uma interceptação de desvio padrão do grupo de água destilada com o grupo da água salina, essa interceptação indica que os mesmos são estatisticamente equivalentes. Isso indica que a presença do sal não influenciou de forma relevante o comportamento mecânico do material.

As amostras imersas em água a 70°C apresentaram um aumento nos valores de tensão máxima e de módulo de elasticidade comparados com o grupo controle de 4,0% e 4,8% respectivamente. Para entender se esse valor é significativo foi feito a comparação com estudos similares apresentados na literatura.

O artigo de Valvez *et al.*, (2022) investigou o efeito do *annealing* em peças impressas em PETG submetidas a 90, 110 e 130°C por diferentes tempos (30, 240 e 480 minutos). Os autores observaram um aumento no módulo de elasticidade e resistência a tração em condições de maior temperatura e tempo de tratamento térmico, confirmando que o reforço mecânico observado decorre de processos térmicos controlados, porém com um aumento de até 61% no módulo de elasticidade

e 31% na resistência mecânica. De acordo com esse artigo, o aumento do tempo de exposição e da temperatura potencializa o efeito de *annealing* nas amostras.

Segundo Matos *et al.*, (2023) exposições prolongadas entre 70-90°C podem causar relaxamento de tensões internas e reorganização de cadeia macromolecular no PETG aumentando a rigidez do material e consequentemente seu módulo de elasticidade.

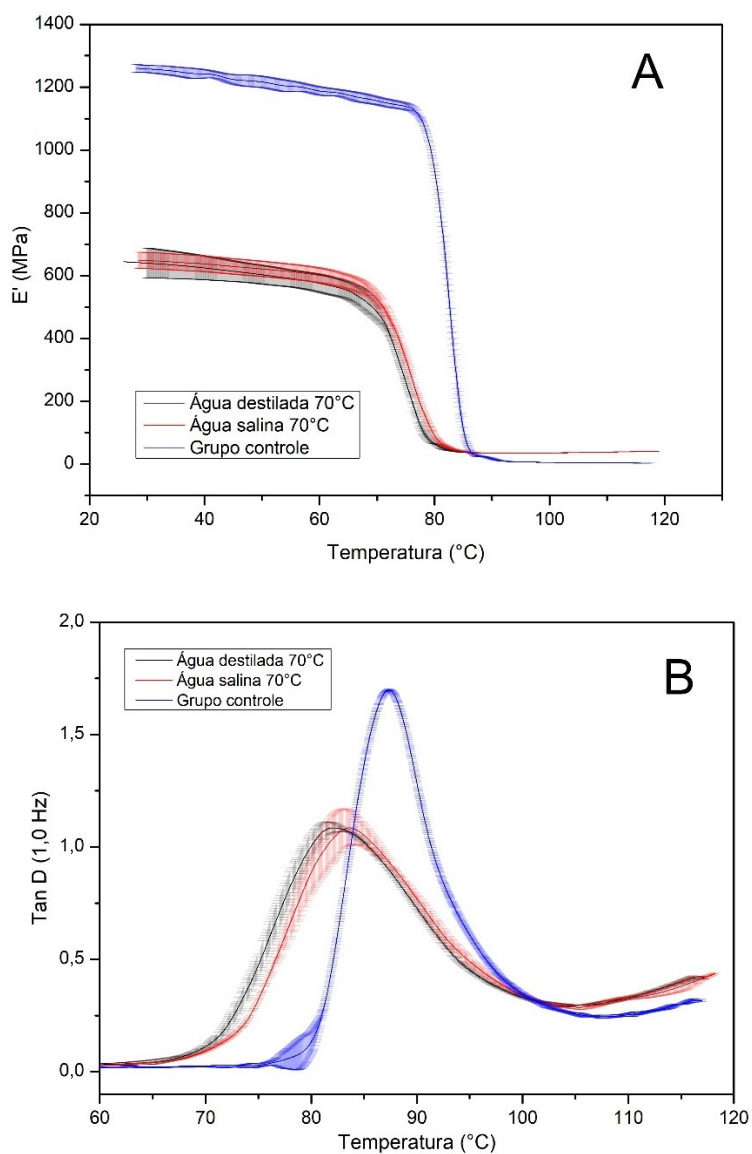
Desta forma, correlacionando os dados obtidos nesse estudo e o que foi visto na literatura não ocorreram grandes alterações na estrutura do PETG. Primeiramente foi levantado a hipótese da ocorrência de um leve *annealing* ou algum efeito de relaxamento de tensões internas no material, porém o aumento que se mostrou menor que 5%, valor muito inferior comparado com o aumento da literatura. Um parâmetro determinante observado para o efeito de *annealing* no PETG foi em relação a temperatura, o ensaio desse trabalho foi realizado na temperatura de 70°C, temperatura próxima ao limite inferior para o início do *annealing*, como informado por Matos *et al.*, (2023). Apesar do tempo prolongado de exposição a temperatura estava muito próxima do limiar necessário para que o processo ocorresse de forma mais pronunciada.

Diante do aumento discreto observado nos resultados de tração, os dados do ensaio de DMA foram avaliados também com o objetivo verificar se tais resultados poderiam estar relacionados a um possível estado de *annealing*, antes da execução de análises comprobatórias adicionais, com DRX ou DSC.

5.2.1.3 DMA

A Figura 47 - Variação do: A) Módulo de armazenamento e B) Tan δ em função da temperatura para o grupo de controle e amostras imersas em água destilada ou salgada a 70 °C por 10 semanas. Figura 47 mostra os resultados das análises de DMA. A partir dos gráficos apresentados é possível determinar a temperatura de transição vítrea (T_g) de cada grupo, bem como o valor máximo do módulo de armazenamento (E'). Os resultados obtidos para T_g e E' máximo estão ilustrados na Tabela 17.

Figura 47 - Variação do: A) Módulo de armazenamento e B) Tan δ em função da temperatura para o grupo de controle e amostras imersas em água destilada ou salgada a 70 °C por 10 semanas.



Fonte: Autoral.

Tabela 17 – Valores de Tg e E' máximo para as marcas A, B e C.

CONDIÇÃO	TG (°C)	E' máximo (MPa)
Grupo controle	87 ± 0,4	1253 ± 33,2
Água destilada 70°C	82 ± 0,6	923 ± 47,5
Água salgada 70°C	83 ± 0,6	940 ± 51,7

As temperaturas de transição vítrea (T_g) das amostras imersas em água apresentaram valores inferiores ao grupo controle, em torno de 82°C, e o grupo controle apresentou a T_g de 87°C.

A faixa típica para o valor de T_g do PETG reportada na literatura é entre 78°C e 88°C (GOMEZ *et al.*, 2013), e apesar dos valores estarem dentro do especificado a redução do valor da T_g dos grupos submetidos a degradação comparado com o grupo controle indica que não ocorreram modificações severas. Segundo Chen *et al.*, (2021) a redução no valor da T_g dos materiais submetidos a degradação pode mostrar a ocorrência da plastificação por água.

Observou-se uma redução de aproximadamente 28% no módulo de armazenamento das amostras imersas em água em comparação ao grupo controle, com valores decrescendo de 1250 para 900 MPa. Esse comportamento indica que a água atuou como um agente plastificante físico, promovendo o enfraquecimento das interações intermoleculares, especialmente das ligações de hidrogênio existentes entre grupos polares do PETG, como as carbonilas dos grupos éster e grupos hidroxila terminais.

A formação de novas ligações de hidrogênio entre a água e esses grupos polares reduz a intensidade das forças secundárias entre as cadeias poliméricas, aumentando a mobilidade segmentar, sobretudo nas regiões amorfas do material.

Essas alterações não foram evidenciadas por FTIR, uma vez que o fenômeno de plastificação está associado a interações físicas reversíveis, sem quebra de ligações covalentes ou modificações químicas significativas na estrutura do polímero. Assim, os resultados de DMA indicam que a absorção de água promoveu modificações físicas no PETG, sem comprometer sua integridade molecular, evidenciando a boa estabilidade do material frente à exposição prolongada em meio aquoso.

Através dos resultados observados no ensaio de tração, foi levantada a hipótese da ocorrência de um *annealing* ou relaxamento das tensões internas através da temperatura. Entretanto, embora alguns estudos relatem que o *annealing* tende a elevar ou estabilizar a T_g (BALTIC *et al.*, 2024), foi observada uma redução de cerca de 5 °C nessa propriedade. No artigo de Valvez *et al.*, (2022) onde foi realizado o efeito de *annealing* mostra o aumento de 5°C na T_g . Sendo assim, os resultados obtidos no ensaio de DMA apresentaram comportamento oposto ao esperado para o

efeito de *annealing*, com redução do módulo de armazenamento (E') e deslocamento da T_g para temperaturas inferiores.

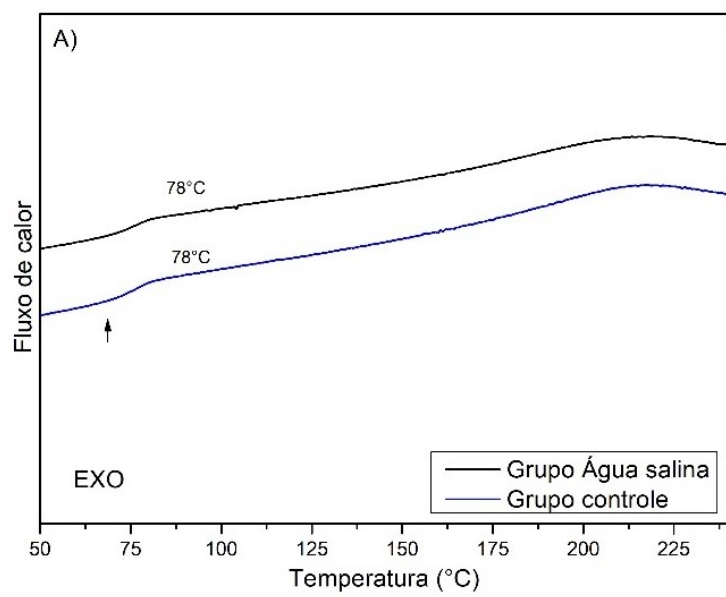
Por outro lado, a hipótese de plastificação por água também não é plenamente compatível com os resultados de tração, uma vez que, segundo Chen *et al.*, (2021), a plastificação aumenta a mobilidade das cadeias poliméricas, resultando na redução do módulo de elasticidade e na maior flexibilidade do material. No presente estudo, contudo, observou-se um leve aumento no módulo de elasticidade.

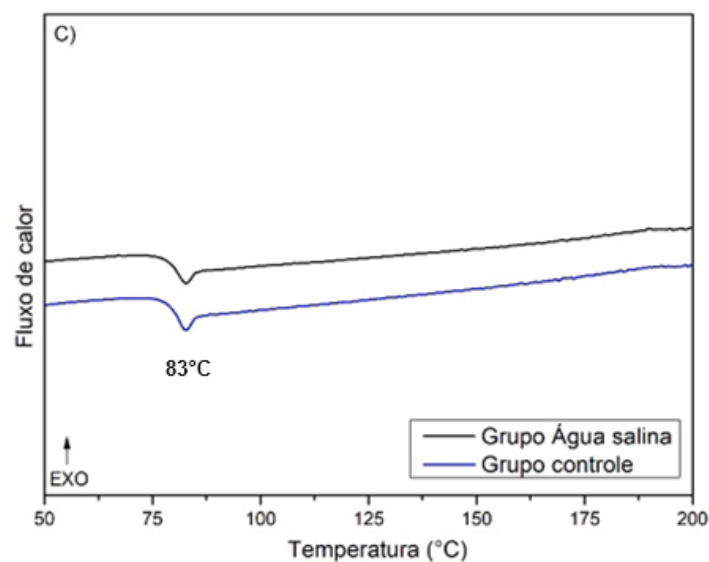
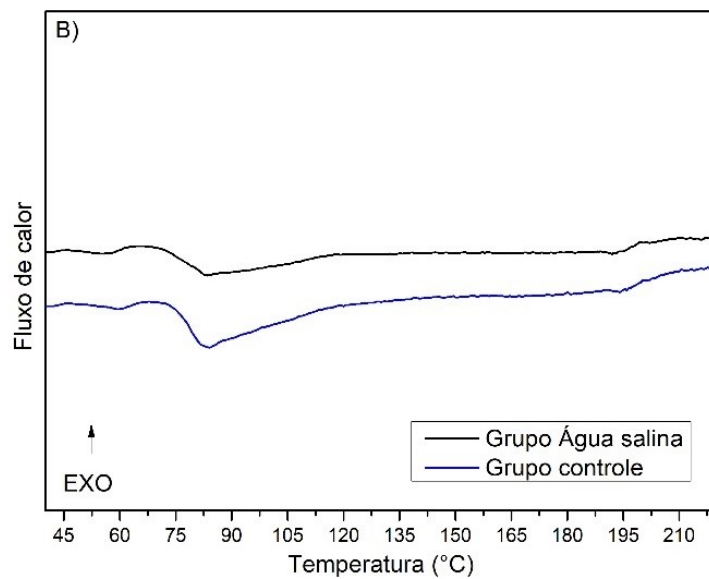
Devido a essa aparente divergência entre os resultados de tração e DMA, foi realizada a análise de DSC apenas para as amostras imersas em água salina, consideradas as mais críticas. Essa análise permitiu verificar possíveis alterações térmicas associadas à variação da T_g e à presença de relaxamento entálpico, contribuindo para esclarecer se os efeitos observados estavam relacionados a processos de *annealing*.

A

Figura 48 mostra os termogramas obtidos na análise de DSC para o grupo controle e a amostra submetida a absorção de água salina. O ensaio foi realizado em dois ciclos de aquecimento e um de resfriamento, em uma taxa de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, em uma temperatura de 20 a 250°C .

Figura 48 – Curvas de DSC das amostras do grupo controle e grupo de água salina do ensaio de absorção de água. A) Resfriamento. B) Primeiro aquecimento. C) Segundo aquecimento.





Fonte: Autoral

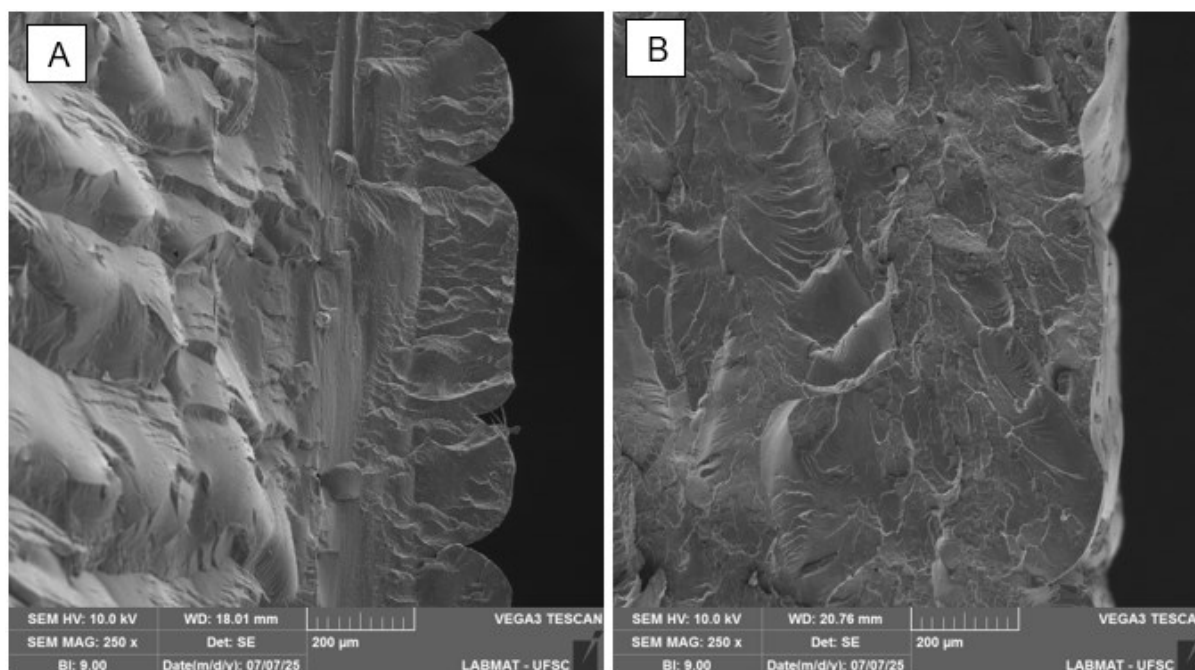
A análise das curvas de DSC mostra que o PETG não apresentou temperatura de fusão (T_f) nem temperatura de cristalização (T_c), confirmando sua estrutura predominantemente amorfa. No primeiro aquecimento foi observada uma T_g de aproximadamente 77 °C, que aumentou para cerca de 83 °C no segundo aquecimento. A ausência de picos ou eventos térmicos adicionais indica que não houve evidências de processos de *annealing* ou de recristalização, reforçando que as modificações observadas ocorreram apenas em nível físico, sem alterações estruturais significativas no material.

Desta forma, como foi confirmada a ausência do *annealing* para o ensaio de degradação em água, podemos ver que o aumento da resistência a tração e do módulo de elasticidade pode ter sido gerado a partir de efeitos físicos do material. Com isso, levanta-se novas hipóteses para explicar os dados observados. Considerando que o processo de fabricação por FFF gera tensão internas nas peças devido aos rápidos gradientes térmicos e à solidificação sucessiva das camadas (HAN *et al.*, 2021) é possível que, à temperatura de 70°C, tenha gerado dois fenômenos simultâneos, sendo o alívio das tensões internas geradas através do processo de FFF e aumento de adesão entre as camadas impressas.

Estudos como o de Valvez *et al.*, (2023) mostram que temperaturas próximas a 70 °C podem promover relaxação estrutural e aumento da adesão entre as camadas em peças impressas por FFF. Esse comportamento reforça a hipótese de que os efeitos observados nos ensaios estão principalmente relacionados à exposição do material a temperaturas elevadas, que atuam como um tratamento térmico superficial. Dessa forma, os resultados sugerem que as variações mecânicas observadas decorrem de efeitos físicos associados ao histórico térmico da amostra, e não de modificações estruturais significativas na matriz de PETG. Com isso, a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada para investigar a microestrutura das amostras e identificar eventuais alterações morfológicas resultantes dos processos de impressão e exposição em meio aquoso. Essa técnica permitiu avaliar aspectos característicos da deposição por FFF, como adesão interlaminar, presença de vazios e possíveis evidências de relaxação térmica ou alívio de tensões residuais. As micrografias foram obtidas em diferentes ampliações (100X, 250X, 500X e 1000X), abrangendo tanto as regiões de fratura quanto as superfícies superiores das amostras, possibilitando uma análise detalhada da coesão entre camadas e da integridade superficial do PETG após a imersão a 70 °C.

A Figura 49 apresenta a seção transversal das amostras com ampliação de 250X, comparando o grupo controle e o grupo submetido ao teste de absorção de água a 70 °C. Para a obtenção dessas imagens, os corpos de prova de tração foram fraturados em nitrogênio líquido, técnica que promove uma ruptura frágil e limpa, preservando a morfologia original das interfaces de deposição.

Figura 49 – Imagens do MEV da secção transversal com ampliação de 250X. A) Grupo controle. B) Grupo exposto na água destilada à 70°C.



Fonte: Autoral.

A Figura 49 A é referente a uma amostra do grupo controle. É possível observar também um formato arredondado em alguns filamentos e outros mais contínuos na borda da peça. Essa diferença entre as linhas depositadas na borda indica uma variação na difusão entre os filamentos, porém essa fusão parcial é característica do processo de FFF. O formato final vai depender de dois fatores principais: viscosidade do material e energia relativa entre a superfície do filamento e a superfície sobre o qual foi depositado (SANTANA *et al.*, 2015). Segundo Ahn *et al.*, (2002) o fluxo de material do bico é responsável por controlar a largura dos filamentos depositados, essa diferença do formato da deposição dos filamentos na borda pode estar relacionada a variações de fluxo de material.

Já na A Figura 49 B, onde vemos uma amostra do grupo que foi submetido ao ensaio de absorção de água, as fronteiras tornam-se menos perceptíveis, e a fratura apresenta textura mais rugosa e contínua, segundo o artigo de Öztürk *et al.*, (2024) essas características evidenciam o aumento da adesão entre camadas e relaxação das tensões residuais. Essa modificação morfológica sugere que a imersão em água a 70 °C atuou como um tratamento térmico moderado, promovendo a difusão parcial de cadeias poliméricas e a redução de defeitos interlaminares.

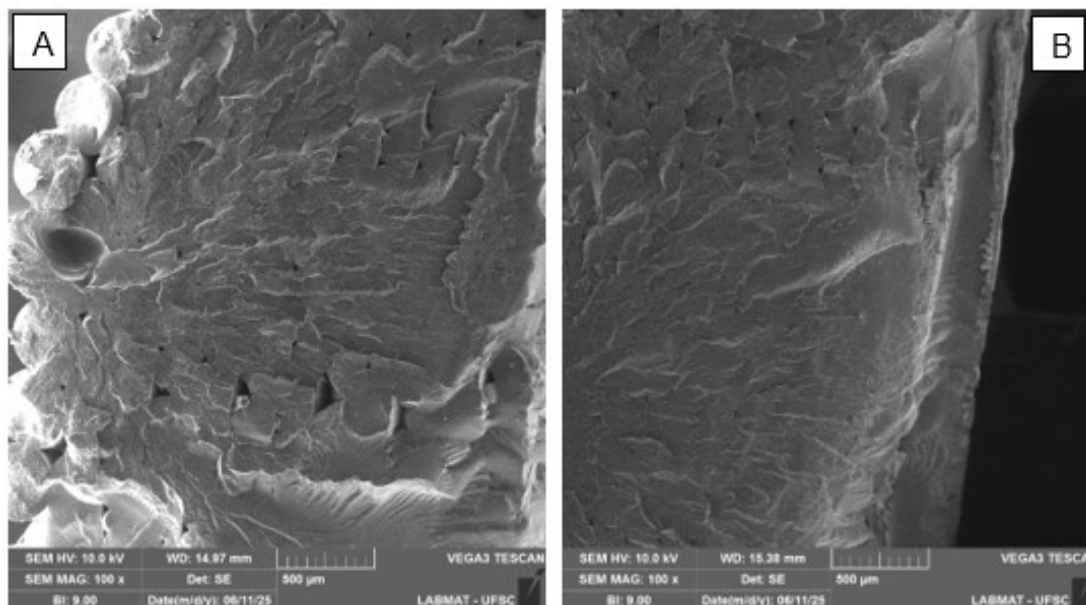
Comportamentos semelhantes foram relatados por Ayatollahi *et al.*, (2021), que observaram melhoria da resistência a tração de corpos de prova impressos após tratamento térmico, atribuída à redução das tensões residuais e ao fortalecimento das ligações intercamadas. Os autores também destacam a presença de marcas de cristas nas superfícies de fratura, associadas à dissipação de energia durante a ruptura. O artigo de Nallamili *et al.*, (2020) demonstram que a entrada de água favorece a adesão intercamadas possivelmente devido ao aumento da mobilidade molecular e a melhor difusão entre as camadas depositadas.

Assim, as micrografias do presente estudo corroboram a literatura ao indicar que o aquecimento e a umidade atuam conjuntamente, proporcionando relaxação estrutural, maior coesão interlaminar e, consequentemente, melhor desempenho mecânico do PETG impresso por FFF.

Outra característica que pode ser vista nas imagens de MEV que ajudariam a corroborar com a hipótese dos estudos seria a redução do tamanho ou quantidades de vazios, porém analisando as imagens não foi possível notar diferenças significativas. Como não foi feito MEV em todas as amostras desse estudo essa afirmação também seria difícil.

Outra característica associada à melhora da adesão é a redução do número e do tamanho dos vazios que podem ser observados na superfície da microestrutura a partir do MEV. Segundo o artigo de Valvez *et al.*, (2022) a difusão térmica e o relaxamento de tensões tendem a preencher microespaços e eliminar descontinuidades formadas durante a deposição. Na análise realizada neste trabalho, foram observadas diferenças na quantidade do tamanho de vazios entre o grupo controle e os grupos submetidos ao teste de absorção de água. Essas imagens podem ser observadas na Figura 50 com a ampliação de 100X.

Figura 50 – Imagens do MEV com ampliação de 100X. A) Grupo controle. B) Grupo exposto na água salina à 70°C.



É possível observar que o grupo controle (Figura 50 A) apresenta maior quantidade de vazios interlaminares, com alguns deles de tamanho mais expressivo, evidenciando regiões de fusão parcial entre as camadas depositadas. Já o grupo submetido à imersão em água salina à 70°C (Figura 50 B) apresenta estrutura mais compacta e homogênea, com redução visível na quantidade e no tamanho dos vazios.

De forma geral, a morfologia observada no MEV corrobora a hipótese de que a exposição a 70 °C promoveu rearranjo físico das interfaces, atuando tanto na redução de tensões residuais quanto na melhoria da coesão interlaminar, sem evidências de degradação química na matriz de PETG.

5.3 ESTUDO 3

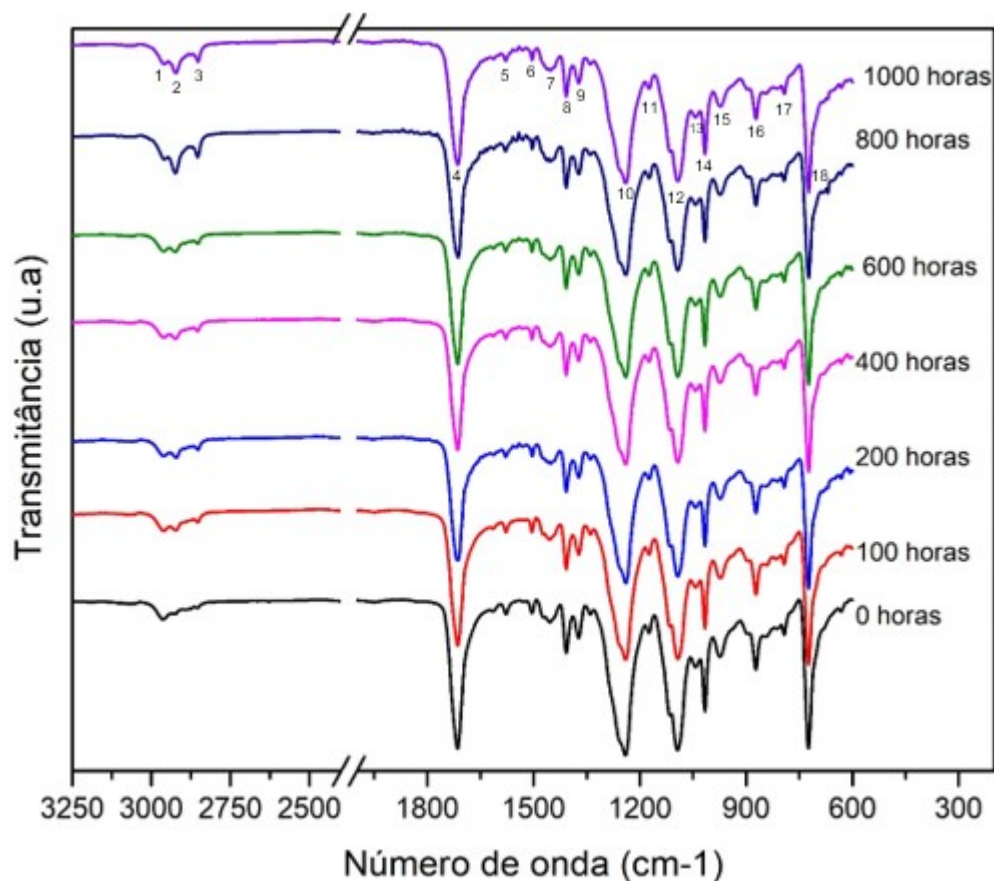
5.3.1 Caracterização do material

Após o ensaio de envelhecimento foram feitas caracterizações no material por FTIR, DMA, tração, MEV, DRX, DSC e colorimetria.

5.3.1.1 FTIR: Degradação UV

A Figura 48 apresenta os espectros de FTIR das amostras submetidas à radiação ultravioleta, no tempo de 0 horas até 1000 horas.

Figura 51 - FTIR das amostras submetidas a radiação UV.



Fonte: Autoral

A Tabela 18 apresenta as bandas destacadas pelos números (1–18) no espectro de FTIR.

Tabela 18 - Bandas características dos filamentos de PETG e suas respectivas atribuições.

Identificação	Número de Onda (cm ⁻¹)	Atribuição Vibracional	Fonte
1	2962	Estiramento do grupo (-CH)	(CASTRO, 2021)
2 e 3	2920; 2850	Estiramento do grupo (-CH ₂ -)	(PERIM, 2018)
4	1712	Estiramento da ligação carbonila (C=O)	(CUTHBERTSON <i>et al.</i> , 2024)

5, 6, 7 e 8	1577; 1506; 1454 e 1406	Deformações do anel aromático e ligação metila/ metileno ($-\text{CH}_2-$), ($-\text{CH}_3$)	(AMZA <i>et al.</i> , 2024)
9	1373	Deformação simétrica de $-\text{CH}_3$; bandas de escorregamento C–H	(RIVATON, 2000)
10	1238	Estiramento assimétrico da ligação C–O–C	(AMZA <i>et al.</i> , 2024)
11	1174	Estiramento simétrico da ligação C–O–C	(PASZKIEWICZ <i>et al.</i> , 2017)
12, 13 e 14	1095; 1093; 1016	Estiramento C–O ou C–C–O	(PAVIA, 2015)
15	977	Vibração de cisalhamento dos grupos $=\text{C}-\text{H}$	(SILVERSTEIN, 2014))
16	871	Vibrações fora do plano de anéis aromáticos	(PAVIA, 2015)
17 e 18	792; 723	Balanço dos grupos $-\text{CH}_2-$	(PAVIA, 2015)

Pode-se observar que os espectros ficaram bastante semelhantes. As curvas se iniciam com o destaque das três primeiras bandas que os valores de 2962, 2920 e 2850 cm^{-1} sendo bandas características do PETG, relacionadas às vibrações de estiramento dos grupos C–H (CASTRO, 2021). A banda intensa em 1712 cm^{-1} , atribuída ao estiramento da carbonila (C=O) do grupo éster (CUTHBERTSON *et al.*, 2024), também não apresentou deslocamentos ou alterações expressivas na intensidade, sugerindo que não ocorreu formação de novas carbonilas nem degradação oxidativa relevante. Esse comportamento reforça a estabilidade do grupo funcional principal do PETG sob radiação UV. Entre 1577 e 1406 cm^{-1} , observam-se as vibrações associadas ao anel aromático e às deformações dos grupos metila e metileno (AMZA *et al.*, 2024). As variações ao longo do tempo são discretas, indicando que a estrutura aromática, responsável por parte da rigidez e da resistência fotoquímica do polímero, manteve-se preservada. As bandas em 1238 e 1174 cm^{-1} , atribuídas aos estiramentos assimétrico e simétrico da ligação C–O–C e as em 1095 a 1016 cm^{-1} , relacionadas aos estiramentos C–O ou C–C–O (PAVIA, 2015), também apresentaram estabilidade, evidenciando a conservação das ligações ésteres e ausência de rearranjos significativos nas cadeias. Em regiões de menor número de onda (977 a 723 cm^{-1}), correspondentes a vibrações de cisalhamento $=\text{C}-\text{H}$ e modos de balanço dos grupos $-\text{CH}_2-$ (SILVERSTEIN, 2014; PAVIA, 2015), as diferenças

entre os espectros são sutis, sem indicação de novas absorções típicas de oxidação (como bandas em 3500 cm^{-1} ou 1630 cm^{-1}) (AMZA *et al.*, 2024).

Esses resultados mostram que o PETG apresenta elevada estabilidade frente a radiação UV no intervalo de tempo analisado. Não foi possível identificar a formação de novas bandas nem o desaparecimento de bandas existentes, uma vez que o espectro do grupo controle permaneceu praticamente idêntico ao dos demais grupos expostos.

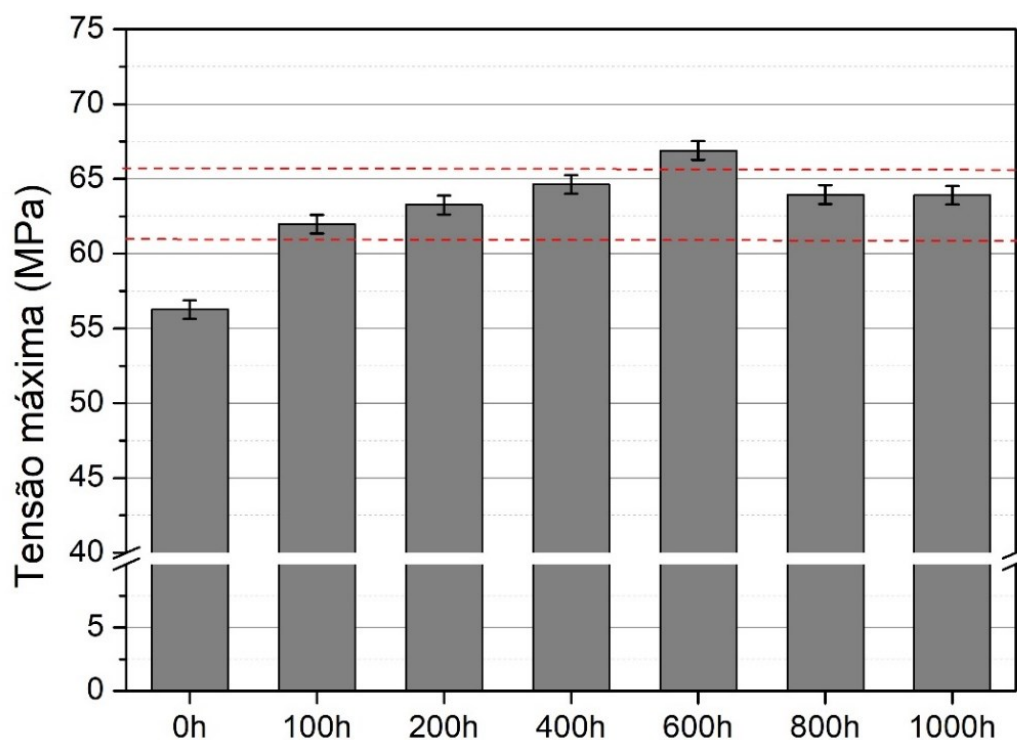
O artigo de CHEN *et al.*, (2016) demonstram que o PETG apresenta alta resistência a fotoestabilidade, e que quanto maior o teor de CHDM (glicol) na sua composição, pior a resistência a radiação UV.

5.3.1.2 Ensaio de tração

A

Figura 52 ilustra os resultados dos valores de tensão máxima para o grupo controle (0 horas) e os grupos submetidos a diferentes tempos de exposição à radiação UV.

Figura 52 – Gráfico com os valores de tensão máxima das amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento por radiação UV.



Fonte: Autoral.

É possível observar que os grupos expostos a radiação UV apresentaram valores de tensão máxima maior que o grupo controle de 0 horas. Há uma tendência de aumento gradual da resistência a tração de 100 horas até 600 horas, posteriormente há uma redução nos tempos de 800 horas e 1000 horas.

As linhas tracejadas do gráfico indicam que, com exceção do grupo exposto a 600 horas, as amostras submetidas a radiação UV se encontram dentro do mesmo intervalo de desvio padrão. Embora os valores médios de tensão máxima variem entre os grupos, a sobreposição dos desvios padrão sugere que as diferenças observadas não são estatisticamente significativas, com comportamento semelhante entre as condições analisadas. Em comparação ao grupo de 0 horas e o de 600 horas ocorreu um aumento de 18% na resistência a tração, sendo um valor expressivo.

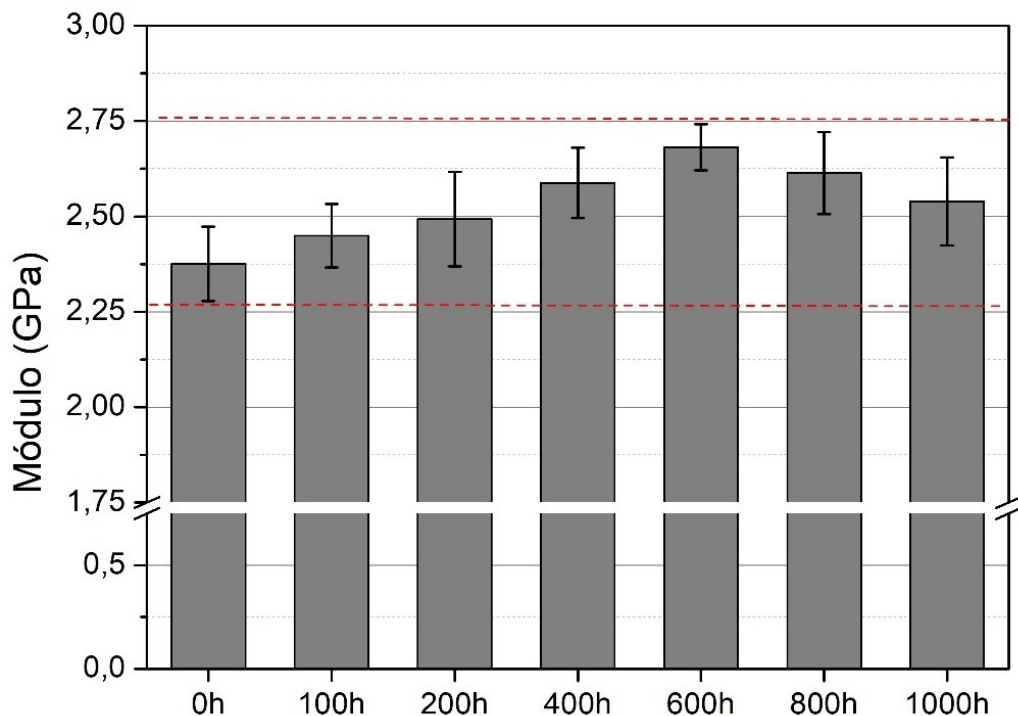
Segundo a ficha técnica da lâmpada Philips TL 80W/10R, a vida útil da lâmpada é de aproximadamente 1000 horas, sendo que a intensidade de emissão ultravioleta tende a decair gradualmente ao longo do tempo de uso. De acordo com os dados do fabricante, a depreciação da irradiância é da ordem de 10 % após cerca de 500 horas de operação e atinge aproximadamente 15 % ao final de 1000 horas. Essa perda de eficiência poderia explicar o comportamento aleatório nas respostas dos corpos de prova. Outra informação valiosa é em relação a temperatura dentro da

câmara, se manteve sempre em cerca de 50°C por causa do calor gerado através das lâmpadas.

Todas as peças submetidas a radiação apresentaram valor de resistência a tração superior ao grupo controle (0 horas). Aparentemente, os tempos de exposição não apresentaram correlação direta com os valores obtidos, sugerindo um comportamento aleatório,

A Figura 53 mostra os valores obtidos no ensaio de tração para o módulo de elasticidade dos grupos estudados no ensaio de envelhecimento acelerado.

Figura 53 - Gráfico com os valores do módulo de elasticidade das amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento por radiação UV.

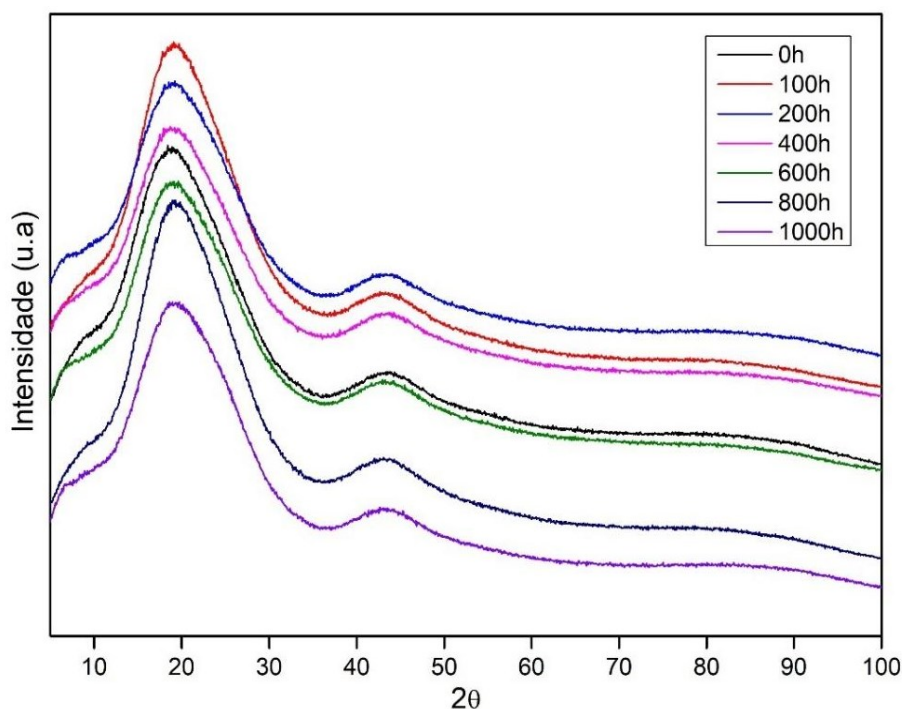


Fonte: Autoral.

Os resultados do módulo de elasticidade apresentaram uma tendência de aumento até cerca de 600 horas de exposição, seguida de estabilização e leve redução nos tempos subsequentes. Embora as diferenças não tenham sido estatisticamente significativas, o comportamento observado sugere que a radiação UV pode ter promovido rearranjos estruturais no polímero, aumentando temporariamente sua rigidez. Esse efeito pode estar relacionado à combinação de processos de reticulação superficial e alívio de tensões residuais induzidos pela temperatura interna da câmara de ensaio. O valor elevado no desvio padrão pode ter sido proveniente da natureza das medidas, o módulo é determinado a partir do trecho inicial da curva de tensão deformação, região altamente sensível ao assentamento nas garras que seguram a peça, para próximos trabalho é recomendado o uso do extensômetro, essa ferramenta pode reduzir a dispersão apresentada. Além disso as dimensões do corpo de prova utilizado nesse trabalho era o menor modelo dentro da norma dos corpos de prova de tração, amostras de pequenas dimensões são mais sensíveis a imperfeições geométricas e variações locais da microestrutura, especialmente em peças obtidas por manufatura aditiva. O comprimento útil reduzido intensifica os efeitos de folgas nas garras, assentamento inicial e desalinhamento axial, aumentando o ruído na medição da deformação inicial e, conseqüentemente, a variabilidade do módulo de elasticidade (ZHANG *et al.*, 2022).

Com base nos resultados obtidos, foram levantadas hipóteses para explicar os comportamentos observados. A primeira hipótese é que a temperatura da câmara (50°C) pode ter gerado algum tipo de *annealing* no material. Essa hipótese foi investigada a partir da análise de DRX. A Figura 54 apresenta os difratogramas da análise de DRX das amostras submetidas ao ensaio acelerado de radiação UV, bem como o grupo controle (0 h), que não foi submetido à radiação.

Figura 54 – Resultado da análise de DRX das amostras expostas à radiação ultravioleta.



Fonte: Autoral

Observa-se no difratograma que o PETG não apresenta picos de difração característicos de fases cristalinas distintas. De modo geral todas as curvas das amostras analisadas exibem um amplo halo difuso na faixa de 2θ entre 10° a 30° , característicos de materiais predominantemente amorfos ou com baixo grau de cristalinidade. Observa-se ainda um sinal difuso de baixa intensidade em torno de 45° (2θ), associado à ordenação de curto alcance entre segmentos de cadeia em regiões amorfas. A ausência de picos definidos ou de variação significativa desse sinal com a exposição à radiação UV indica que não houve formação de fases cristalinas no PETG, apenas possíveis rearranjos locais da estrutura amorfa. Resultados análogos foram reportados por Loskot *et al.*, (2023), que também observaram esse padrão difuso típico de materiais amorfos. Segundo os autores essa estrutura é considerada vantajosa para o processo de impressão, uma vez que polímeros amorfos apresentam menor retração volumétrica durante o processamento, favorecendo a precisão dimensional e estabilidade geométrica da peça fabricada.

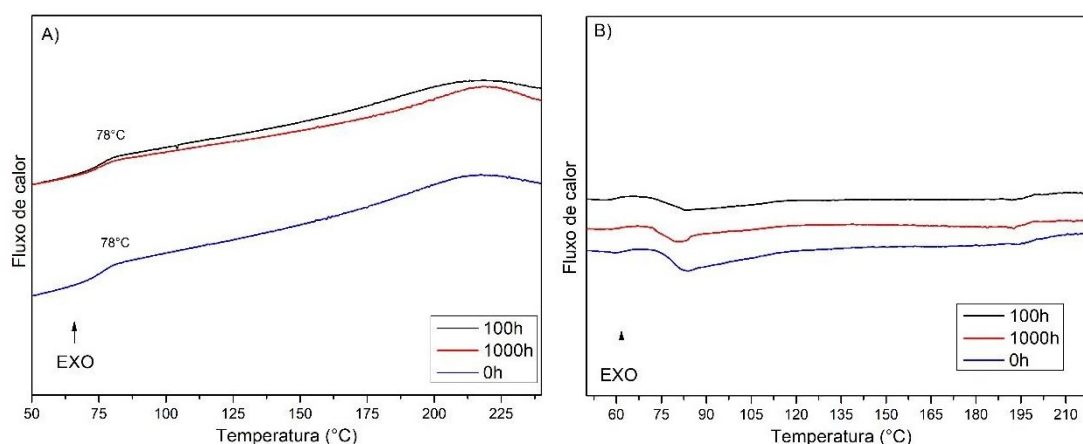
Entretanto, o PETG pode cristalizar-se parcialmente quando submetido ao estiramento uniaxial ou recozimento prolongado (*annealing*). No estudo de Kattan *et*

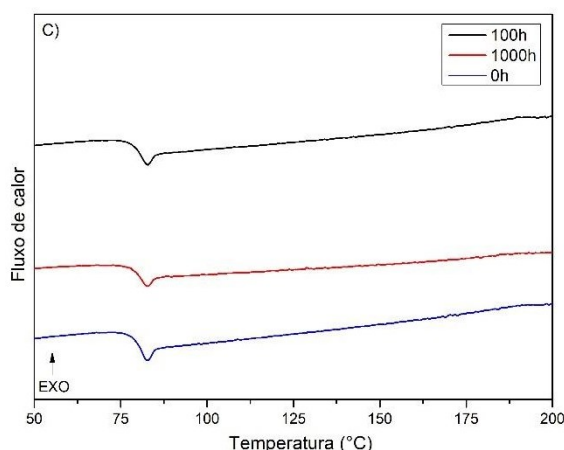
al., (2025), foi reportado um aumento no grau de cristalinidade, variando de 3% a 11% para os ensaios de estiramento e recozimento, respectivamente. Essa cristalização foi evidenciada pelo surgimento de picos de difração em 2θ de 10, 20, 25 e 30°. Com isso, a ausência desses picos nos difratogramas nesse trabalho indica que o efeito de *annealing* não se manifestou no PETG após o ensaio de degradação, mantendo a estrutura predominantemente amorfa.

Há uma segunda hipótese, que é baseada na teoria de que a exposição de materiais poliméricos à radiação ultravioleta pode induzir processos de reticulação (crosslinking), resultando em alterações significativas nas propriedades mecânicas, como o aumento da tensão máxima (GUDER *et al.*, 2021; CRUZ *et al.*, 2021). Artigos como o de Fechine *et al.*, (2002), observaram que polímeros submetidos à radiação UV, tanto em exposição natural quanto artificial, apresentam modificações nas propriedades mecânicas a tração devido às reações de cisão de cadeia e reticulação. Essa hipótese foi avaliada a partir da análise de DSC, com o objetivo de identificar possíveis alterações térmicas associadas à reticulação.

A Figura 55 mostra os termogramas obtidos na análise de DSC para os grupos submetidos ao ensaio de degradação acelerado por radiação ultravioleta por 100h e 1000h, além da referência adotada, ou seja, o grupo controle (0 horas). O ensaio foi realizado em dois ciclos de aquecimento e um de resfriamento, em uma taxa de 3°C/min, em uma temperatura de 20 a 250°C.

Figura 55 – Curvas de DSC das amostras dos grupos 0h, 100h e 1000h do ensaio de envelhecimento UV. A) Primeiro aquecimento. B) Resfriamento. C) Segundo aquecimento.





Fonte: Autoral

O PETG não apresentou temperatura de fusão (T_f) e temperatura de cristalização (T_c), confirmando sua estrutura predominantemente amorfa. Na etapa de resfriamento (Figura 55 A), nota-se uma T_g de 77°C, enquanto no segundo aquecimento (Figura 55 C) esse valor aumenta para aproximadamente 82,8°C. Esse deslocamento é esperado em polímeros como o PETG, estando associado ao rearranjo das macromoléculas durante o segundo aquecimento (SZTORCH *et al.*, 2023).

Comparando as curvas da análise de DSC com o artigo de CHEN *et al.*, (2016), podemos concluir que a composição do nosso PETG é 70/30 ou seja cerca de 70 % tereftalatos de etileno (ET) e 30 % ciclohexano dimetanol (CHDM), chamado popularmente de “glicol”. O artigo demonstra que o PETG apresenta alta resistência a fotoestabilidade, e que quanto maior o teor de CHDM na sua composição, pior a resistência a radiação UV, sendo que teores moderados glicol (como 30 %) conferem um bom equilíbrio entre resistência à radiação UV e propriedades mecânicas, sendo essa proporção considerada adequada para aplicações que exigem boa estabilidade frente à exposição ultravioleta.

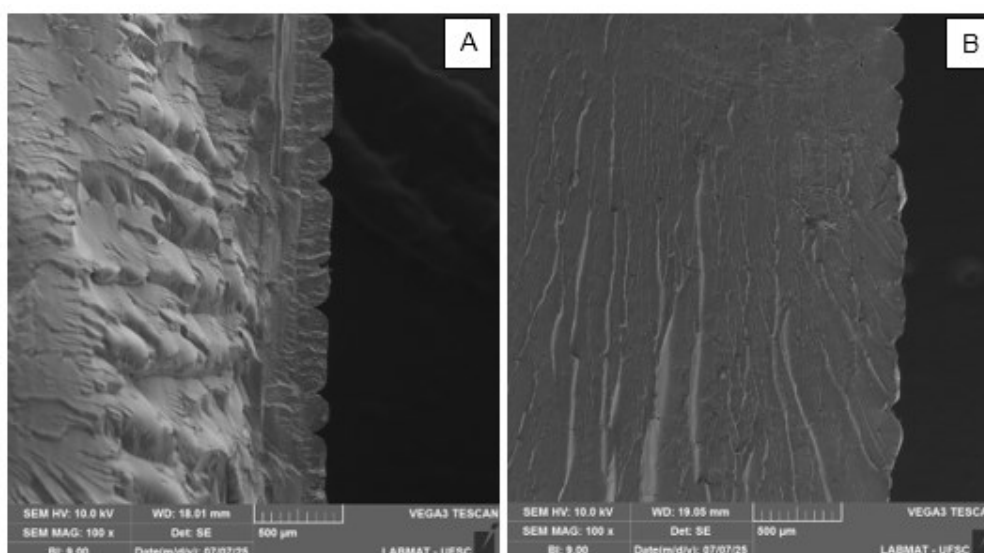
Por fim, a análise das curvas de DSC indica que não houve diferenças significativas entre as amostras submetidas à exposição UV, o que indica que não ocorreu reticulação. Com isso, é levantada uma terceira hipótese para explicar o aumento da resistência a tração do material exposto a radiação UV. A temperatura de 50°C gerada através da lâmpada pode ter contribuído para o rearranjo interfacial das camadas, reforçando a adesão entre elas e promovendo o aumento de

resistência observado. Essa hipótese pode ser estudada através das imagens obtidas no MEV.

O primeiro ponto analisado nas imagens do MEV refere-se ao possível aumento da adesão entre camadas e ao relaxamento das tensões residuais. Em seguida, foi avaliada a redução no tamanho e na quantidade de poros, como já observado no Estudo 2. Verificou-se que as amostras submetidas ao ensaio de degradação apresentaram modificações morfológicas compatíveis com esses efeitos.

A Figura 56 apresenta a seção transversal das amostras com ampliação de 100X, comparando o grupo controle e o grupo exposto a radiação UV por 1000 horas.

Figura 56 – Imagens do MEV da seção transversal com ampliação de 100X. A) Grupo controle. B) Grupo exposto a radiação UV por 1000 horas.

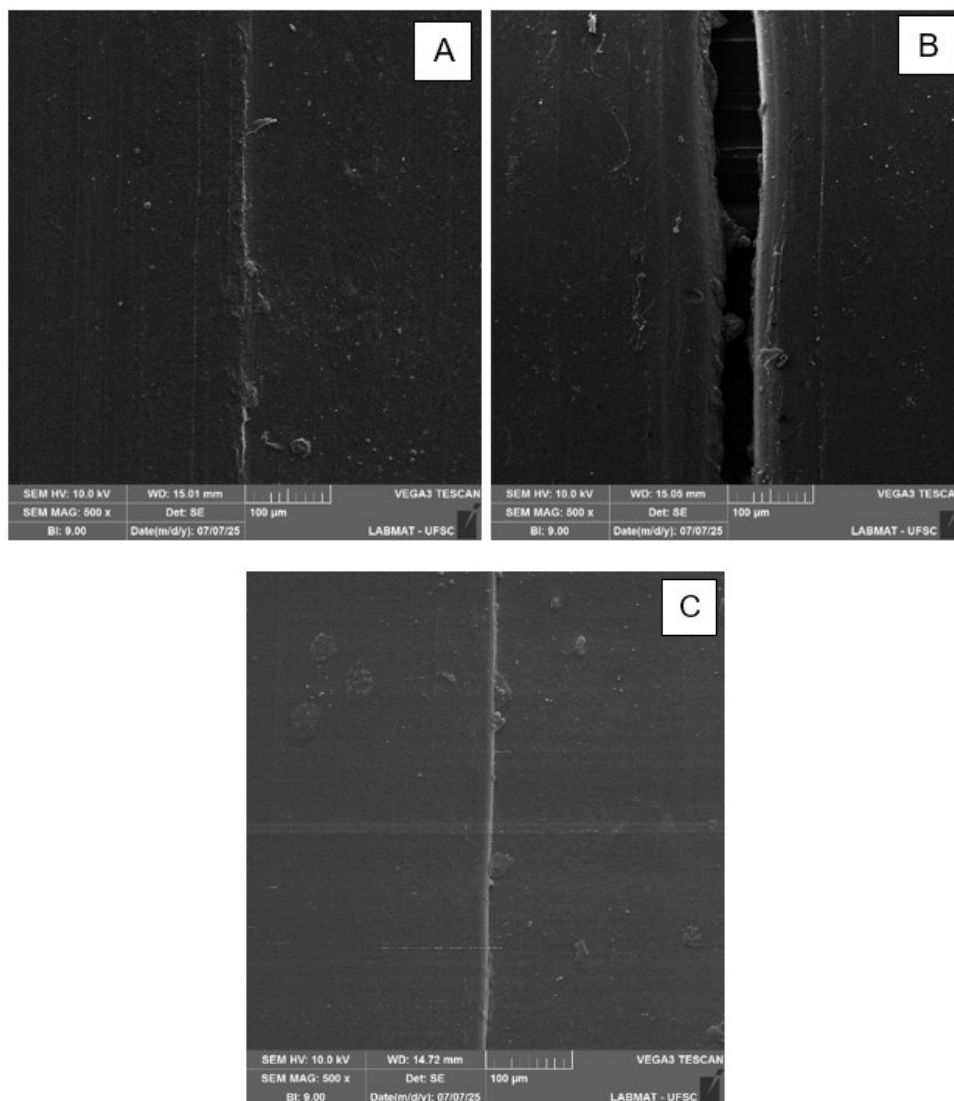


Fonte: Autoral.

Pode-se observar na Figura 56 A que a microscopia do grupo controle apresenta uma superfície mais rugosa, com fronteiras bem definidas entre as camadas. Já a superfície da amostra exposta a 1000 horas (Figura 56 B) apresenta morfologia mais contínua e homogênea, na borda, nota-se uma menor definição das camadas depositadas, sugerindo melhor adesão entre as interfaces. Tudo isso indica um possível rearranjo físico entre as camadas devido à temperatura da câmara durante a exposição UV, promovendo relaxação das tensões residuais e melhoria da coesão interlaminar, sem evidências de degradação superficial.

A Figura 57 ilustra a imagem do MEV na vista superior com aumento de 500x para o grupo controle e peças dos grupos degradados, de 800 e 1000 horas.

Figura 57 - Imagens do MEV da vista superior com ampliação de 500X. A) Grupo controle. B) Grupo exposto a radiação UV por 800 horas. C) Grupo exposto a radiação UV por 1000 horas.



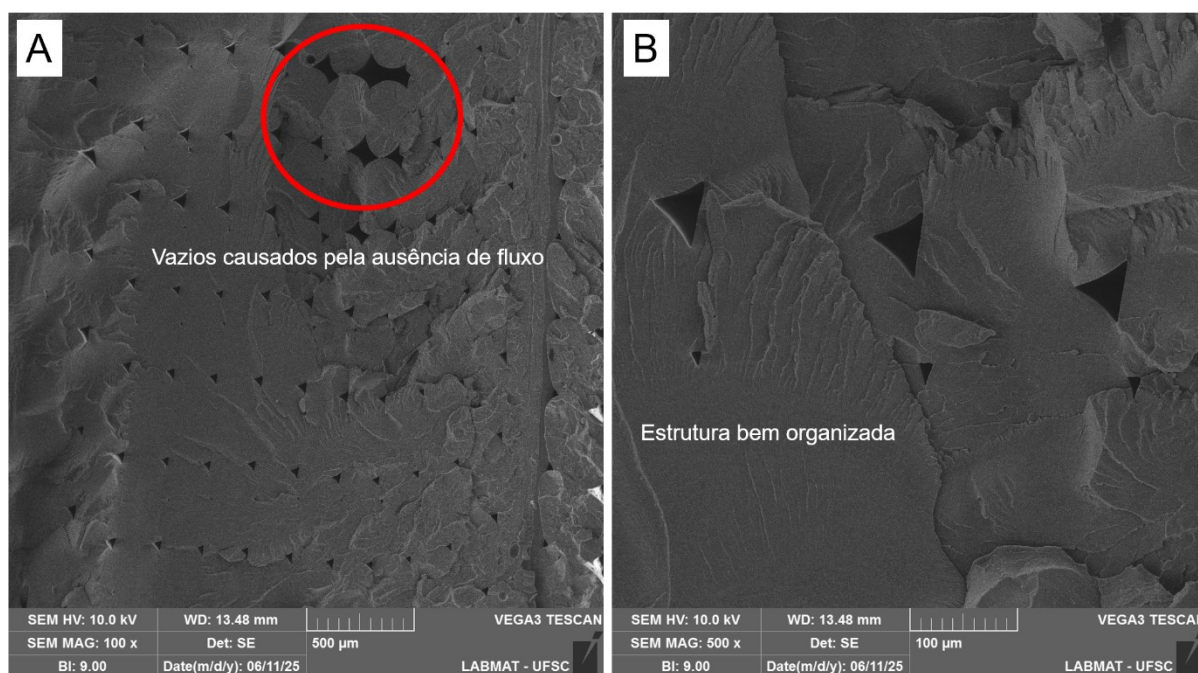
Fonte: Autoral.

Pode-se observar na Figura 57 A e B, referente ao grupo controle e amostra submetida a 1000 horas apresentaram morfologias muito semelhantes, com superfície continua. Já a Figura 57 C, referente a amostra exposta a 800 horas, apresenta uma região com separação, essa “fenda” é associada a imperfeições geradas durante o processo de deposição por FFF, e não efeitos de degradação. Estudos como os de Wang *et al.*, (2021) e Ahn *et al.*, (2002) relatam que variações no fluxo de extrusão, temperatura de deposição, ou adesão insuficiente entre trajetórias adjacentes podem originar micro espaçamentos superficiais. Sendo assim, esse efeito não tem relação com a degradação do material em si, mas sim com o fluxo de material ou variações de temperatura durante o processo de extrusão.

É importante ressaltar que essa análise na região superior da peça não anula os resultados discutidos anteriormente, observados na região transversal das amostras, uma vez que as duas abordagens avaliam regiões e aspectos distintos do material. Enquanto as imagens de fratura (seção transversal) evidenciaram rearranjo interlaminar e suavização na borda, a vista superior revela características locais da superfície impressa, que podem refletir pequenas variações durante o processo de impressão.

Esse defeito de fluxo é particularmente relevante para o presente estudo, pois indica que a aleatoriedade e os elevados desvios-padrão observados em algumas análises podem estar diretamente associados a instabilidades no processo de extrusão (TURNER *et al.*, 2014). O problema de fluxo foi identificado também em uma amostra submetida a exposição de 100 horas, através da falta de homogeneidade da distribuição dos vazios (Figura 58).

Figura 58 – Amostra submetida a radiação UV por 100 horas. A) Ampliação de 100 X. B) Ampliação de 500 X.



Fonte: Autoral.

Na Figura 58 A a parte com defeito é destacada com o círculo vermelho, onde é identificado falta de homogeneidade dos vazios causado por problemas de fluxo. Já na Figura 58 B é mostrado um exemplo de uma estrutura bem-organizada.

Na Figura 58 A, a parte com defeito é destacada com o círculo vermelho, onde é identificado falta de homogeneidade dos vazios causado por problemas de fluxo.

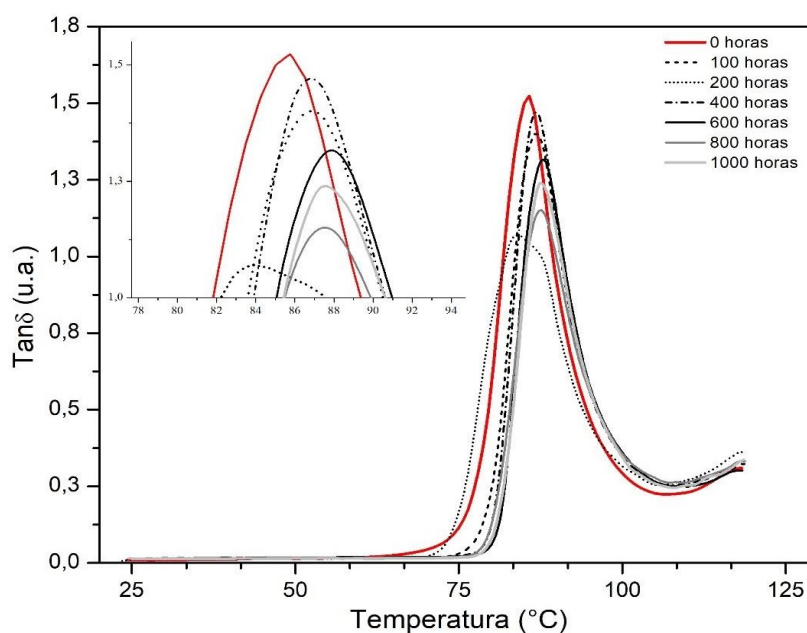
Com as análises de MEV podemos confirmar uma das hipóteses geradas nesse trabalho: a aleatoriedade das peças pode estar relacionada com falhas durante o processo de impressão causadas principalmente por problemas de fluxo, que pode estar relacionada a alta viscosidade do material B, destacada no Estudo 1. Durante a seleção do material foi constatado que o material B apresentava elevado desvio padrão nos resultados das amostras obtidas por ele, porém como o teste de printabilidade as peças apresentaram bom resultado esse ponto de seleção não foi considerado crítico para a escolha de material. Entretanto, pode-se observar que o elevado desvio padrão estava relacionado a defeitos estruturais internos, que podem ter influenciado na resposta da diferenciação dos grupos expostos aos tempos de 100 a 1000 horas na radiação UV.

Apesar do MEV indicar uma superfície mais homogênea nas amostras expostas por 1000 horas, o número limitado de amostras não permite afirmar com certeza que o aumento de resistência à tração ocorreu exclusivamente pela melhora de adesão entre camadas. Ainda assim, essa hipótese é a mais compatível com os resultados, considerando a ausência de alterações estruturais observadas por DRX e DSC. A hipótese de *annealing* térmico não deve ser totalmente descartada, pois a temperatura de 50 °C da câmara pode ter promovido rearranjos físicos e alívio de tensões sem gerar cristalização detectável. Já a hipótese de reticulação pode ser descartada, uma vez que o DSC não apresentou mudanças em T_g ou ΔH_m que indiquem a formação de ligações cruzadas. Assim, o aumento de resistência parece estar relacionado principalmente a efeitos físicos de reorganização interlaminar induzidos pela temperatura, e não a transformações químicas permanentes no material. De qualquer forma, a resposta positiva do PETG em relação a sua resistência e estabilidade frente ao envelhecimento acelerado é eminente.

5.3.1.3 DMA: Degradação UV

A análise da temperatura de transição vítrea (T_g) foi realizada utilizando o ensaio de DMA, conforme apresentado na Figura 59. Os valores da T_g estão destacados na Tabela 19.

Figura 59 – Curvas de Tan delta obtidas na análise de DMA.



Fonte: Autoral

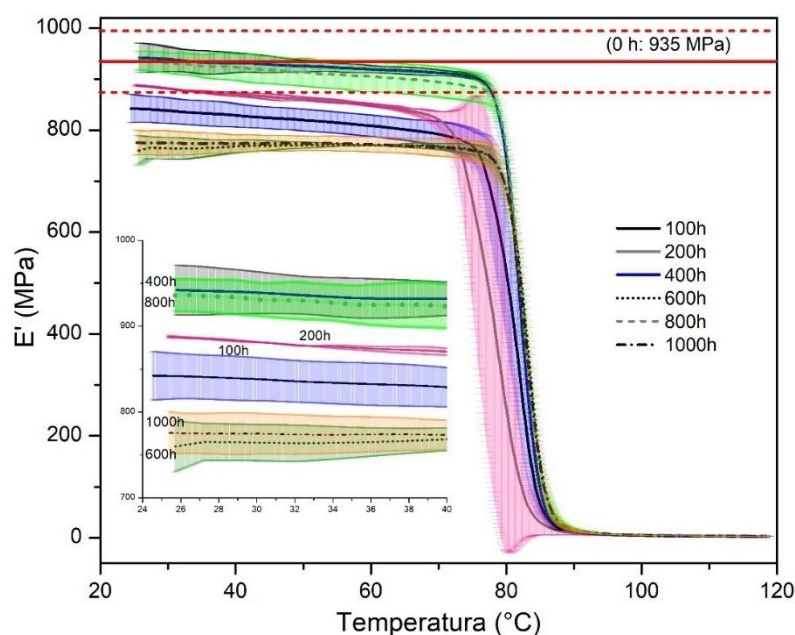
Tabela 19 – Valor da Tg para as amostras submetidas ao teste de degradação UV.

Tempo (h)	0	100	200	400	600	800	1000
Valor Tg (°C)	85,9	86,0	85,3	86,6	87,8	87,1	87,1

Os valores de Tg dos grupos analisados variaram entre 85,3 °C a 87,8 °C. Apesar dessas variações, todos os valores permanecem dentro da faixa esperada para o PETG e uma variação de até aproximadamente 2,5 °C na temperatura de transição vítrea (Tg) não é suficiente, isoladamente, para indicar modificações estruturais no polímero (SILVA *et al.*, 2017; NIETO *et al.*, 2021).

A Figura 60 apresenta os valores médios do módulo de armazenamento (E') das amostras, obtidos por DMA.

Figura 60 - Valores do módulo de armazenamento (E') máximo.



Fonte: Autoral

Observa-se que os resultados ficaram aleatórios. As amostras que apresentaram módulo menor comparado com o grupo de 0 horas foi o de 100, 600 e 1000 horas. O grupo controle apresentou um desvio padrão relativamente elevado, indicando maior dispersão dos resultados. Além disso, os tempos de 200, 400 e 800 horas mostraram-se estatisticamente equivalentes ao grupo de 0 horas, sugerindo que, dentro dessa faixa de exposição, a radiação UV não promoveu alterações significativas nas propriedades mecânicas do material.

Com isso, ao relacionar os resultados de E' com os tempos de exposição, é possível afirmar que a aleatoriedade observada entre os grupos pode estar relacionada a instabilidades no processo de impressão por FFF, decorrentes de variações no fluxo de extrusão e na adesão entre camadas. Essa teoria pode ser embasada com as imagens de MEV ilustradas anteriormente, onde foi evidenciado a falta de fluxo de algumas amostras.

Além disso, a ausência de tendência definida e a estabilidade da T_g pode indicar que o material não sofreu degradação significativa ao longo da exposição à radiação UV. Embora o ensaio de tração tenha mostrado variações nas propriedades mecânicas, o DMA não apresentou tendência definida, essa diferença ocorre porque o ensaio de tração é sensível a mudanças interlaminares e adesão entre camadas,

enquanto o DMA mede a resposta viscoelástica intrínseca do material em pequenas deformações. Como a degradação foi mínima, os efeitos observados parecem resultar de rearranjos físicos localizados, perceptíveis apenas no comportamento macroscópico, sem alterar a mobilidade molecular das cadeias poliméricas (FECHINE *et al.*, 2022).

5.3.1.4 Ensaio de Colorimetria: degradação UV

Para o estudo de colorimetria foram realizadas medidas colorimétricas em todas as amostras impressas. É importante destacar que o cálculo do ΔE requer os valores de L^* , a^* e b^* obtidos antes e depois da degradação. Por isso, nesta análise não foi utilizado um grupo controle, uma vez que a comparação foi realizada entre as medições de cor da própria amostra, antes e após o processo de degradação.

O ΔE é utilizado para quantificar a diferença entre duas cores, ou nesse caso, a variação de cor de uma mesma amostra durante o processo de exposição à radiação UV. Para materiais poliméricos, essa alteração de cor pode ocorrer ao longo do tempo, sendo uma consequência natural da sua exposição a agente externos. A interpretação dos valores de ΔE está diretamente relacionada à percepção visual humana. A Tabela 20 mostra os valores do ΔE e a interpretação da diferença de cor de cada um deles.

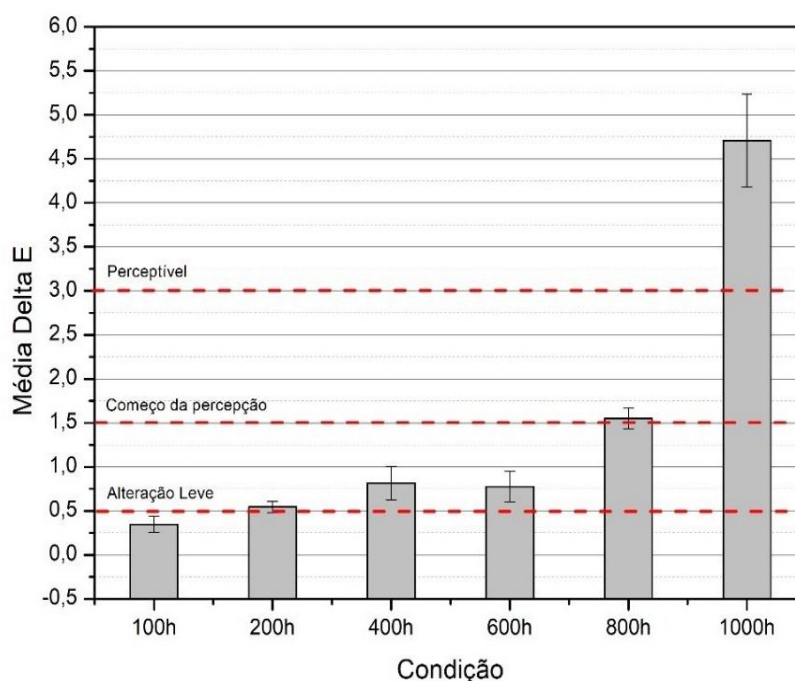
Tabela 20 – Diferenciação de cor de acordo com os valores de ΔE .

Faixa de ΔE	Interpretação da Diferença de Cor
$\Delta E < 0,5$	Sem alterações
$0,5 < \Delta E \leq 1,5$	Alteração leve
$1,5 < \Delta E \leq 3,0$	Começo da percepção
$\Delta E > 3,0$	Perceptível

Fonte: Adaptado de PERIM (2018).

A média dos valores de ΔE obtidos das amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento UV estão ilustrados na Figura 61.

Figura 61 - Valores do ΔE para as amostras de colorimetria.



Fonte: Autoral.

Observa-se que o aumento do ΔE ocorreu de forma progressiva, refletindo a intensificação da alteração de cor das amostras com o maior tempo de exposição à radiação UV. As amostras expostas por 100 e 200 horas não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si, sugerindo que, até esse intervalo, a degradação ainda não foi suficiente para promover mudanças visuais perceptíveis. De forma semelhante, os tempos de 400 e 600 horas também não mostraram diferença entre si, embora já tenham sido identificadas alterações de cor. A partir de 800 horas de exposição, contudo, nota-se um aumento significativo no ΔE , suficiente para tornar a alteração de cor visível a olho nu. Por fim, em 1000 horas observou-se o maior valor de ΔE (4,7), evidenciando que esse nível de exposição UV induziu modificações cromáticas mais acentuadas e perceptíveis no material em relação à sua coloração original.

De modo geral, os resultados confirmam que a radiação UV afeta a cor das peças de PETG submetidas ao ensaio de radiação UV, embora alterações significativas só foram detectadas após longos tempos de exposição, confirmando que o PETG apresenta boa resistência à radiação UV e estabilidade frente ao envelhecimento acelerado e pode ter tipo uma degradação superficial leve.

O artigo de CRESSALL *et al.*, (2024) foi feito o estudo da radiação de raios gama no PETG, nos mesmos tempos de exposição desse trabalho. Os autores afirmaram que as propriedades físico-químicas e mecânicas do material foram pouco alteradas após a exposição à radiação gama, indicando que o copolímero apresenta elevada resistência à degradação induzida por irradiação gama e ultravioleta.

Além das hipóteses criadas a partir da análise de dados provenientes dos ensaios utilizados neste trabalho foram criadas hipóteses embasadas em outros estudos. Uma delas é o efeito da posição da peça na mesa de impressão. No estudo de Santana *et al.*, (2018) mostra que diferenças de temperatura e resfriamento em distintas regiões da mesa de impressão podem alterar a microestrutura do material, mesmo sob os mesmos parâmetros de fatiamento. Tais variações podem introduzir vieses sutis nos ensaios, mascarando a diferença entre os tempos de radiação.

O artigo de Koçar *et al.*, (2025) estuda a respostas ao envelhecimento UV de PLA com diferentes cores, mostrando que a cor interfere na resposta a radiação. A hipótese é que por nossas amostras serem de material transparente podem ter amenizado o efeito da radiação.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou a viabilidade do uso do PETG para manufatura aditiva por extrusão de filamento fundido (FFF), evidenciando a estabilidade do material frente a diferentes condições de exposição e a influência dos parâmetros de impressão sobre suas propriedades finais. Foi possível produzir peças com boa qualidade superficial, adesão entre camadas e estabilidade dimensional, confirmando a compatibilidade do material com o processo FFF, apesar de algumas terem apresentado problemas de fluxo.

A análise comparativa entre três fornecedores comerciais de PETG mostrou que, embora todos apresentem comportamento químico e térmico semelhante, existem diferenças importantes quanto à viscosidade, resposta mecânicas, dinâmicas mecânicas, térmicas e dispersão dos resultados. O filamento da marca A apresentou melhor desempenho mecânico, maior módulo de armazenamento (E') e estabilidade térmica, destacando-se como o mais estável no conjunto de ensaios realizados. No entanto, a marca B foi selecionada para os estudos de degradação por apresentar o melhor equilíbrio entre desempenho técnico e custo-benefício, enquanto o material da marca C apresentou elevada viscosidade e falhas de extrusão, sendo o menos indicado para aplicações em manufatura aditiva.

A exposição das amostras impressas em meio aquoso, tanto destilado quanto salino, a 70 °C durante dez semanas, resultou em baixa absorção de água (inferior a 1%), confirmando a reduzida higroscopicidade e a boa estabilidade dimensional do PETG. As análises de tração e DMA mostraram apenas pequenas variações nas propriedades mecânicas, atribuídas a fenômenos físicos de relaxação de tensões internas e melhoria da coesão interlaminar, e não à ocorrência de degradação química ou estrutural. A diminuição discreta da T_g e do módulo de armazenamento confirmou a ocorrência de plastificação por água, efeito associado à inserção de moléculas de água entre as cadeias poliméricas, que aumenta sua mobilidade sem comprometer a integridade molecular do material.

Na etapa de envelhecimento acelerado sob radiação ultravioleta, o PETG apresentou excelente estabilidade estrutural e térmica, mantendo praticamente inalteradas suas bandas características no FTIR, ausência de picos de cristalinidade no DRX e variação de apenas 2,5 °C na T_g ao longo de 1000 h de exposição. As

análises mecânicas indicaram leve aumento na resistência à tração, particularmente até 600 h, comportamento atribuído ao rearranjo físico entre camadas induzido pela temperatura interna da câmara (50 °C), que pode ter promovido alívio de tensões residuais e reforço interlaminar. As análises de DSC descartaram processos de reticulação ou annealing, confirmando que o aumento observado na resistência decorre de modificações físicas localizadas, e não de transformações químicas permanentes. As imagens de MEV corroboraram essa hipótese, revelando maior continuidade superficial e redução de vazios nas amostras expostas por longos períodos, enquanto a análise de colorimetria mostrou que alterações perceptíveis de cor ocorreram apenas após 800 h, reforçando a elevada resistência fotoquímica do material.

De modo geral, os resultados obtidos neste trabalho demonstram que o PETG apresenta alta estabilidade frente à radiação ultravioleta e à imersão em meio aquoso, sofrendo apenas pequenas modificações físicas e sem evidências de degradação significativa. As variações observadas nas propriedades mecânicas e térmicas foram sutis e estão mais relacionadas a fatores intrínsecos do processo de impressão, como variações de fluxo, adesão entre camadas e controle térmico, do que à ação dos agentes de envelhecimento. Assim, conclui-se que o PETG é um material altamente estável e promissor para aplicações externas e em ambientes marinhos, reunindo boa resistência mecânica, estabilidade térmica e durabilidade frente à exposição ambiental, desde que o processo de manufatura aditiva seja conduzido com controle rigoroso dos parâmetros de impressão para garantir reprodutibilidade e consistência no desempenho das peças fabricadas.

7 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

1. Avaliação da degradação por um tempo de exposição maior: O ensaio de água durou 10 semanas e na câmara UV foi de 1000 horas, seria interessante repetir os testes e ver em qual duração ocorre uma alteração de estrutura no PETG significativa;
2. Ensaaios com outros polímeros: Comparar a resistência de outros materiais à degradação UV e por absorção de água ajudaria na escolha de filamentos mais duráveis para os ambientes de estudo.
3. Estudo da influência da espessura da amostra: Avaliar se o grau de absorção de água ou degradação UV é afetado pela geometria e espessura das peças impressas, o que é relevante para peças reais

8 INFRAESTRUTURA

Quadro 1 – Infraestrutura disponível para realização das atividades propostas do projeto de mestrado.

Atividades propostas		Recurso(s) disponível(is)	Local
Preparação de amostras	Preparação de peças via fabricação por filamento fundido	Impressora 3D CR-30 (Creality)	Laboratório de Polímeros e Compósitos (POLICOM)
Estimar o consumo de material	Análise de densidade	Balança de precisão	
Caracterização de propriedades térmicas e termodinâmico-mecânicas	Análise termogravimétrica (TGA)	STA 449 F1 Jupiter (Netzsch)	Laboratório de Materiais (LABMAT)
	Análise termodinâmica-mecânica (DMA)	DMA 242 E Artemis (Netzsch)	
Caracterização de propriedades mecânicas	Ensaaios mecânicos de tração	Acumen Eletrodinamic Test System (MTS)	
Caracterização das propriedades químicas	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	TENSOR 27 (Bruker)	
Caracterizações morfológicas	Microscopia óptica (MO)	DM4000 M LED (Leica)	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCM)
	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	VEGA3 (TESCAN)	
Degradação	Câmera de envelhecimento UV e envelhecimento salino		Laboratório de Controle e Processos de Polimerização (LCP)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo I: Parâmetro de impressão das peças

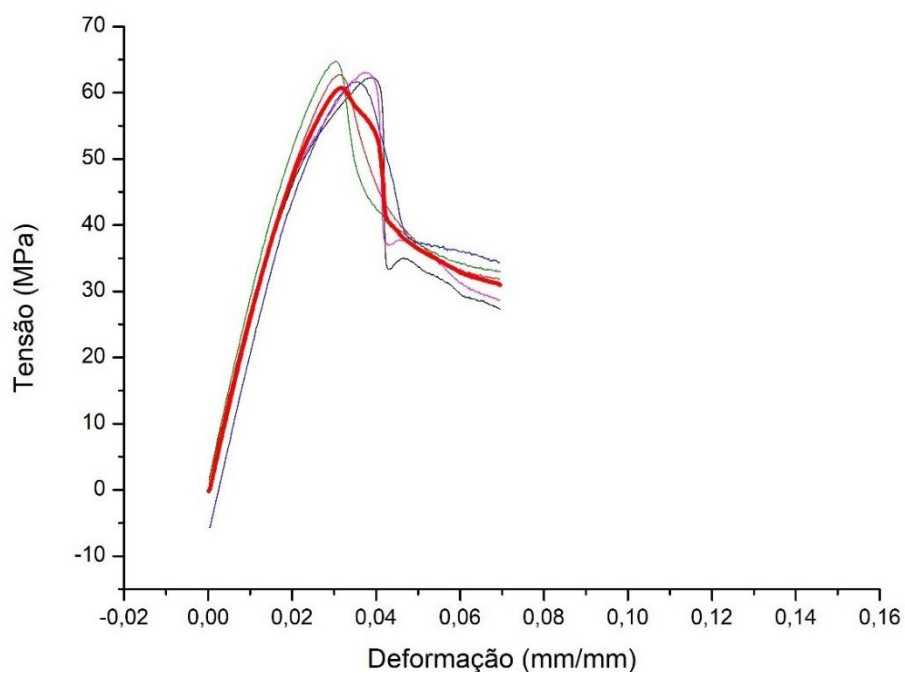
Parâmetros	Benchy	Torre de temperatura	OverHang	Multiplicador de extrusão	Torre de velocidade	Amostra DMA	Amostra tração
Temperatura Bico (°C)	235	225 até 245	235	235	235	235	235
Mesa (°C)	70	70	70	70	70	70	70
Diâmetro do filamento (mm)	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
Diâmetro do bico (mm)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cor do Filamento	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente	Transparente
Material	PETG	PETG	PETG	PETG	PETG	PETG	PETG
Multiplicador de extrusão	1	1	1	1	1	1	1
Altura da camada (mm)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,008	0,008
Altura da primeira camada (mm)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Perímetros	2	2	2	3	3	2	2
Camadas sólidas (Topo)	5	5	5	3	3	2	2
Camadas sólidas (Base)	4	4	4	3	3	2	2
Espessura mínima da concha (Topo)	0	0	0	0	0	0	0
Espessura mínima da concha (Base)	0	0	0	0	0	0	0
Densidade de preenchimento (%)	15%	100%	15%	100%	100%	100%	100%

Padrão de preenchimento	Grade	Grade	Grade	Grade	Grade	Grade	Grade	Grade
Padrão de preenchimento do topo	Monotônico	Monotônico	Monotônico	Monotônico	Monotônico	Monotônico	Rectilíneo Alinhado	Rectilíneo Alinhado
Padrão de preenchimento da base	Monotônico	Monotônico	Monotônico	Monotônico	Monotônico	Monotônico	Rectilíneo Alinhado	Rectilíneo Alinhado
Ângulo de preenchimento (°)	45	45	45	45	45	45	0	0
Voltas	1	1	1	1	1	1	1	1
Distância da aba (mm)	3	3	3	3	3	3	3	3
Altura da saia	2	2	2	2	2	2	2	2
Suporte	Sem	Sem	Sem	Sem	Sem	Sem	Sem	Sem
Velocidade de perímetros (mm/s)	60	60	60	20	20	20	20	20
Perímetro pequeno (mm/s)	25	25	25	20	20	25	25	25
Perímetro externo (mm/s)	25	25	25	20	20	25	25	25
Velocidade de preenchimento (mm/s)	50	50	50	40	40	50	50	50
Preenchimento sólido (mm/s)	40	40	40	40	40	40	40	40
Preenchimento sólido topo (mm/s)	30	30	30	40	40	30	30	30
Material de suporte (mm/s)	40	40	40	40	40	40	40	40
Pontes (mm/s)	25	25	25	25	25	25	25	25

Preenchimento de vão (mm/s)	30	30	30	30	30	30	30
Deslocamento (mm/s)	150	150	150	150	150	150	150
Z deslocamento (mm/s)	0	0	0	0	0	20	20
Velocidade da primeira camada (mm/s)	20	20	20	20	20	20	20
Largura de extrusão padrão (mm)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Espessura da primeira camada (mm)	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Comprimento de retração (mm)	5	5	5	5	5	5	5
Velocidade de retração (mm/s)	60	60	60	60	60	60	60

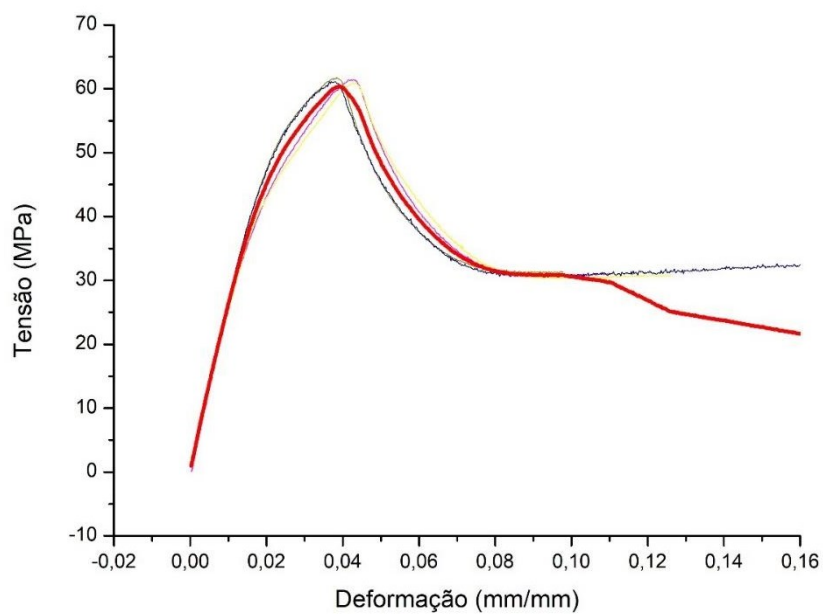
9 APÊNDICES

Figura 61 – Gráfico de tensão versus deformação para 100 horas de exposição UV.



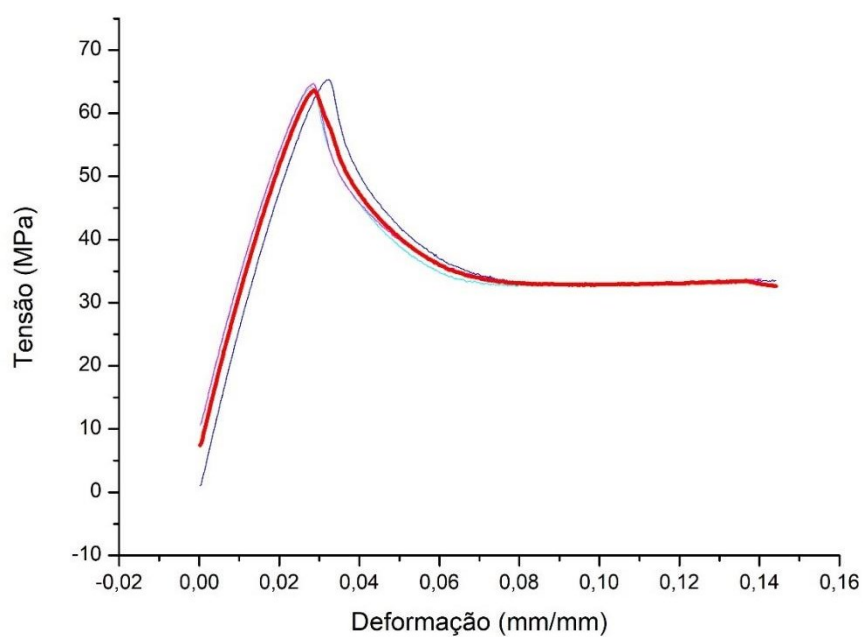
Fonte: Autoral

Figura 62 - Gráfico de tensão versus deformação para 200 horas de exposição UV.



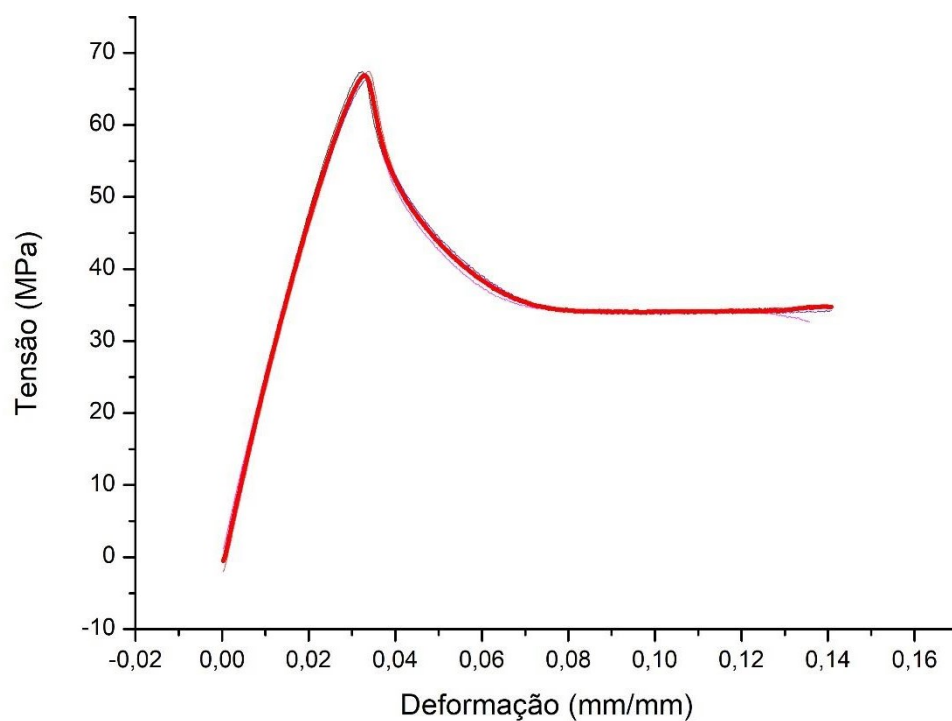
Fonte: Autoral

Figura 63 - Gráfico de tensão versus deformação para 400 horas de exposição UV.



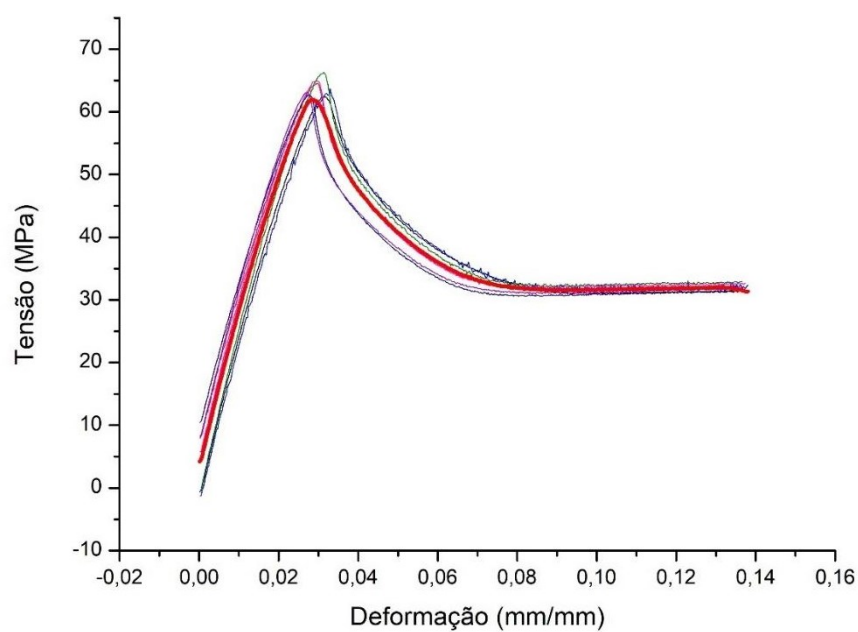
Fonte: Autoral

Figura 64 - Gráfico de tensão versus deformação para 600 horas de exposição UV.



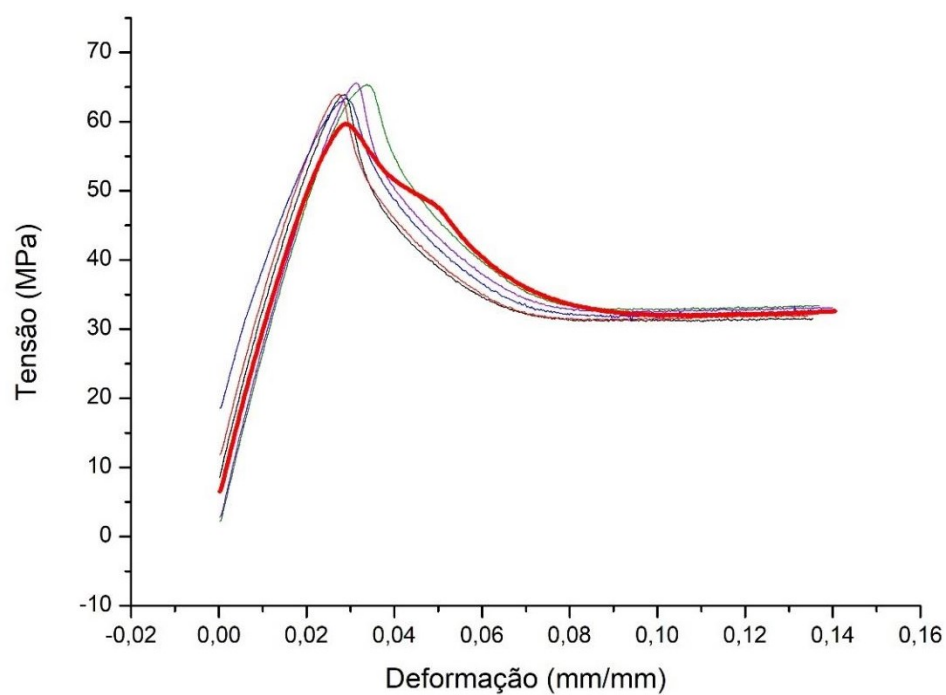
Fonte: Autoral

Figura 65 - Gráfico de tensão versus deformação para 800 horas de exposição UV.



Fonte: Autoral

Figura 66 - Gráfico de tensão versus deformação para 1000 horas de exposição UV.



Fonte: Autoral

10 REFERÊNCIAS

AHN, Sung-Hoon et al., Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. **Rapid Prototyping Journal**, v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002.

AJAY KUMAR, M.; KHAN, M. S.; MISHRA, S. B. **Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics. Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 975–983, 2020.

ALL ABOUT PETG PLASTIC. **Everything you need to know**. 2024. Disponível em: https://eureka.patsnap.com/blog/what-is-petg-plastic/#How_is_PETG_Plastic_Made. Acesso em: 26/03/2025.

AMBRÓS, Guilherme Silva. **Influência dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de corpos de prova impressos em PLA utilizando modelagem por fusão e deposição**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/19869>

AMZA, C. G. et al., Aging of 3D printed polymers under sterilizing UV-C radiation. **Polymers**, v. 13, n. 24, p. 4467, 2021.

AMZA, C. G. et al., Accelerated aging effect on mechanical properties of common 3D-printing polymers. **Polymers**, v. 13, n. 23, p. 4132, 2021.

ANTOLIN, Mauricio Quelhas et al., Avaliação do PETG para utilização em embarcações transparentes. **CIPPUS-REVISTA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**, v. 11, n. 1, 2023.

BALOU, Salar; AHMED, Isteaque; PRIYE, Aashish. From waste to filament: development of biomass-derived activated carbon-reinforced PETG composites for sustainable 3D printing. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, n. 34, p. 12667-12676, 2023.

BALTIC, Marija Z. et al., PETG as an alternative material for the production of drone spare parts. **Polymers**, v. 16, n. 21, p. 2976, 2024.

BARNES, Howard A. **Manual de reologia elementar**. Aberystwyth: Universidade de Gales, Instituto de Mecânica de Fluidos Não-Newtonianos, 2000.

BARCELOS, Ricardo Luís; LERIPIO, Alexandre Ávila. Avaliação do Desempenho Ambiental da Cadeia Produtiva de Pranchas de Surfe em Florianópolis-SC. **Revista Alcance**, v. 24, n. 3, p. 413-432, 2017.

BEDI, Chandni; KANSAL, Arun; MUKHEIBIR, Pierre. A conceptual framework for the assessment of and the transition to liveable, sustainable and equitable cities. **Environmental Science & Policy**, v. 140, p. 134-145, 2023.

BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gestão Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 3, p. 9-18, 2017.

BIRENDRA, Chaudhary; LI, Hewenxuan; MATOS, Helio. Long-term mechanical performance of 3D printed thermoplastics in seawater environments. **Results in Materials**, v. 17, p. 100381, 2023.

BLOK, Lourens G. et al., An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. **Additive Manufacturing**, v. 22, p. 176-186, 2018.

BRITO, Walter Ricardo. **Aplicação de nanotubos de carbono modificados com ANTI-PfHRP2 no desenvolvimento de imunossensor eletroquímico para a detecção da malária**. Ciência dos Materiais: Pesquisas e Desenvolvimento no Âmbito da UFAM, v. 8, p. 1-20, 2021.

CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, R. Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials & Design**, v. 83, p. 768–776, 2015.

CARVALHO, Jonas de; VOLPATO, Neri. Prototipagem rápida como processo de fabricação. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Blücher, 2007.

DE CASTRO, Francisco Forte Alvim. **Análise da influência da pigmentação na qualidade de peças impressas por FFF em PLA e PETG**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

CAVALCANTE, Alexandre Araripe et al., Correlação entre parâmetros de impressão 3D e a resistência mecânica anisotrópica de peças impressas em PLA. 2022.

CHEN, Tingting; ZHANG, Jun; YOU, Hongjun. Photodegradation behavior and mechanism of poly(ethylene glycol-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate) (PETG) random copolymers: correlation with copolymer composition. **RSC Advances**, v. 6, n. 104, p. 102778–102790, 2016.

COSTA, Carolina Zanon et al., Degradação microbiológica e enzimática de polímeros: uma revisão. **Química Nova**, v. 38, p. 259-267, 2015.

CUTHBERTSON, Amy A. et al., Characterization of polymer properties and identification of additives in commercially available research plastics. **Green Chemistry**, v. 26, n. 12, p. 7067-7090, 2024.

CRANK, J. Diffusion in polymers. In: CRANK, J. The mathematics of diffusion. 2. ed. **Oxford: Clarendon Press**, 1975. p. 243–268.

GARCIA, Maria Alonso; NIETO, Daniel Moreno. Product design by additive manufacturing for water environments: study of degradation and absorption behavior of PLA and PETG. **Polymers**, v. 13, n. 7, p. 1036, 2021.

GIBSON, Ian et al., **Additive manufacturing technologies**. Cham, Switzerland: Springer, 2021.

GOMES, ALEXANDRE MIRANDA; ALVES, BRUNO VALERIO; BOUZON, MARINA. Análise de barreiras para a logística reversa do poliestireno expandido: uma investigação em uma empresa recicladora de EPS no Brasil. **Anais do 18º Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**. São Paulo: FEA-USP, 2016.

GÓMEZ, E. F.; MICHEL, F. C. Environmental degradation of polymers. In: KUTZ, Myer (ed.). **Handbook of environmental degradation of materials**. 2. ed. Norwich: William Andrew, 2013.

GOYANES, A. et al., Effect of geometry on drug release from 3D printed tablets. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 494, n. 2, p. 657–663, 2015.

GUDER, Marian et al., Revealing the impact of viscoelastic characteristics on performance parameters of UV-crosslinked hotmelt pressure-sensitive adhesives: insights from time–temperature superposition analysis. **Polymers**, v. 16, n. 15, p. 2123, 2024.

HAN, Pu; ZHANG, Sihan; TOFANGCHI, Alireza; HSU, Keng. Relaxation of residual stress in fused filament fabrication part with in-process laser heating. **Procedia Manufacturing**, v. 53, p. 135–142, 2021.

JANUTĖNIENĖ, Jolanta et al., Influence of recycling and UV exposure on the properties of 3D printing polymer materials. **Polymers**, v. 16, n. 23, p. 3292, 2024.

KATTAN, M. et al., Strain-induced crystallization in uniaxially drawn PETG plates. **Journal of applied polymer science**, v. 81, n. 14, p. 3405-3412, 2001.

PATEL, Kautilya S. et al., Effect of process parameters on the mechanical performance of FDM printed carbon fiber reinforced PETG. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 30, p. 8006-8018, 2024.

KRAWULSKI, Patryk; PANASIUK, Katarzyna; TYLISZCZAK, Mirosław. Effect of Temperature and Printing Angle in FDM Additive Printing on the Strength Properties of PET-G. **Scientific Journal of Gdynia Maritime University**, n. 132, p. 57-69, 2024.

KUNKEL, Maria Elizete et al., **Mass-production and distribution of medical face shields using additive manufacturing and injection molding process for healthcare system support during COVID-19 pandemic in Brazil**. 2020.

LAKSHMAN, Sri S. V.; K. A.; outros. Evaluation of mechanical properties of 3D printed PETG and polyamide (6) polymers. **Chemical Physics Impact**, v. 8, n. 3, p. 100491, 2024.

JO, Kwang-Ho et al., A study of post-processing methods for improving the tightness of a part fabricated by fused deposition modeling. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 17, n. 11, p. 1541-1546, 2016.

LOSKOT, Jan et al., Influence of print speed on the microstructure, morphology, and mechanical properties of 3D-printed PETG products. **Polymer Testing**, v. 123, p. 108055, 2023.

LÓPEZ, Birendra; LI, Hewenxuan; MATOS, Helio. Long-term mechanical performance of 3D printed thermoplastics in seawater environments. **Results in Materials**, v. 17, p. 100381, 2023.

LUBOMIR, S. et al., PETG as an alternative material for the production of drone spare parts. **Polymers**, v. 16, n. 21, p. 2976, 2024.

MACHADO, Maria Carolina Karvowski; COSTA, Mayara Almeida da. **Logística reversa do poliestireno expandido: um estudo de caso na região de Ponta Grossa**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MARMITT, Sandro; PIROTTA, Lilian V.; STÜLP, Simone. Aplicação de fotólise direta e UV/H₂O₂ a efluente sintético contendo diferentes corantes alimentícios. **Química Nova**, v. 33, p. 384-388, 2010.

CRUZ-MEDINA, Rodybeth et al., Curing of cellulose hydrogels by UV radiation for mechanical reinforcement. **Polymers**, v. 13, n. 14, p. 2342, 2021.

MORENO NIETO, Daniel; ALONSO-GARCÍA, Maria; PARDO-VICENTE, M. A.; RODRÍGUEZ-PARADA, L. Product design by additive manufacturing for water environments: study of degradation and absorption behavior of PLA and PETG. **Polymers**, v. 13, n. 7, p. 1036, 2021.

ROSTAMPOUR, Sara et al., Changes in the chemical composition of polyethylene terephthalate under UV radiation in various environmental conditions. **Polymers**, v. 16, n. 16, p. 2249, 2024.

MUV – MANUFATURA ADITIVA DIGITAL. Tolerâncias da peça e a impressão 3D. 2024. Disponível em: <https://blog.muv.ind.br/tolerancias-da-peca-e-a-impressao-3d>. Acesso em: 26 nov. 2025.

NICOARĂ, A. I. et al., Effects of UV radiation on PETG: mechanical and chemical degradation. **TEM Journal**, v. 12, n. 4, p. 1921–1928, 2021.

NOVAK, James. **A parametric method to customize surfboard and stand up paddle board fins for additive manufacturing**. 2021.

OLIVEIRA, Allisson Morais de. **Estudo da influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas de materiais usuais: uma revisão de literatura**. 2021.

ÖZTÜRK, Fatih Huzeyfe; ÖZ, Özkan. Heat-treatment and water immersion effect on the mechanical properties and joint strength of 3D-printed polylactic acid parts. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 35, n. 11, e6624, 2024.

PAIVA, Jane M. F. de et al., DE USO AERONÁUTICO, Compósitos Poliméricos Reparados. Avaliação da Temperatura de Transição Vítrea de. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 1, p. 79-87, 2006.

PASZKIEWICZ, Sandra et al., Synthesis and characterization of poly (ethylene terephthalate-co-1, 4-cyclohexanedimethylene terephthalate)-block-poly (tetramethylene oxide) copolymers. **RSC advances**, v. 7, n. 66, p. 41745-41754, 2017.

PATEL, Kautilya S. et al., Effect of process parameters on the mechanical performance of FDM printed carbon fiber reinforced PETG. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 30, p. 8006-8018, 2024. PAVIA, et al., Introduction to spectroscopy. 2015.

PEREIRA, Carolina Perim et al., Avaliação de propriedades ópticas de placas em poliéster (PETG) fabricadas em impressora 3D de código aberto. **Universidade Federal de Santa Catarina**, 2018.

PHILIPS. Philips Brasil. Disponível em: <https://www.philips.com.br/>. Acesso em: 26 nov. 2006.

RABELLO, M. S.; WHITE, J. R. The role of physical structure and morphology in the photodegradation behaviour of polypropylene. **Polymer Degradation and Stability**, v. 56, n. 1, p. 55-73, 1997.

RAMALHO, João Pedro Valente. **Comparison between PLA Filaments from Different Suppliers: An Analysis of the Effects of Process Parameters and Polymeric Degradation Mechanisms on the Quality of FFF Parts**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

GROSSETÊTE, T. et al., Photochemical degradation of poly (ethylene terephthalate)-modified copolymer. **Polymer**, v. 41, n. 10, p. 3541-3554, 2000.

RODRIGUES, Leonardo Pereira Sarmento. **Efeitos do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

RODOLFO JR, Antonio; MEI, Lúcia Helena I. Mecanismos de degradação e estabilização térmica do PVC: a review. **Polímeros**, v. 17, p. 263-275, 2007.

ROSSATO, J. H. H.; LEMOS, H. G.; MANTOVANI, G. L. The influence of viscosity and composition of ABS on the ABS/SBS blend morphology and properties. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 8, p. 47075, 2019.

SANTANA, Leonardo et al., Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4, p. e12267, 2018.

SANTANA, Leonardo et al., **Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA**. 2015.

SANTANA, Leonardo. **Avaliação das capacidades da impressão 3D de baixo custo na fabricação de snap-fits: uma relação de reconhecimento usuário-sistema de impressão**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade do Porto (Portugal).

SAZALI, N. et al., Degradation and stability of polymer: a mini review. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 788, p. 012048, 2020

SEDLAK, Josef et al., Analysis of the mechanical properties of 3D-printed plastic samples subjected to selected degradation effects. **Materials**, v. 16, n. 8, p. 3268, 2023.

SILVA, Arthur Bicalho Carneiro; BACARIN, Rodrigo. Parâmetros de impressão relacionados com a impressão 3D. **Faculdade Anhanguera – Unidade Contagem**, 2022.

DA SILVA, Katia Alexandra Martins Dias. **Análise do envelhecimento acelerado de polímeros**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro (Portugal).

SILVA, André Luiz Emmel et al., Mapeamento da produção científica acerca do uso de biocompósitos nos processos de impressões 3D. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 236-250, 2020.

SILVA, Carolina Fernandes da. **Esportes náuticos e aquáticos no Rio Grande do Sul, Brasil: a esportivização e contatos culturais nos clubes**. 2015.

SILVERSTEIN, Robert M.; BASSLER, G. Clayton. Spectrometric identification of organic compounds. **Journal of Chemical Education**, v. 39, n. 11, p. 546, 2014.

SZTORCH, Bogna et al., THE IMPACT OF MULTIFUNCTIONAL POLYSILOXANES ON ENHANCING THE PROPERTIES OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL (PET-G) FOR FDM/FFF 3D-PRINTING. **acta mechanica et automatica**, v. 19, n. 2, 2025.

SOLA, Antonella. Materials requirements in fused filament fabrication: a framework for the design of next-generation 3D printable thermoplastics and composites. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 307, n. 10, p. 2200197, 2022.

GEORGE, Socrates. Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts. **Wiley, Chichester**, v. 82, p. 85-87, 2001.

SRIVASTAVA, Manu et al., A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 21, p. 2612-2641, 2022.

STAMBER, Ramírez Revilla. Evaluation and comparison of the degradability and compressive and tensile properties of 3D printing polymeric materials: PLA, PETG, PC, and ASA. **MRS Communications**, v. 13, p. 55–64, 2023.

SZTORCH, Bogna et al., THE IMPACT OF MULTIFUNCTIONAL POLYSILOXANES ON ENHANCING THE PROPERTIES OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL (PET-G) FOR FDM/FFF 3D-PRINTING. **acta mechanica et automatica**, v. 19, n. 2, 2025.

CARNEIRO, Olga S.; SILVA, A. F.; GOMES, Rui. Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials & Design**, v. 83, p. 768-776, 2015.

SUN, Q. et al., Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid prototyping journal**, v. 14, n. 2, p. 72-80, 2008.

SUN, Q. et al., **Experimental study of the cooling characteristics of polymer filaments in FDM and impact on the mesostructures and properties of prototypes**. 2003.

TATINI, Duccio et al., Light-modulated rheological properties in green innovative formulations. **Substantia**, v. 6, n. 2, p. 15-26, 2022.

THINGIVERSE. Thingiverse. 2024. Disponível em: <https://thingiverse.com/>. Acesso em: 15 out. 2025.

TROSSAERT, Lynn et al., The potential of virgin Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) grades and their blends with waste PET (G) for filament-based material extrusion applications. **Additive Manufacturing**, v. 97, p. 104602, 2025.

N. TURNER, Brian; STRONG, Robert; A. GOLD, Scott. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid prototyping journal**, v. 20, n. 3, p. 192-204, 2014.

VALVEZ, Sara; SILVA, Abílio P.; REIS, Paulo. Annealing effect on mechanical properties of 3D printed composites. **Procedia Structural Integrity**, v. 37, p. 738–745, 2022.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Editora Blucher, 2021.

CARVALHO, Jonas de; VOLPATO, Neri. Prototipagem rápida como processo de fabricação. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Blücher, 2007.

WANG, C. et al., Effect of drying treatment on the physical and mechanical properties of material extrusion-based 3D-printed PETG models. **BioResources**, v. 20, n. 3, p. 7000–7009, 2025.

YAN, Catherine et al., PETG: applications in modern medicine. **Engineered Regeneration**, v. 5, n. 1, p. 45-55, 2024.

YOST, Sierra F. et al., Physical aging and evolution of mechanical properties of additively manufactured polyethylene terephthalate glycol. **RSC Applied Polymers**, 2025.

ZIEMIAN, Constance; SHARMA, Mala; ZIEMIAN, Sophia. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling. **Mechanical engineering**, v. 23, p. 159-180, 2012.

ZAMBON, Matheus Moraes; LUNA, Mônica Maria Mendes; DE SOUZA CAMPOS, Lucila Maria. Pranchas de surfe de diferentes materiais: uma análise da

logística reversa/Surfboards of different materials: a reverse logistics analysis. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade (ISSN 2318-3233)**, v. 6, n. 1, p. 139-155, 2016.