



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO E SEPARAÇÃO DE POLÍMEROS RECICLADOS
PARA APLICAÇÃO NA IMPRESSÃO 3D**

ANDRÉ DE SOUZA GOMES

Foz do Iguaçu
2025

**TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO E SEPARAÇÃO DE POLÍMEROS RECICLADOS
PARA APLICAÇÃO NA IMPRESSÃO 3D**

ANDRÉ DE SOUZA GOMES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Priscila Lemes
Coorientadora: Profa. Dra. Liliane Cristina Battirola

Foz do Iguaçu
2025

ANDRÉ DE SOUZA GOMES

**TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO E SEPARAÇÃO DE POLÍMEROS RECICLADOS
PARA APLICAÇÃO NA IMPRESSÃO 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Profa. Dra. Priscila Lemes
UNILA

Coorientadora: Profa. Dra. Liliane Cristina Battirola
UNIOESTE

Profa. Dra. Daiane Calheiro Evaldt
UNILA

Eng. William Cândido Ribeiro

Foz do Iguaçu, 07 de Agosto de 2025.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): André de Souza Gomes

Curso: Engenharia de materiais

| | Tipo de Documento |
|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> graduação | <input type="checkbox"/> artigo |
| <input type="checkbox"/> especialização | <input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso <input type="checkbox"/> |
| mestrado | <input type="checkbox"/> monografia |
| <input type="checkbox"/> doutorado | <input type="checkbox"/> dissertação tese |
| | <input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais |
| | <input type="checkbox"/> (.....) |

Título do trabalho acadêmico: **TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO E SEPARAÇÃO DE POLÍMEROS RECICLADOS PARA APLICAÇÃO NA IMPRESSÃO 3D**

Nome do orientador(a): Profa. Dra. Priscila Lemes

Nome do coorientador(a): Profa. Dra. Liliane Cristina Battirola

Data da Defesa: 07 / 08 / 2025

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino- Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública **Creative Commons Licença 3.0 Unported**.

Foz do Iguaçu, 07 de Agosto de 2025.

Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho aos meus familiares,
amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho representa muito mais do que uma etapa acadêmica vencida. É o reflexo do apoio, incentivo e carinho de muitas pessoas que fizeram parte dessa jornada.

Agradeço primeiramente à minha família, base de tudo que sou. À minha mãe, Amanda Aparecida de Souza, por ser meu alicerce, por sempre acreditar no meu potencial, incentivar meus estudos e me apoiar incondicionalmente. Sem você, mãe, eu não teria chegado até aqui. À minha avó, Iracema de Souza, que sempre cuidou de mim com amor e dedicação, muitas vezes me auxiliando de maneiras que nem imaginava. Ao meu pai, Evandro Lopes Gomes, que mesmo à distância, sempre encontrou uma forma de estar presente e me apoiar, saiba que sua contribuição, mesmo que silenciosa, foi fundamental.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis, me fazendo rir quando eu mais precisava e tornando o caminho mais leve. Aos meus colegas de curso, por compartilharem comigo os aprendizados e tantas boas risadas ao longo dessa trajetória.

Sou profundamente grato aos técnicos da UNILA, que sempre estiveram dispostos a ajudar com prontidão e generosidade. Um agradecimento especial ao William C. Ribeiro e ao Francisco Gilmar Davi, pelo apoio nas etapas com impressoras e injetoras, e por tornarem o ambiente de pesquisa mais leve e agradável.

Expresso aqui também minha imensa gratidão à minha orientadora Priscila Lemes e à coorientadora Liliane Battirola. Vocês foram excepcionais em todos os sentidos. Obrigado pelas conversas, pelos conselhos, pelo incentivo constante, e por acreditarem em mim até mesmo quando eu duvidei. Vocês são inspirações profissionais e humanas, e eu seria imensamente feliz em ser, no futuro, ao menos metade dos profissionais que vocês são hoje.

Por fim, agradeço a Deus e ao meu anjo da guarda, por me guiarem em cada passo, me darem forças nos momentos de dúvida e nunca me deixarem desistir.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

*E aqueles que foram vistos
dançando foram considerados
loucos por aqueles que não podiam
ouvir a música.*

Friedrich Nietzsche

RESUMO

A reutilização de polímeros tem se destacado como alternativa sustentável para a fabricação de filamentos utilizados na impressão 3D. Essa prática reduz a dependência de materiais virgens e contribui para a diminuição dos resíduos plásticos. Este trabalho teve como objetivo a identificação, caracterização e reaproveitamento de resíduos poliméricos, visando sua aplicação na manufatura aditiva por meio da impressão 3D. As amostras foram separadas em seis grupos (01-FP a 06-FP) e submetidas a diversas análises: testes de bancada (visual, tátil, densidade, inflamabilidade e resistência ao risco), espectroscopia de infravermelho (FTIR), análise termogravimétrica (TGA), microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os testes revelaram a presença de polímeros como PP, PLA, PETG e TPU. A análise FTIR permitiu identificar grupos funcionais característicos, enquanto a TGA indicou perfis térmicos compatíveis com os polímeros propostos. O MEV mostrou variações morfológicas relevantes entre as amostras. Após a caracterização, as amostras foram trituradas, secas e transformadas em pellets para facilitar o processo de extrusão. Com ajustes nos parâmetros de temperatura, ventilação e velocidade, foi possível produzir filamentos com diâmetro adequado em quatro dos seis grupos. Esses filamentos foram utilizados para impressão 3D de peças simples, com bons resultados de acabamento, estabilidade e compatibilidade com impressoras convencionais. O estudo demonstra que, mesmo sem origem conhecida, resíduos poliméricos podem ser caracterizados e reaproveitados de forma eficiente, contribuindo para a sustentabilidade e a economia circular por meio da impressão 3D.

Palavras-chave: polímeros; impressão 3D; filamentos; sustentabilidade.

RESUMEN

La reutilización de polímeros se ha convertido en una alternativa sostenible para la fabricación de filamentos utilizados en la impresión 3D. Esta práctica reduce la dependencia de materiales vírgenes y contribuye a la reducción de residuos plásticos. Este estudio tuvo como objetivo identificar, caracterizar y reutilizar residuos de polímeros para su aplicación en la fabricación aditiva mediante impresión 3D. Las muestras se separaron en seis grupos (01-FP a 06-FP) y se sometieron a diversos análisis: pruebas de banco (visual, táctil, densidad, inflamabilidad y resistencia al rayado), espectroscopia infrarroja (FTIR), análisis termogravimétrico (TGA), microscopía electrónica de barrido (SEM). Las pruebas revelaron la presencia de polímeros como PP, PLA, PETG y TPU. El análisis FTIR identificó grupos funcionales característicos, mientras que el TGA indicó perfiles térmicos compatibles con los polímeros propuestos. El SEM reveló variaciones morfológicas significativas entre las muestras. Tras la caracterización, las muestras se molieron, secaron y transformaron en pellets para facilitar el proceso de extrusión. Mediante el ajuste de los parámetros de temperatura, ventilación y velocidad, se produjeron filamentos con diámetros adecuados en cuatro de los seis grupos. Estos filamentos se utilizaron para la impresión 3D de piezas sencillas, con buenos resultados de acabado, estabilidad y compatibilidad con impresoras convencionales. El estudio demuestra que, incluso sin un origen conocido, los residuos poliméricos pueden caracterizarse y reutilizarse eficientemente, contribuyendo a la sostenibilidad y la economía circular mediante la impresión 3D.

Palabras clave: polímeros; impresión 3D; filamentos; sostenibilidad.

ABSTRACT

Polymer reuse has emerged as a sustainable alternative for manufacturing filaments used in 3D printing. This practice reduces dependence on virgin materials and contributes to reducing plastic waste. This study aimed to identify, characterize, and reuse polymer waste for application in additive manufacturing through 3D printing. The samples were separated into six groups (01-FP to 06-FP) and subjected to various analyses: bench tests (visual, tactile, density, flammability, and scratch resistance), infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA), scanning electron microscopy (SEM). The tests revealed the presence of polymers such as PP, PLA, PETG, and TPU. FTIR analysis identified characteristic functional groups, while TGA indicated thermal profiles compatible with the proposed polymers. SEM revealed significant morphological variations among the samples. After characterization, the samples were ground, dried, and transformed into pellets to facilitate the extrusion process. By adjusting the temperature, ventilation, and speed parameters, filaments with adequate diameters were produced in four of the six groups. These filaments were used for 3D printing simple parts, with good finishing results, stability, and compatibility with conventional printers. The study demonstrates that, even without a known origin, polymeric waste can be characterized and reused efficiently, contributing to sustainability and the circular economy through 3D printing.

Keywords: polymers; 3D printing; filaments; sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| FIGURA 01 - FOTOGRAFIA DE RESINAS POLIMÉRICAS PARTICULADAS (PELLETS)... | 15 |
| FIGURA 02 - ESTRUTURA QUÍMICA DO POLIPROPILENO..... | 16 |
| FIGURA 03 - APLICAÇÕES DO POLIPROPILENO..... | 18 |
| FIGURA 04 - ESTRUTURA DO POLI (ÁCIDO LÁTICO)..... | 19 |
| FIGURA 05 - FÓRMULA QUÍMICA DO PETG..... | 20 |
| FIGURA 06 - SÍNTESE DO POLIURETANO..... | 22 |
| FIGURA 07 - PRODUTOS DE TPU..... | 24 |
| FIGURA 08 - INFOGRÁFICO RECICLAGEM..... | 28 |
| FIGURA 09 - RECICLAGEM MECÂNICA..... | 29 |
| FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DA RECICLAGEM QUÍMICA..... | 30 |
| FIGURA 11 - RECICLAGEM ENERGÉTICA..... | 31 |
| FIGURA 12 - PROCESSO DE FUSED DEPOSITION MODELING..... | 33 |
| FIGURA 13 - PROCESSO DE DLP E SLA..... | 34 |
| FIGURA 14 - PROCESSO DE SLS..... | 34 |
| FIGURA 15 - RECICLAGEM DE POLÍMEROS PARA UTILIZAÇÃO EM IMPRESSORAS 3D.. | 35 |
| FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA..... | 37 |
| FIGURA 17 - RESÍDUOS PLÁSTICOS COLETADOS NAS INSTALAÇÕES DO LABMAKER IGUAÇU..... | 38 |
| FIGURA 18 - A)MOINHO DE FACAS UTILIZADO E B) AMOSTRAS APÓS TRITURAÇÃO. | 39 |
| FIGURA 19 - MOLDE PISTÃO MATRIZ, NO A) VISTA DO PISTÃO-MATRIZ COM A INSERÇÃO METÁLICA NO MATERIAL POLIMÉRICO E B) VISTA DAS DUAS PARTES SEPARADAS APÓS O DESENCAIXE..... | 41 |
| FIGURA 20 - AMOSTRAS EM FORMATO DE DISCO, NA ORDEM DE A) AMOSTRA 01-FP, B) AMOSTRA 02-FP, C) AMOSTRA 03-FP, D) AMOSTRA 04-FP, E) AMOSTRA 05-FP, F) AMOSTRA 06-FP..... | 42 |
| FIGURA 21 - EQUIPAMENTO MEV..... | 45 |
| FIGURA 22 - EXTRUSORA FILABOT EX2..... | 46 |
| FIGURA 23 - IMPRESSORA CREALITY K1 MAX..... | 47 |
| FIGURA 24 - AMOSTRAS DO MEV. A) AMOSTRA 01-FP, B) AMOSTRA 02-FP, C) AMOSTRA 03-FP, D) AMOSTRA 04-FP, E) AMOSTRA 05-FP E F) AMOSTRA 06-FP..... | 53 |
| FIGURA 25 - ESPECTRO DE FTIR DAS AMOSTRAS..... | 56 |
| FIGURA 26 - TGA DAS AMOSTRAS ANALISADAS, A) AMOSTRA 01-FP E B) AMOSTRA 02-FP..... | 58 |
| FIGURA 27 - TGA DAS AMOSTRAS ANALISADAS, A) AMOSTRA 03-FP E B) AMOSTRA 04-FP..... | 59 |
| FIGURA 28 - TGA DAS AMOSTRAS ANALISADAS, A) AMOSTRA 05-FP E B) AMOSTRA 06-FP..... | 60 |
| FIGURA 29 - PELLETS DAS AMOSTRAS, NA ORDEM DE A) AMOSTRA 01-FP, B) AMOSTRA 02-FP, C) AMOSTRA 03-FP, D) AMOSTRA 04-FP, E) AMOSTRA 05-FP, F) AMOSTRA 06-FP..... | 61 |
| FIGURA 30 - COMPARAÇÃO COM DOS FILAMENTOS PRODUZIDOS, NO A) TEMOS FILAMENTOS DO GRUPO 06-FP, NO B) FILAMENTO 02-FP E C) FILAMENTO 01-FP..... | 63 |
| FIGURA 31 - FILAMENTOS PRODUZIDOS, SENDO A) FILAMENTO 02-FP; B) FILAMENTO 03-FP; C) FILAMENTO 04-FP; D) FILAMENTO 05-FP E E) FILAMENTO 06-FP. | |

64

FIGURA 32 - OBJETOS OBTIDOS POR IMPRESSÃO 3D DO FILAMENTO.....66

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 01 - PRODUÇÃO E RECICLABILIDADE DE DIFERENTES POLÍMEROS..... | 26 |
| TABELA 02 - TEMPERATURA UTILIZADA DE ACORDO COM REFERÊNCIAS DA LITERATURA..... | 40 |
| TABELA 03 - CARACTERÍSTICAS VISUAIS DAS AMOSTRAS ANALISADAS..... | 48 |
| TABELA 04 - CARACTERÍSTICAS TÁTEIS DAS AMOSTRAS ANALISADAS..... | 48 |
| TABELA 05 - TESTE DE RESISTÊNCIA AO RISCO..... | 49 |
| TABELA 06 - RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO TESTE DE DENSIDADE DAS AMOSTRAS ESTUDADAS..... | 49 |
| TABELA 07 - RESULTADOS DO TESTE DE INFLAMABILIDADE REALIZADO NAS AMOSTRAS ESTUDADAS..... | 50 |
| TABELA 08 - RESULTADOS OBTIDOS..... | 51 |
| TABELA 09 - POSSÍVEIS POLÍMEROS LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO OS TESTES REALIZADOS..... | 52 |
| TABELA 10 - QUADRO DE PICOS CARACTERÍSTICOS DOS POLÍMEROS..... | 55 |
| TABELA 11 - QUANTIDADE DE FILAMENTOS PRODUZIDOS E ALGUNS PARÂMETROS IMPORTANTES..... | 62 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2 OBJETIVOS..... | 14 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 15 |
| 3.1 POLÍMEROS..... | 15 |
| 3.2 POLIPROPILENO (PP)..... | 16 |
| 3.2.1 PROPRIEDADES..... | 17 |
| 3.2.2 APLICAÇÕES..... | 17 |
| 3.3 POLI (ÁCIDO LÁTICO)..... | 18 |
| 3.3.1 PROPRIEDADES..... | 19 |
| 3.3.2 APLICAÇÕES..... | 20 |
| 3.4 POLI(ETILENO TEREFALATO GLICOL) (PETG)..... | 20 |
| 3.4.1 PROPRIEDADES..... | 21 |
| 3.4.2 APLICAÇÕES..... | 22 |
| 3.5 POLIURETANO TERMOPLÁSTICO (TPU)..... | 22 |
| 3.5.1 PROPRIEDADES..... | 23 |
| 3.5.2 APLICAÇÕES..... | 24 |
| 4. PRODUÇÃO E CONSUMO DE POLÍMEROS..... | 24 |
| 5. DESENVOLVIMENTO E RECICLAGEM DE FILAMENTOS POLIMÉRICOS..... | 26 |
| 5.1 MÉTODOS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS..... | 29 |
| 5.1.1 RECICLAGEM MECÂNICA..... | 29 |
| 5.1.2 RECICLAGEM QUÍMICA..... | 30 |
| 5.1.3 RECICLAGEM ENERGÉTICA..... | 30 |
| 5.2 VANTAGENS DA REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE POLÍMEROS..... | 31 |
| 6. POLÍMEROS E IMPRESSÃO 3D..... | 32 |
| 6.1 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO DE POLÍMERO POR IMPRESSÃO 3D..... | 33 |
| 6.1.1 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA (FDM/FFF)..... | 33 |
| 6.1.2 ESTEREOLITOGRAFIA (SLA) E PROCESSAMENTO DIGITAL DE LUZ (DLP)..... | 33 |
| 6.1.3 SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (SLS)..... | 34 |
| 6.2 SUSTENTABILIDADE E RECICLAGEM DE POLÍMEROS NA IMPRESSÃO 3D..... | 34 |
| 6.3 PRODUÇÃO DE FILAMENTOS RECICLADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS..... | 36 |
| 7. METODOLOGIA..... | 37 |
| 7.1 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS..... | 37 |
| 7.2 PRODUÇÃO DOS CORPO DE PROVA..... | 40 |
| 7.3 IDENTIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS RECICLADOS..... | 43 |
| 7.3.1 TESTE VISUAL..... | 43 |
| 7.3.2 TESTE TÁTIL..... | 43 |
| 7.3.3 TESTE RESISTÊNCIA AO RISCO..... | 44 |
| 7.3.4 TESTE DE DENSIDADE POR FLUTUAÇÃO..... | 44 |
| 7.3.5 TESTE DE INFLAMABILIDADE..... | 44 |
| 7.3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV..... | 44 |
| 7.3.7 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE | |

| | |
|--|-----------|
| FOURIER - FTIR..... | 45 |
| 7.3.8 TERMOGRAVIMÉTRICA - TGA..... | 45 |
| 7.4 SEPARAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS POLÍMEROS PARA IMPRESSÃO..... | 46 |
| 7.5 APLICAÇÃO EM IMPRESSÃO 3D..... | 47 |
| 8. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 48 |
| 8.1 ANÁLISE DE TESTE DE BANCADA..... | 48 |
| 8.2 ANÁLISE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV..... | 53 |
| 8.3 ANÁLISE ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER - FTIR..... | 54 |
| 8.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA TGA..... | 58 |
| 8.5 ANÁLISE DA PREPARAÇÃO DOS POLÍMEROS PARA IMPRESSÃO..... | 61 |
| 8.6 ANÁLISE DOS FILAMENTOS POLIMÉRICOS..... | 63 |
| 8.7 ANÁLISE DA APLICAÇÃO EM IMPRESSÃO 3D..... | 65 |
| 8.8 ANÁLISE DAS PEÇAS IMPRESSAS..... | 65 |
| 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 67 |
| 10. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 69 |
| 11. REFERÊNCIAS..... | 70 |

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a necessidade urgente de reduzir os impactos ambientais dos resíduos plásticos têm impulsionado o avanço de técnicas inovadoras de reuso e reciclagem de polímeros. Nesse contexto, a reutilização de polímeros para a fabricação de filamentos destinados à impressão 3D e ao processo de injeção surge como uma alternativa promissora dentro do conceito de economia circular (Kreiger & Pearce, 2013). Essa abordagem visa não apenas minimizar a dependência de polímeros virgens, mas também reduzir a quantidade de resíduos descartados em aterros sanitários, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais negativos.

O conceito de economia circular preconiza a maximização da utilização de recursos, promovendo práticas que reduzam a geração de resíduos e aumentem a eficiência dos processos produtivos. Segundo Ellen MacArthur Foundation (2013), a economia circular difere do modelo linear tradicional de extração, produção e descarte ao incentivar a reutilização e o reaproveitamento de materiais, reduzindo a pressão sobre os recursos naturais. Dessa forma, a reciclagem de polímeros para a manufatura aditiva e a moldagem por injeção insere-se nesse contexto como uma estratégia de alto impacto ambiental e econômico.

A reciclagem de polímeros para a produção de filamentos de impressão 3D apresenta uma série de vantagens. Além de reduzir o consumo de matérias-primas virgens, esse processo possibilita a criação de produtos altamente personalizados, fomentando a inovação no design de materiais. Savolainen et al. (2016) destacam que a impressão 3D tem se beneficiado significativamente da possibilidade de reutilização de materiais, promovendo um ciclo fechado de produção que otimiza o uso dos recursos disponíveis. A capacidade de criar geometrias complexas e componentes sob demanda amplia ainda mais o potencial sustentável dessa tecnologia. No entanto, apesar das vantagens, a reciclagem de polímeros enfrenta desafios significativos. A degradação térmica e mecânica dos materiais durante os ciclos de reciclagem pode comprometer suas propriedades, reduzindo a qualidade dos produtos finais (HOEKSTRA & CHAPMAN, 2017).

A extrusão de filamentos a partir de materiais reciclados apresenta diversos desafios que impactam diretamente a qualidade do produto final. Um dos principais obstáculos está na variação da composição dos resíduos, já que materiais reciclados raramente possuem uniformidade quanto à origem, pureza e aditivos presentes. Essa

inconsistência pode gerar instabilidade no processo, como falhas na extrusão e variação no diâmetro do filamento (Qureshi et al., 2020; Tanzi & Farè, 2019). Outro fator crítico é a presença de impurezas e umidade, que compromete a homogeneidade do material, podendo causar bolhas, irregularidades superficiais e fragilidade estrutural. A umidade, em especial, tende a provocar defeitos durante o aquecimento, sendo essencial a secagem prévia do material (Zander et al., 2018; França et al., 2021). Para mitigar esses efeitos, novas abordagens estão sendo desenvolvidas, como a mistura de polímeros reciclados com aditivos ou a combinação com resinas virgens para melhorar o desempenho dos filamentos.

A integração de práticas de reciclagem na cadeia produtiva não só reduz impactos ambientais, mas também oferece benefícios econômicos significativos. Segundo Geyer, Jambeck e Law (2017), a produção global de plástico ultrapassou 400 milhões de toneladas anuais, e apenas cerca de 9% (aproximadamente 36 milhões de toneladas) desse material é efetivamente reciclado. O aumento da taxa de reciclagem e a incorporação de polímeros reciclados em produtos comerciais podem reduzir custos de produção e diminuir a dependência de matérias-primas petroquímicas, tornando a indústria mais resiliente a flutuações de mercado.

A união entre a impressão 3D e o reuso de polímeros reciclados reforça o compromisso com a inovação e a sustentabilidade. A incorporação de materiais reciclados na manufatura aditiva amplia os benefícios ambientais e abre caminho para novas oportunidades industriais e econômicas. Produtos que antes seriam descartados podem ser transformados em novos itens, fomentando a economia circular e estabelecendo um modelo produtivo mais eficiente e sustentável.

Dessa forma, a pesquisa contínua e o desenvolvimento tecnológico são fundamentais para superar os desafios inerentes à reciclagem de polímeros, garantindo um futuro mais sustentável para a manufatura aditiva e para a indústria como um todo. A transição para uma economia circular baseada no reuso de polímeros não é apenas uma necessidade ambiental, mas uma oportunidade estratégica para impulsionar a inovação e criar um modelo de produção mais eficiente e sustentável.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Desenvolver uma metodologia para a reutilização de polímeros reciclados na produção de filamentos para impressão 3D, promovendo a economia circular e reduzindo o impacto negativos associado ao descarte de plásticos.

Objetivos Específicos:

1. Separação dos Polímeros:

- Implementar um processo eficiente de separação de polímeros reciclados, utilizando técnicas de triagem para garantir a pureza e a qualidade dos materiais a serem reutilizados.

2. Caracterização dos Polímeros:

- Realizar testes de caracterização físico-química e mecânica para identificar e classificar os diferentes tipos de polímeros reciclados, assegurando que atendam aos requisitos de desempenho para uso em filamentos de impressão 3D.

3. Desenvolvimento de Filamentos Reciclados:

- Projetar e fabricar filamentos de polímeros reciclados, ajustando os parâmetros de processamento para otimizar a qualidade do produto final.

4. Avaliação de Desempenho:

- Testar e avaliar o desempenho dos filamentos reciclados em impressoras 3D, comparando-os com filamentos de polímeros virgens em termos de resistência, durabilidade e qualidade de impressão.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 POLÍMEROS

Os polímeros são materiais fundamentais na sociedade moderna, utilizados em setores como a indústria automobilística, embalagens, dispositivos médicos e manufatura aditiva. Definidos como macromoléculas compostas por unidades repetitivas chamadas meros, os polímeros podem ser naturais, como a celulose e a borracha, ou sintéticos, como o polipropileno (PP), ácido polilático (PLA), polietileno tereftalato glicol (PETG), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e poliuretano termoplástico (TPU) (Callister & Rethwisch, 2020). A Figura 01 apresenta uma imagem representativa de resinas poliméricas.

FIGURA 01 - FOTOGRAFIA DE RESINAS POLIMÉRICAS PARTICULADAS (PELLETS).



FONTE: MINAS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS, 2022.

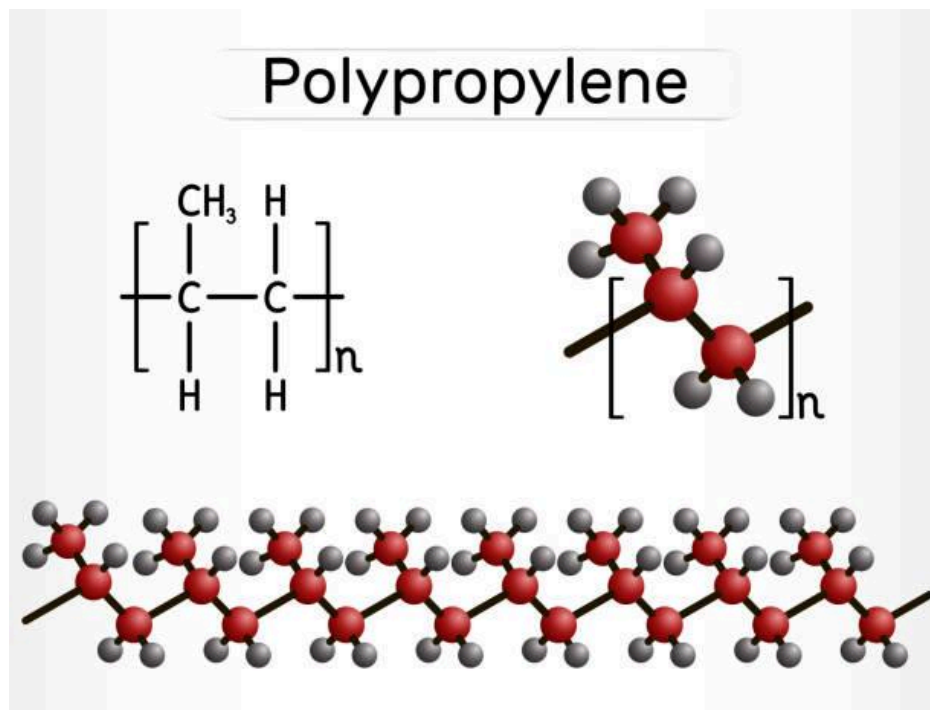
A introdução dos polímeros sintéticos revolucionou a indústria, permitindo a criação de materiais mais leves, duráveis e com propriedades ajustáveis conforme a necessidade. A partir da década de 1950, a demanda por plásticos cresceu exponencialmente, levando à exploração de diferentes tipos de polímeros e seus métodos de produção (Gibson, Rosen & Stucker, 2014). No contexto da impressão 3D, os polímeros se tornaram essenciais devido à sua capacidade de fusão e remodelagem,

possibilitando a manufatura aditiva em diversas aplicações industriais e biomédicas (Bandyopadhyay & Bose, 2015).

3.2 POLIPROPILENO (PP)

O polipropileno (PP), Figura 02, foi descoberto em 1951 pelos químicos Paul Hogan e Robert Banks, da Phillips Petroleum Company, durante estudos sobre a polimerização de olefinas, obtidas predominantemente a partir do refino do petróleo (Callister & Rethwisch, 2020). No entanto, seu desenvolvimento comercial ocorreu em 1954, quando Giulio Natta aplicou catalisadores de Ziegler-Natta para produzir polipropileno isotático, conferindo ao material maior regularidade estrutural e melhor desempenho mecânico (Gibson et al., 2014).

FIGURA 02 - ESTRUTURA QUÍMICA DO POLIPROPILENO.



FONTE: DREAMSTIME, 2020.

Durante a década de 1960, a produção de PP cresceu exponencialmente devido à sua resistência química e baixo custo, tornando-se um dos polímeros mais utilizados no mundo. Com a evolução da tecnologia, novos métodos de processamento, como moldagem por injeção e extrusão, foram aprimorados, permitindo a fabricação de produtos cada vez mais sofisticados. No final dos anos 1980, pesquisadores começaram a explorar a reciclagem do PP para reduzir o impacto ambiental do descarte de plásticos,

dado que sua degradação pode levar mais de 400 anos em aterros sanitários (Geyer, Jambeck & Law, 2017).

O polipropileno é um dos polímeros mais consumidos globalmente, representando cerca de 30% da produção mundial de plásticos. Seu uso se estende desde embalagens e tecidos sintéticos até componentes automotivos e tubulações industriais (Bandyopadhyay & Bose, 2015).

3.2.1 PROPRIEDADES

O polipropileno é um polímero semicristalino, apresentando alta resistência térmica, química e mecânica. Suas principais propriedades incluem:

- Baixa densidade ($\sim 0,90 \text{ g/cm}^3$), tornando-o um dos polímeros mais leves disponíveis comercialmente (Callister & Rethwisch, 2020).
- Resistência térmica moderada, com temperatura de fusão entre $160 \text{ }^\circ\text{C}$ e $170 \text{ }^\circ\text{C}$, permitindo sua aplicação em ambientes de temperatura elevada sem deformação significativa (Gibson et al., 2014).
- Alta resistência química, tornando-o resistente a ácidos, bases e solventes orgânicos (Harris et al., 2021).
- Boa resistência mecânica e flexibilidade, especialmente em copolímeros de PP, que possuem maior tenacidade em comparação ao homopolímero (Rahman, Letcher & Mebrahtu, 2020).
- Baixa absorção de umidade, garantindo sua estabilidade dimensional em aplicações que exigem resistência à água (Bandyopadhyay & Bose, 2015).

Apesar de suas vantagens, o PP apresenta desafios em processos de manufatura aditiva, como baixa adesão ao leito de impressão e dificuldade de fusão entre camadas, exigindo superfícies tratadas e otimização dos parâmetros de impressão 3D (Gibson et al., 2014).

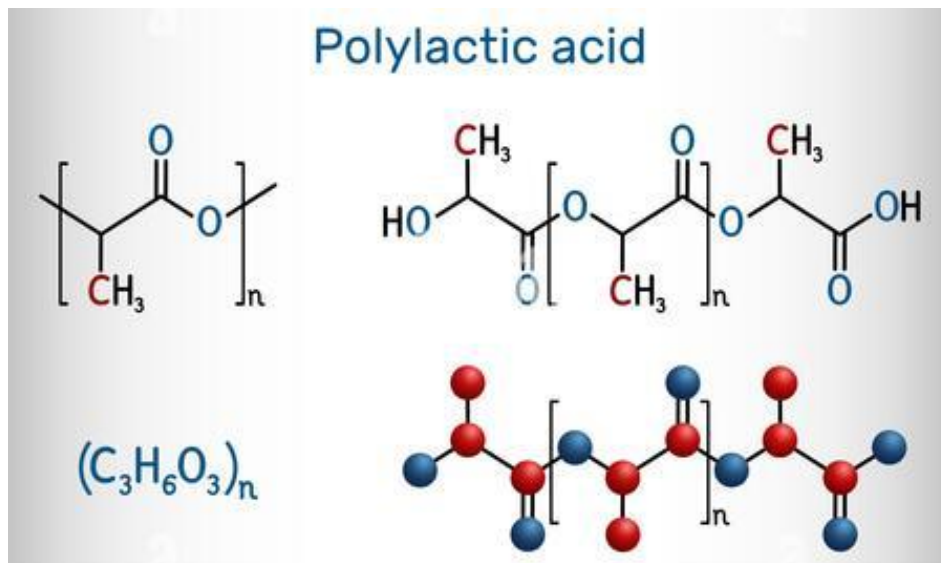
3.2.2 APLICAÇÕES

O polipropileno é amplamente utilizado em diversos setores, como observado na Figura 03, devido à sua resistência química e baixo custo. Algumas de suas principais aplicações incluem:

- Indústria de embalagens: Fabricado para recipientes de alimentos, garrafas reutilizáveis e filmes plásticos devido à sua inércia química e resistência à umidade (Callister & Rethwisch, 2020).

O crescimento da preocupação ambiental impulsionou o uso do PLA como uma alternativa sustentável aos polímeros derivados do petróleo, sendo amplamente adotado na indústria de embalagens biodegradáveis e impressão 3D (Geyer, Jambeck & Law, 2017). Com o avanço da tecnologia, diferentes variações do PLA foram desenvolvidas para melhorar sua resistência ao impacto e ao calor, permitindo sua aplicação em novos setores industriais (Harris et al., 2021). A Figura 04 apresenta a estrutura do PLA.

FIGURA 04 - ESTRUTURA DO POLI (ÁCIDO LÁCTICO).



FONTE: DREAMSTIME, 2020.

3.3.1 PROPRIEDADES

O PLA é um polímero biodegradável e de origem renovável, possuindo características distintas em comparação aos polímeros convencionais. De acordo com Callister e Rethwisch (2020), suas propriedades incluem:

- Alta rigidez e resistência mecânica, tornando-o ideal para estruturas que exigem precisão dimensional (Gibson et al., 2014).
- Baixa resistência ao impacto, tornando-o mais quebradiço do que polímeros como o ABS e PETG (Rahman et al., 2020).
- Temperatura de transição vítrea entre 55°C e 65°C, limitando seu uso em aplicações de alta temperatura (Bandyopadhyay & Bose, 2015).
- Origem sustentável, sendo produzido a partir de biomassa renovável, como amido de milho e cana-de-açúcar (Harris et al., 2021).
- Baixa absorção de umidade, garantindo maior estabilidade em ambientes controlados (Callister & Rethwisch, 2020).

3.3.2 APLICAÇÕES

O PLA é amplamente utilizado em setores que exigem sustentabilidade e facilidade de processamento. Algumas de suas principais aplicações incluem:

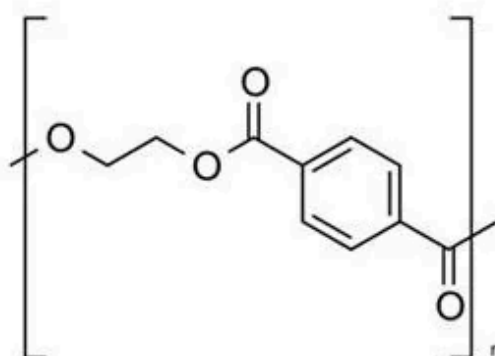
- Filamentos para impressão 3D, sendo o mais utilizado devido à sua fácil extrusão e estabilidade dimensional (Gibson et al., 2014).
- Embalagens biodegradáveis, promovendo alternativas sustentáveis ao plástico convencional (Harris et al., 2021).
- Dispositivos médicos descartáveis, como suturas biodegradáveis e implantes de curta duração (Rahman et al., 2020).

3.4 POLI(ETILENO TEREFALATO GLICOL) (PETG)

O poli(etileno tereftalato glicol) (PETG), Figura 05, é um polímero termoplástico desenvolvido como uma modificação do poli(etileno tereftalato) (PET), um dos plásticos mais amplamente utilizados no mundo. O PET foi inicialmente sintetizado em 1941 pelos químicos britânicos John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, como parte de um esforço para desenvolver um substituto sintético para as fibras naturais, especialmente o algodão e a seda (Callister & Rethwisch, 2020).

O PET rapidamente ganhou popularidade devido à sua alta resistência mecânica, transparência e estabilidade química, sendo amplamente utilizado na fabricação de garrafas plásticas, tecidos sintéticos e embalagens. No entanto, sua fragilidade em temperaturas extremas e a dificuldade de reciclagem levaram os pesquisadores a buscar alternativas mais eficientes. Na década de 1970, a modificação do PET com unidades de glicol resultou no PETG, um copolímero com maior flexibilidade, resistência ao impacto e melhor processabilidade (Harris et al., 2021).

FIGURA 05 - FÓRMULA QUÍMICA DO PETG.



FONTE: DIDACTIC PRINCIPLES OF EDUCATION STUDENTS 3D-PRINTING, 2022.

Ao longo das últimas décadas, o PETG se tornou um material essencial na fabricação de embalagens farmacêuticas, componentes médicos e impressão 3D. Sua capacidade de ser moldado a baixas temperaturas sem cristalização e sua excelente aderência o tornaram uma alternativa viável ao ABS e ao PLA na manufatura aditiva (Gibson, Rosen & Stucker, 2014). Atualmente, a demanda por PETG continua crescendo devido à sua facilidade de reciclagem, tornando-o uma opção sustentável para diversas aplicações industriais.

3.4.1 PROPRIEDADES

O PETG combina características do PET convencional com propriedades mecânicas superiores, graças à adição do glicol em sua estrutura molecular. Segundo Callister e Rethwisch (2020), as propriedades mais importantes do PETG incluem:

- Alta resistência química, sendo resistente a ácidos, bases fracas e solventes, tornando-o ideal para recipientes de substâncias químicas e alimentos (Harris et al., 2021).
- Maior flexibilidade em comparação com o PET, permitindo que seja moldado a temperaturas mais baixas sem cristalização (Gibson et al., 2014).
- Excelente resistência ao impacto, sendo mais durável que o PLA e menos quebradiço em baixas temperaturas (Bandyopadhyay & Bose, 2015).
- Temperatura de fusão entre 220°C e 260°C, garantindo melhor resistência térmica do que o PLA, mas inferior ao ABS (Harris et al., 2021).
- Transparência elevada, permitindo sua aplicação em painéis, garrafas e sinalização visual (Gibson et al., 2014).
- Boa adesão, tornando-o um material ideal para impressão 3D, reduzindo problemas como delaminação e falhas estruturais (Callister & Rethwisch, 2020).
- Baixa absorção de umidade, permitindo seu armazenamento prolongado sem degradação significativa (Harris et al., 2021).

Embora o PETG ofereça muitas vantagens, ele pode apresentar dificuldades na impressão 3D, como a tendência à formação de "fiapos" (stringing) e a necessidade de resfriamento adequado para evitar deformações (Gibson et al., 2014).

3.4.2 APLICAÇÕES

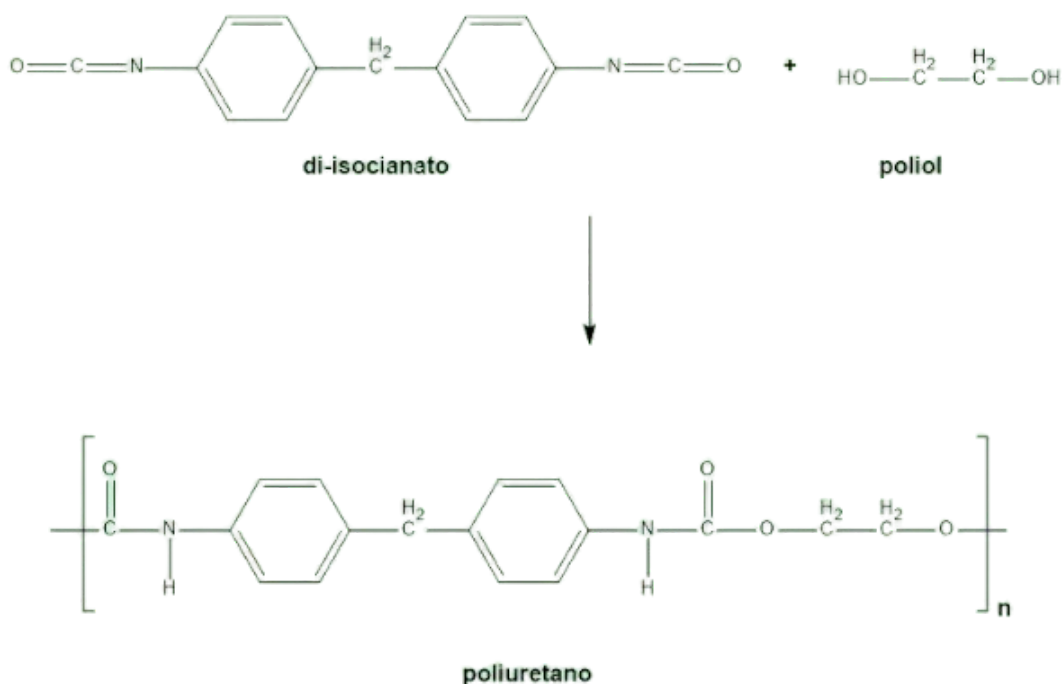
O PETG é utilizado em setores que exigem resistência química e mecânica. Algumas de suas principais aplicações incluem:

- Embalagens seguras para alimentos, devido à sua resistência a agentes químicos e transparência (Callister & Rethwisch, 2020).
- Impressão 3D de peças funcionais, devido à sua resistência ao impacto e boa aderência intercamadas (Gibson et al., 2014).
- Dispositivos médicos e protetores faciais, devido à sua capacidade de esterilização sem degradação (Harris et al., 2021).

3.5 POLIURETANO TERMOPLÁSTICO (TPU)

O poliuretano termoplástico (TPU) é um polímero altamente versátil pertencente à família dos poliuretanos, sendo desenvolvido pela primeira vez em 1937 pelo químico alemão Otto Bayer e sua equipe no laboratório da IG Farben (Callister & Rethwisch, 2020). O TPU foi uma das primeiras descobertas na química dos poliuretanos, resultando da reação entre di-isocianatos e polióis, Figura 06, criando um material com propriedades únicas que combinam flexibilidade, elasticidade e resistência ao impacto.

FIGURA 06 - SÍNTESE DO POLIURETANO.



FONTE: TECNPOL, 2020.

Inicialmente, os poliuretanos foram desenvolvidos como alternativas sintéticas à borracha natural, mas rapidamente ganharam aplicações na indústria devido à sua capacidade de ser formulado para diferentes graus de dureza e flexibilidade (Gibson et al., 2014). Na década de 1950, a BASF multinacional alemã e uma das maiores indústrias químicas, juntamente com outras grandes indústrias químicas começaram a produzir poliuretanos em larga escala, sendo utilizados em espumas rígidas, revestimentos e adesivos. No entanto, apenas na década de 1960, com o desenvolvimento de processos aprimorados de extrusão e injeção, os TPUs começaram a ser utilizados como polímeros termoplásticos de alto desempenho (Harris et al., 2021).

Com o avanço da manufatura aditiva, o TPU ganhou destaque na impressão 3D, permitindo a fabricação de peças flexíveis e resistentes. Sua crescente aplicação na indústria automotiva, calçadista e biomédica solidificou sua importância como um material estratégico no setor de polímeros industriais (Bandyopadhyay & Bose, 2015).

3.5.1 PROPRIEDADES

O TPU possui uma estrutura molecular híbrida, contendo segmentos rígidos e flexíveis que conferem elasticidade e resistência mecânica. Segundo Callister e Rethwisch (2020), suas principais propriedades incluem:

- Alta flexibilidade e elasticidade, permitindo que o material suporte grandes deformações sem fraturar (Gibson et al., 2014).
- Resistência ao impacto e ao desgaste, tornando-o ideal para aplicações sujeitas a estresse mecânico contínuo (Harris et al., 2021).
- Boa resistência química, sendo imune a óleos, graxas e combustíveis, o que o torna adequado para mangueiras e peças industriais (Bandyopadhyay & Bose, 2015).
- Temperatura de fusão variável, dependendo da formulação, geralmente entre 180 °C e 250 °C, permitindo que seja moldado em diferentes condições (Callister & Rethwisch, 2020).
- Capacidade de recuperação elástica, retornando à sua forma original após deformação, sem perda significativa de suas propriedades (Gibson et al., 2014).
- Resistência ao ozônio e intempéries, tornando-o adequado para aplicações ao ar livre e expostas a variações ambientais (Harris et al., 2021).

Uma das maiores vantagens do TPU na impressão 3D é sua capacidade de produzir peças altamente flexíveis e resistentes ao impacto, sendo amplamente utilizado

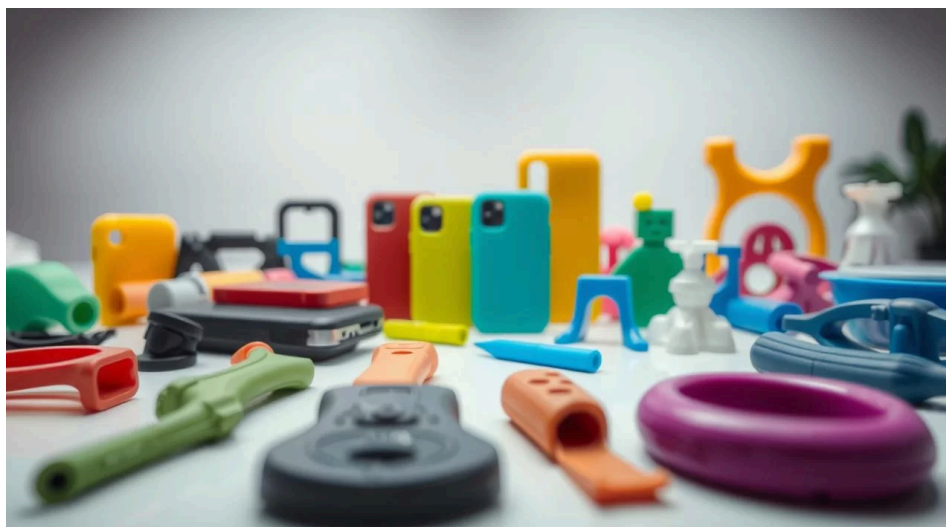
para vedações, componentes de amortecimento e dispositivos médicos (Bandyopadhyay & Bose, 2015). No entanto, devido à sua alta elasticidade, a impressão com TPU exige ajustes específicos, como velocidades de extrusão reduzidas e uso de sistemas de alimentação direta (Gibson et al., 2014).

3.5.2 APLICAÇÕES

O TPU é utilizado principalmente em setores que exigem flexibilidade e resistência ao impacto, como observado na Figura 07:

- Solas de calçados esportivos, garantindo conforto e durabilidade (Callister & Rethwisch, 2020).
- Impressão 3D de peças flexíveis, como vedações e dispositivos médicos (Gibson et al., 2014).
- Componentes automotivos e mangueiras, devido à sua resistência à abrasão e aos produtos químicos (Harris et al., 2021).

FIGURA 07 - PRODUTOS DE TPU.



FONTE: TECNPOL, 2020.

4. PRODUÇÃO E CONSUMO DE POLÍMEROS

A produção global de polímeros sintéticos tem crescido de forma exponencial desde a década de 1950, acompanhando a demanda da indústria automotiva, construção civil, embalagens, têxteis e eletrônicos. De acordo com o relatório da Plastics Europe (2023), a produção mundial de plásticos atingiu cerca de 400,3 milhões de toneladas em 2022, mantendo-se estável em relação a 2021, apesar das instabilidades econômicas globais. A Ásia lidera a produção, representando 53% do total, com destaque para a

China, responsável por 32% da produção global. Como observado, a produção mundial de plásticos manteve-se estável em torno de 400 milhões de toneladas entre 2017 e 2023, com registro de 400,3 milhões de toneladas em 2022 (Plastics Europe, 2023). Essa estagnação pode ser explicada por diferentes fatores: de um lado, a expansão asiática, liderada pela China (32% da produção global), manteve a demanda elevada; de outro, a queda na produção europeia, que recuou cerca de 8,3% em 2022, refletiu os altos custos energéticos, inflação e regulações ambientais mais rígidas (Cincodias, 2025; Plastics Europe, 2023). Apesar do crescimento da demanda em regiões emergentes, mercados maduros como Europa e América do Norte apresentam sinais de saturação (Statista, 2024). Além disso, negociações internacionais para um tratado de redução da poluição plástica fracassaram devido à resistência de países com fortes indústrias petroquímicas, como EUA, Índia e Arábia Saudita (Reuters, 2025). Assim, a estabilidade na produção global de plásticos resulta de um equilíbrio entre pressões regulatórias e queda em mercados desenvolvidos e a expansão contínua em países emergentes, num contexto em que a transição para a circularidade avança, mas ainda de forma insuficiente.

Em relação a produção, a Europa responde por aproximadamente 15%, enquanto a América do Norte participa com 18% da produção. Os polímeros mais produzidos incluem o polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS), polietileno tereftalato (PET) e poliuretano (PU). Somente o polietileno de alta densidade (PEAD) corresponde a cerca de 17% do total de plásticos produzidos no mundo (Geyer et al., 2017). O consumo global de plásticos acompanha a produção, impulsionado pela urbanização, crescimento populacional e desenvolvimento tecnológico. Segundo o mesmo relatório da Plastics Europe (2023), o consumo de plástico per capita no mundo foi estimado em aproximadamente 50 kg por ano. Nos países da União Europeia, esse valor chega a 100 kg per capita, enquanto em países em desenvolvimento pode ser inferior a 20 kg per capita. Em termos de aplicação, os dados de 2022 mostram a seguinte distribuição global do uso de plásticos:

- Embalagens: 40,5%
- Construção civil: 19,8%
- Setor automotivo: 8,7%
- Equipamentos elétricos e eletrônicos: 6,2%
- Outros setores (agrícola, médico, etc.): 19,3%

A indústria de polímeros tem sido fundamental no desenvolvimento de materiais com propriedades variadas. Polímeros como PP, PLA, TPU e PETG se destacam por suas características específicas de produção, aplicação e reciclagem, aspectos relevantes para a sustentabilidade e a economia circular. A tabela a seguir apresenta dados de produção e uso referentes a 2022.

TABELA 01 - PRODUÇÃO E RECICLABILIDADE DE DIFERENTES POLÍMEROS.

| Polímero | Produção (2022) | Reciclabilidade | Taxa de reciclagem |
|----------|---|---|---|
| PP | >80 milhões de toneladas (20% dos plásticos globais) | Mecânica | 1-3% global |
| PLA | ~400 mil toneladas/ano (previsão de 700 mil até 2027) | Compostável industrialmente e reciclagem mecânica | <1% reciclado ou compostado adequadamente |
| PETG | 2-5% dos 42 milhões de PET | Mecânica (difícil separação) | <10% (pode contaminar fluxos de PET) |
| TPU | ~775 mil toneladas | Mecânica ou química | <5% |

FORNE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

A Tabela 01 evidencia a discrepância entre a produção global e a reciclabilidade dos polímeros. O polipropileno (PP), com mais de 80 milhões de toneladas/ano ($\approx 20\%$ da produção mundial), apresenta taxa de reciclagem de apenas 1-3%, reflexo da diversidade de aplicações e dificuldades de separação (Plastics Europe, 2023). O polilático (PLA), considerado um biopolímero promissor, atinge cerca de 400 mil toneladas/ano, com previsão de crescimento, porém menos de 1% é efetivamente reciclado ou compostado, já que sua degradação depende de condições industriais específicas (European Bioplastics, 2023). O PETG, apesar de corresponder a apenas 2-5% da produção de PET, compromete os fluxos de reciclagem pela incompatibilidade, resultando em taxas inferiores a 10% (González-Murillo et al., 2021). Já o TPU, com aproximadamente 775 mil toneladas, possui rotas mecânicas e químicas, mas ainda apresenta aproveitamento inferior a 5% (Nunes et al., 2020).

5. DESENVOLVIMENTO E RECICLAGEM DE FILAMENTOS POLIMÉRICOS

O desenvolvimento de filamentos poliméricos tem ganhado destaque nas últimas décadas, especialmente impulsionado pelo crescimento da manufatura aditiva. Esses filamentos são essenciais para tecnologias como a Fused Deposition Modeling

(FDM), que dependem de materiais termoplásticos com propriedades mecânicas e térmicas adequadas à extrusão e solidificação controlada (Ngo et al., 2018).

Entre os polímeros mais utilizados na fabricação de filamentos destacam-se o ácido polilático (PLA), a acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o polietileno tereftalato glicol (PETG). O PLA por ser um biopolímero derivado de fontes renováveis como o amido de milho e a cana-de-açúcar, ele é amplamente utilizado devido à sua biodegradabilidade, facilidade de impressão e baixa emissão de compostos orgânicos voláteis (Thakur & Thakur, 2014). Por outro lado, o ABS, derivado do petróleo, oferece maior resistência térmica e mecânica, sendo indicado para aplicações que exigem maior durabilidade (Wang et al., 2017). O PETG surge como uma alternativa intermediária, combinando boa resistência e facilidade de impressão, além de menor tendência à deformação em comparação ao ABS. No entanto, o consumo crescente de polímeros sintéticos, tem gerado preocupações ambientais devido ao acúmulo de resíduos plásticos e sua lenta degradação na natureza. Para mitigar esse problema, o reuso e a reciclagem de polímeros surgem como soluções essenciais para reduzir impactos ambientais, promover a economia circular e conservar recursos naturais (Hopewell, Dvorak e Kosior, 2009). A reciclagem de polímeros, além de diminuir a quantidade de resíduos plásticos descartados, reduz a dependência de matérias-primas fósseis e a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para um modelo produtivo mais sustentável (Geyer, Jambeck e Law, 2017).

O reuso de polímeros desempenha um papel fundamental na sustentabilidade ambiental e na economia circular. De acordo com estudos realizados por Geyer, Jambeck e Law (2017), estima-se que mais de 8,3 bilhões de toneladas de plástico foram produzidas desde a década de 1950, das quais aproximadamente 79% foram descartadas em aterros sanitários ou no meio ambiente. Diante desse cenário alarmante, o reuso e a reciclagem surgem como alternativas viáveis para minimizar o impacto ambiental do descarte inadequado de plásticos.

A economia circular, proposta por Ellen MacArthur (2013), reforça a necessidade de um modelo produtivo que maximize o ciclo de vida dos materiais por meio do reuso e reciclagem. A reciclagem de polímeros desempenha um papel fundamental na redução da extração de recursos fósseis, como o petróleo, matéria-prima principal na produção de plásticos convencionais, além de diminuir significativamente o consumo de energia necessário para a fabricação de novos materiais. (Hopewell et al., 2009).

Dessa forma, torna-se evidente a importância da reciclagem como estratégia para mitigar o impacto ambiental e reduzir o consumo de recursos naturais, conforme ilustrado na figura 8.

FIGURA 08 - INFOGRÁFICO RECICLAGEM.



FONTE: MOVIMENTO PLÁSTICO TRANSFORMA, 2023.

Sendo assim, como uma forma de auxiliar na sustentabilidade, tem crescido pesquisas para o uso de polímeros reciclados na produção de filamentos. Alguns dos polímeros mais utilizados para esse meio, seria o polietileno tereftalato (PET) reciclado, proveniente principalmente de garrafas PET, é uma das alternativas mais promissoras. Estudos mostram que o PET reciclado pode ser transformado em filamentos com propriedades satisfatórias para impressão 3D, embora seja necessário cuidado com a degradação térmica e a homogeneidade do material (Papon & Haque, 2020). Em 2023, o uso de filamentos reciclados aumentou em 40% em relação ao ano anterior, sendo que no segmento reciclado, o PLA reciclado respondeu por cerca de 40% do mercado, seguido pelo ABS reciclado (25%) e PETG reciclado (15%) .

Outros polímeros recicláveis utilizados incluem o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS), estes apresentam desafios como alta retração térmica e baixa adesão entre camadas, o que limita sua aplicação direta sem modificações (Tanzi et al., 2021). Para superar essas limitações, vêm sendo desenvolvidas misturas poliméricas e a adição de cargas como fibras naturais ou partículas cerâmicas, a fim de melhorar as propriedades físico-químicas dos filamentos reciclados (Singh et al., 2022).

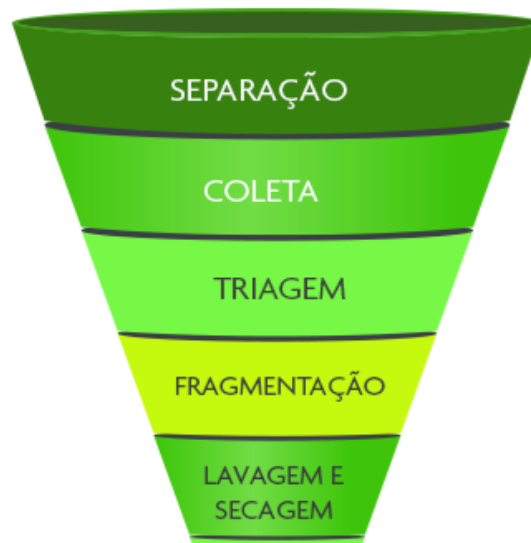
5.1 MÉTODOS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS

A reciclagem de polímeros pode ser realizada por diferentes métodos, cada um com características específicas e impactos distintos sobre a qualidade do material reciclado.

5.1.1 RECICLAGEM MECÂNICA

A reciclagem mecânica é o método mais utilizado para o reaproveitamento de polímeros, consistindo na coleta, separação, moagem, lavagem e reprocessamento dos plásticos para a fabricação de novos produtos, Figura 09. Segundo Kosior et al. (2021), a reciclagem mecânica mantém grande parte das propriedades originais do polímero, permitindo sua reutilização em diversas aplicações industriais.

FIGURA 09 - RECICLAGEM MECÂNICA.



FONTE: MOVIMENTO PLÁSTICO TRANSFORMA, 2023.

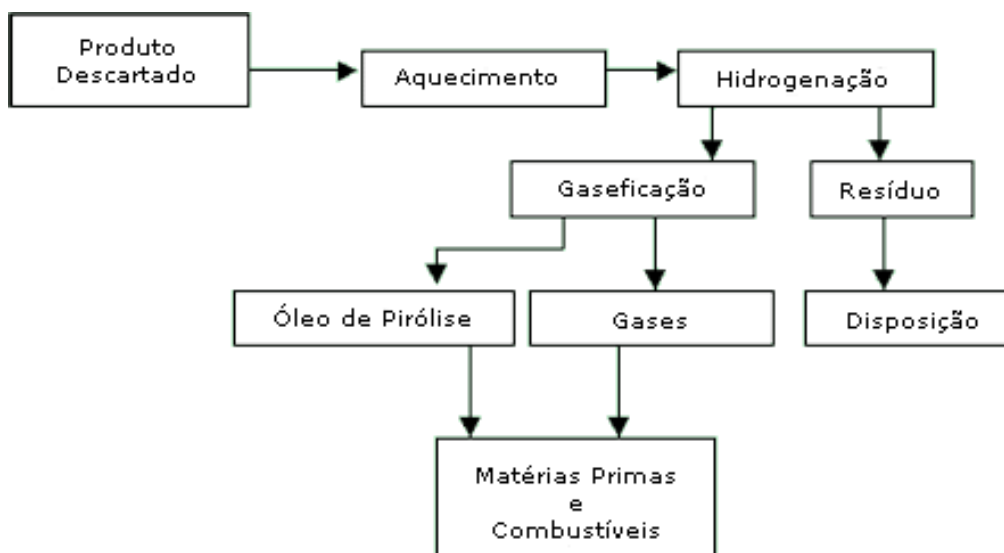
No entanto, um dos desafios desse método é a contaminação dos polímeros reciclados, que pode comprometer a qualidade do material final. A presença de aditivos, corantes e resíduos orgânicos pode dificultar a obtenção de polímeros reciclados com alto desempenho, exigindo processos adicionais de purificação (Webb et al., 2013).

5.1.2 RECICLAGEM QUÍMICA

A reciclagem química envolve a quebra dos polímeros em seus monômeros ou oligômeros originais, permitindo a obtenção de novos materiais com qualidade comparável aos polímeros virgens (Rahimi e García, 2017). Esse método é especialmente eficaz para polímeros de difícil reciclagem mecânica, como o poliuretano termoplástico (TPU), que possui ligações químicas complexas.

A reciclagem química pode ser realizada por processos como pirólise, hidrólise e glicólise, resultando na obtenção de matérias-primas reutilizáveis em novos processos produtivos. No entanto, seu alto custo e consumo energético ainda representam desafios para sua ampla implementação industrial (Singh et al., 2019). A Figura 10 apresenta um fluxograma representativo da reciclagem química.

FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DA RECICLAGEM QUÍMICA.



FONTE: UNIVASF SUSTENTÁVEL, 2019.

5.1.3 RECICLAGEM ENERGÉTICA

A reciclagem energética consiste na conversão de resíduos plásticos em energia térmica por meio da combustão controlada, Figura 11. Esse método pode ser uma alternativa viável para materiais não recicláveis mecanicamente, evitando seu descarte em aterros sanitários. No entanto, a queima de polímeros pode gerar emissões de gases tóxicos, exigindo o uso de tecnologias avançadas para o controle da poluição (Hopewell et al., 2009).

FIGURA 11 - RECICLAGEM ENERGÉTICA.



FONTE: REVORA, 2023.

5.2 VANTAGENS DA REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE POLÍMEROS

A reciclagem e o reuso de polímeros oferecem inúmeros benefícios ambientais, econômicos e sociais, tornando-se uma prática essencial para um futuro mais sustentável.

- Redução da pegada de carbono: A reciclagem de polímeros reduz significativamente as emissões de CO₂ associadas à produção de plásticos virgens, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Geyer et al., 2017).
- Preservação de recursos naturais: O reuso de polímeros minimiza a extração de petróleo e gás natural, recursos essenciais para a fabricação de plásticos convencionais (Webb et al., 2013).
- Economia de energia: A produção de polímeros reciclados consome até 80% menos energia em comparação com a fabricação de polímeros virgens (Kosior et al., 2021).
- Geração de empregos e desenvolvimento econômico: O setor de reciclagem e reuso de plásticos gera oportunidades de emprego e impulsiona a economia circular, promovendo inovação tecnológica e eficiência produtiva (Plastics Europe,

2020).

- Redução da poluição ambiental: O reuso de polímeros evita o descarte inadequado de resíduos plásticos em oceanos e aterros sanitários, reduzindo impactos negativos sobre a fauna e a flora (Rochman et al., 2016).

Ou seja, o reuso e a reciclagem de polímeros são práticas essenciais para a construção de uma sociedade mais sustentável. A adoção de processos eficientes de reaproveitamento de plásticos contribui para a redução do impacto ambiental, preservação de recursos naturais e fortalecimento da economia circular. A inovação tecnológica e a conscientização global sobre a necessidade de reduzir o consumo de plásticos descartáveis são fundamentais para garantir um futuro mais equilibrado e responsável.

Com o avanço de pesquisas sobre reciclagem mecânica, química e energética, espera-se que a indústria de polímeros continue evoluindo em direção a soluções mais sustentáveis, garantindo um aproveitamento mais eficiente dos materiais plásticos e minimizando seus impactos negativos no meio ambiente.

6. POLÍMEROS E IMPRESSÃO 3D

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, tem revolucionado a indústria de manufatura e design, permitindo a produção de componentes complexos de forma eficiente e econômica. Entre os materiais mais utilizados nesse processo, os polímeros termoplásticos desempenham um papel fundamental devido à sua facilidade de processamento, leveza e versatilidade de aplicação (Gibson, Rosen e Stucker, 2014).

A impressão 3D com polímeros envolve a deposição de camadas sucessivas de material fundido, que se solidifica para formar um objeto tridimensional. A ampla variedade de polímeros disponíveis possibilita a fabricação de peças com diferentes níveis de resistência mecânica, flexibilidade e biodegradabilidade, tornando-os adequados para aplicações que vão desde prototipagem rápida até componentes estruturais e biomédicos (Bandyopadhyay e Bose, 2015). Os polímeros termoplásticos são os mais amplamente empregados na impressão 3D devido à sua capacidade de fusão e ressolidificação (Callister & Rethwisch, 2020). Entre os principais polímeros utilizados, destacam-se o PLA, ABS, PETG, TPU e PP, cada um apresentando características específicas que influenciam sua aplicabilidade (Gibson et al., 2014).

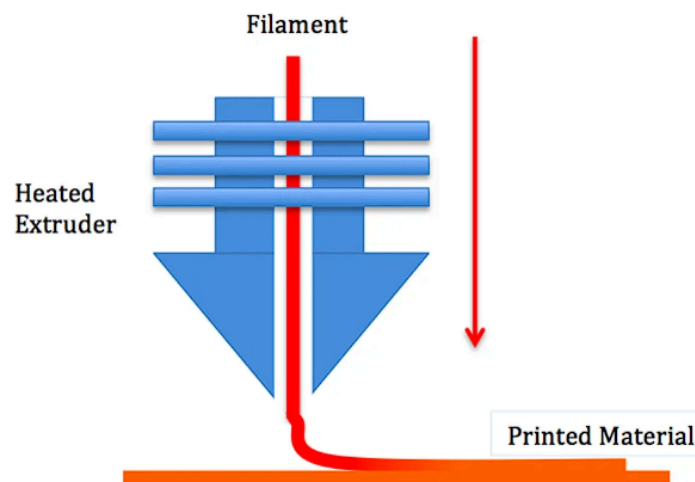
6.1 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO DE POLÍMERO POR IMPRESSÃO 3D

A escolha do polímero e do método de impressão 3D depende da aplicação desejada, do desempenho mecânico necessário e do custo de produção. Os principais processos utilizados na manufatura aditiva com polímeros incluem:

6.1.1 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA (FDM/FFF)

O processo Fused Deposition Modeling (FDM) ou *Fused Filament Fabrication* (FFF), Figura 12, é o método mais comum para impressão de polímeros. Nesse processo, um filamento termoplástico é aquecido e extrusado camada por camada, formando o objeto final (Gibson et al., 2014). Essa técnica é amplamente utilizada devido ao seu baixo custo, simplicidade e variedade de materiais disponíveis, incluindo PLA, ABS, PETG e TPU, sendo responsável por aproximadamente 70 a 80% das aplicações de impressão 3D em todo o mundo (Wohlers Report, 2023).

FIGURA 12 - PROCESSO DE FUSED DEPOSITION MODELING.



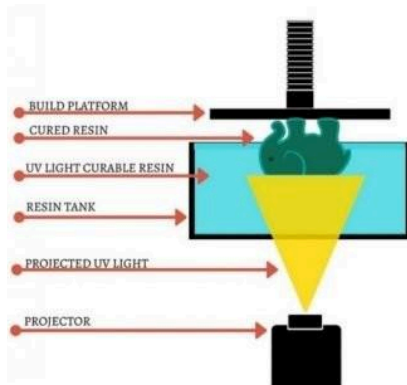
FONTE: INSTA 3DM, 2022.

6.1.2 ESTEREOLITOGRAFIA (SLA) E PROCESSAMENTO DIGITAL DE LUZ (DLP)

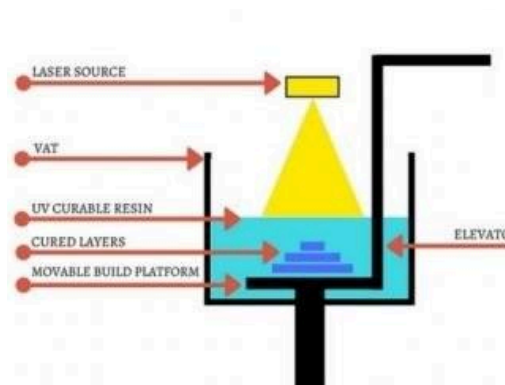
A SLA utiliza um feixe de laser para polimerizar resinas líquidas camada por camada, resultando em peças com alta resolução e detalhes finos (Mayer et al., 2020). Já a DLP utiliza um projetor de luz para curar uma camada inteira de resina de uma só vez, permitindo maior velocidade de produção. A Figura 13 apresenta um esquema desses processos.

FIGURA 13 - PROCESSO DE DLP E SLA.

a) DLP



b) SLA

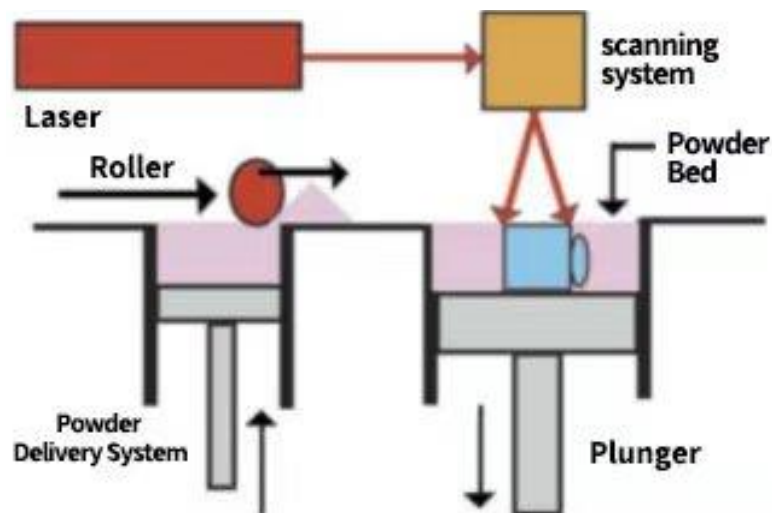


FONTE: MGROBOTS, 2021.

6.1.3 SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (SLS)

A tecnologia SLS usa um laser para fundir partículas de polímero em pó, formando estruturas tridimensionais sem necessidade de suportes adicionais (Callister e Rethwisch, 2020). Esse método permite a fabricação de peças complexas com alta resistência mecânica e precisão dimensional. Um esquema representativo é apresentado na Figura 14.

FIGURA 14 - PROCESSO DE SLS.



FONTE: JSADD 3D, 2020.

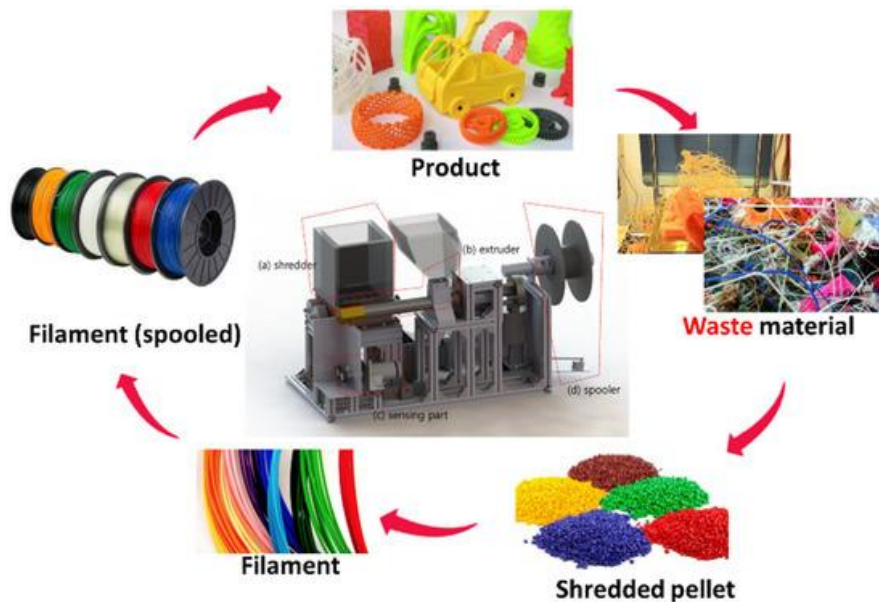
6.2 SUSTENTABILIDADE E RECICLAGEM DE POLÍMEROS NA IMPRESSÃO 3D

A manufatura aditiva tem um impacto significativo na sustentabilidade industrial, pois reduz desperdícios de material e otimiza a produção (Geyer, Jambeck e

Law, 2017). No entanto, a crescente demanda por polímeros na impressão 3D também levanta desafios ambientais, especialmente em relação ao descarte e reciclagem de plásticos usados no processo.

O reaproveitamento de polímeros na impressão 3D tem sido objeto de estudos recentes, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental. O PLA reciclado, por exemplo, mantém até 80% das propriedades mecânicas originais, possibilitando sua reutilização (Rahman et al., 2020). Já polímeros como PETG e PP possuem alta reciclabilidade e podem ser reprocessados diversas vezes sem perda significativa de desempenho (Harris et al., 2021). A substituição de polímeros derivados de petróleo por materiais biodegradáveis, como o PLA e biocompósitos, tem sido uma estratégia para minimizar o impacto ambiental da impressão 3D. Além disso, a reciclagem mecânica e química desses materiais pode reduzir o consumo de matéria-prima virgem e promover a economia circular na manufatura aditiva (Gibson et al., 2014). A Figura 15 apresenta uma estratégia para a reutilização de polímero na impressão 3D por meio da coleta do material, fusão e extrusão em pellets, seguida pela extrusão em filamentos.

FIGURA 15 - RECICLAGEM DE POLÍMEROS PARA UTILIZAÇÃO EM IMPRESSORAS 3D.



FONTE: THERMAL AND MECHANICAL DEGRADATION OF RECYCLED POLYLACTIC ACID FILAMENTS FOR THREE-DIMENSIONAL PRINTING APPLICATIONS. DONGOH LEE, YOUNGHUN LEE, INWHAN KIM, KYUNGGUN HWANG, NAMSU KIM, 2022.

6.3 PRODUÇÃO DE FILAMENTOS RECICLADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS

A produção de filamentos reciclados para impressão 3D busca reduzir o impacto ambiental ao reintroduzir resíduos plásticos na cadeia produtiva, contribuindo para uma economia circular (Impressão3DNews, 2025). No entanto, enfrenta desafios técnicos significativos: a qualidade do filamento reciclado muitas vezes decai com múltiplos ciclos, exigindo a adição de material virgem, o que pode prejudicar o ganho ambiental (3DFila, 2025; Filamentive, 2019). Além disso, a contaminação entre diferentes polímeros, como PLA, ABS e PETG, compromete a integridade mecânica e a confiabilidade do filamento final (Tucab, 2025; Jieya, 2025).

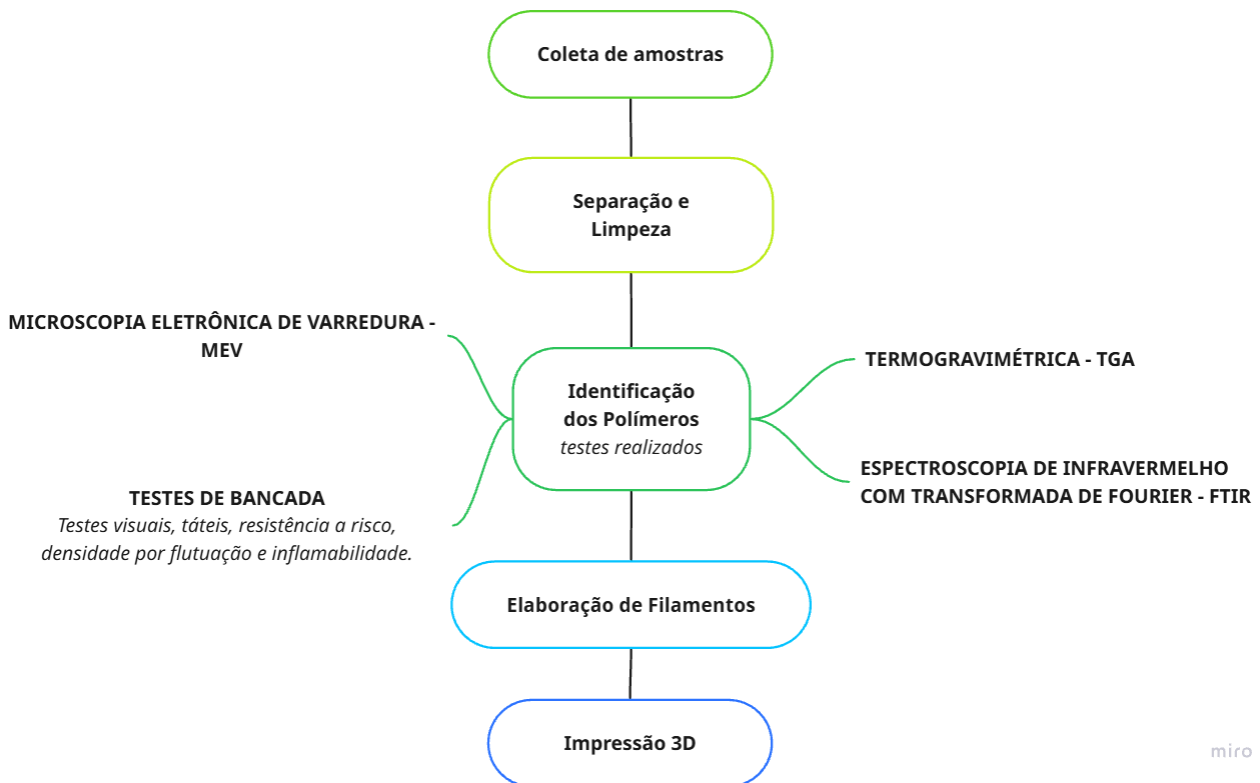
Outro ponto crítico é a infraestrutura limitada para reciclagem, especialmente compostagem industrial, o PLA, por exemplo, precisa de condições rigorosas para degradação, ausentes na maioria dos sistemas de coleta (Jieya, 2025; Impressão3DNews, 2025). A logística também é um obstáculo: o alto volume relativo ao peso do plástico torna o transporte dispendioso e pouco eficiente (3DFila, 2025; Filamentive, 2019). Além das soluções industriais, surgem também iniciativas DIY (Do It Yourself, faça você mesmo), que consistem em equipamentos de baixo custo desenvolvidos para uso doméstico ou em makerspaces. Um exemplo é o Recyclebot, extrusor de bancada capaz de transformar resíduos plásticos em filamentos utilizáveis, promovendo a economia circular em pequena escala, que viabilizam a produção local de filamentos a partir de resíduos, ampliando a acessibilidade da tecnologia e reduzindo a dependência de cadeias longas (Recyclebot, 2025). Apesar dessas inovações, o controle preciso do diâmetro do filamento é essencial para obter bons resultados e evitar falhas nas impressões, sensores ópticos podem ajudar, mas demandam integração e calibração adequadas (Petsiuk & Pearce, 2020).

Em síntese, a produção de filamentos reciclados é promissora em termos de sustentabilidade, mas apenas se encararmos os obstáculos ligados à qualidade, contaminação, infraestrutura, logística e controle técnico. Superá-los requer tecnologia adequada, conscientização do usuário, e investimentos em processos e políticas sustentáveis.

7. METODOLOGIA

A presente pesquisa será de natureza experimental aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, visando a investigação de soluções para o reaproveitamento de resíduos plásticos para aplicação na manufatura aditiva, especificamente na impressão 3D. O estudo será conduzido por meio de etapas sucessivas, interligadas entre si, conforme apresentado na Figura 16:

FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

7.1 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A coleta de resíduos plásticos foi realizada nas instalações do Labmaker Iguaçu, o qual é parte integrante do Itaipu Parquetec (Foz do Iguaçu/PR). A Figura 17 apresenta fotografia dos materiais coletados no Labmaker Iguaçu.

FIGURA 17 - RESÍDUOS PLÁSTICOS COLETADOS NAS INSTALAÇÕES DO LABMAKER IGUAÇU.



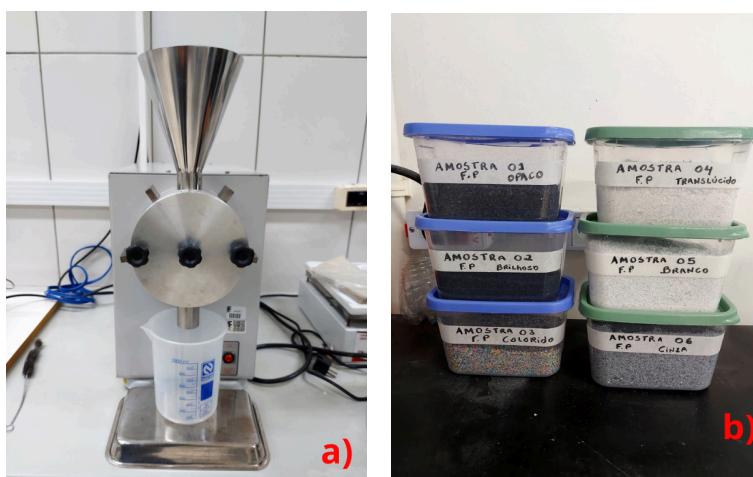
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Durante essa etapa, buscou-se identificar e selecionar os resíduos que apresentavam potencial para reaproveitamento. A triagem inicial incluiu a separação dos resíduos com base em características visuais e táteis, separando em três grupos: coloridos, brancos ou translúcidos, textura lisa ou rugosa e rigidez ou maleabilidade, de modo a facilitar as etapas posteriores de identificação e processamento. Posteriormente, foi realizada uma nova triagem, na qual os materiais foram separados em novos grupos, sendo assim, os novos grupos foram separados em polímeros pretos opacos (01.FP), polímeros pretos brilhantes (02.FP), polímeros coloridos (03.FP), polímeros translúcidos (04.FP), polímeros brancos (05.FP) e polímeros cinzas (06.FP), sendo FP significando Filamentos Poliméricos. Após a separação, realizou-se a higienização dos materiais para remoção de sujeiras, resíduos e outros contaminantes. Cada grupo de polímeros foi colocado em um recipiente individual e lavado apenas em água corrente, sem a utilização de produtos de limpeza, a fim de evitar qualquer dano ou alteração na estrutura dos materiais. Em seguida, foram deixados de molho em água limpa, que foi substituída periodicamente para prevenir contaminações. Após o período de imersão, os polímeros foram novamente lavados em água corrente e, posteriormente, levados para secagem em estufa modelo SSD 85L a 45 °C por aproximadamente 48 horas.

Os grupos que foram devidamente separados (01-FP a 06-FP) e que seriam utilizados nos ensaios de identificação dos poliméricos foram triturados previamente, a fim de obter uma granulometria reduzida e homogênea. Esse processo foi fundamental tanto para a padronização das amostras quanto para possibilitar a posterior conformação dos polímeros em filamentos e corpos de prova. A trituração foi realizada com o auxílio de um moinho de facas, garantindo a obtenção de partículas com tamanho de 2 a 4 mm.

O processo de trituração das amostras foi realizado com o auxílio do moinho de facas modelo LUCA-226/2, equipamento pertencente ao Instituto Federal do Paraná (IFPR), campus Foz do Iguaçu. Após a separação dos grupos de amostras, foi definida a utilização de aproximadamente 300 g de material por grupo para o processo de trituração. Inicialmente, o equipamento foi devidamente higienizado para garantir a ausência de contaminações cruzadas entre os materiais, e higienizado entre as trocas das amostras. Em seguida, os resíduos poliméricos eram inseridos manualmente na parte superior do moinho, onde se iniciou o processo de fragmentação. O processo era interrompido sempre que se percebia o aquecimento do equipamento, identificado tanto pelo aumento da temperatura ao toque quanto pela alteração no ruído do moinho, fenômenos associados à aderência do polímero nas pás, o que exigia a limpeza do sistema para a continuidade da operação. Sendo o processo retomado na sequência. O tempo médio de trituração por grupo variou entre 10 a 25 minutos, Dependendo das características intrínsecas de cada grupo, como coloração, aspecto visual e facilidade de fragmentação, observou-se influência direta no processo, mesmo sem a identificação precisa do tipo de polímero.

FIGURA 18 - A)MOINHO DE FACAS UTILIZADO E B) AMOSTRAS APÓS TRITURAÇÃO.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

7.2 PRODUÇÃO DOS CORPO DE PROVA

Com as amostras previamente trituradas e apresentando granulometria reduzida, foi realizada a etapa de moldagem dos corpos de prova no formato de discos. Para esse processo, utilizou-se a máquina injetora modelo MAQ-3000M, da fabricante MAQINJET, localizada no laboratório Labmaker Iguaçu do Itaipu Parquetec. Considerando-se que os polímeros analisados pertencem, em sua maioria, a grupos comumente empregados na impressão 3D, adotou-se como referência as faixas de temperatura típicas de fusão dos polímeros termoplásticos utilizados na manufatura aditiva, como PLA, PETG e PP. A temperatura de injeção foi ajustada individualmente para cada grupo de polímero com base nas características observadas em testes preliminares e nas referências da literatura.

TABELA 02 - TEMPERATURA UTILIZADA DE ACORDO COM REFERÊNCIAS DA LITERATURA.

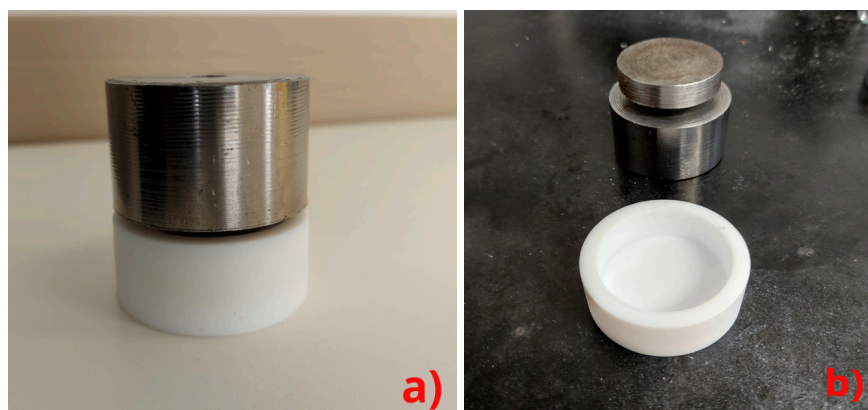
| Grupos | Temperatura utilizada (°C) | Identificação de polímeros com base na temperatura | Referências |
|---------------|-----------------------------------|---|---|
| 01-FP | 187 | PP ou PLA | MANO; MENDES, 2004; JAMSHIDIAN et al., 2010 |
| 02-FP | 189 | PP ou PLA | MANO; MENDES, 2004; JAMSHIDIAN et al., 2010 |
| 03-FP | 195 | PP ou PLA | MANO; MENDES, 2004; JAMSHIDIAN et al., 2010 |
| 04-FP | 210 | PETG ou TPU | NUNES et al., 2020; GONZÁLEZ-MURILLO et al., 2021 |
| 05-FP | 205 | PETG ou TPU | NUNES et al., 2020; GONZÁLEZ-MURILLO et al., 2021 |
| 06-FP | 200 | PLA ou PETG | JAMSHIDIAN et al., 2010; NUNES et al., 2020 |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

O processo consistiu no pré-aquecimento da injetora até a temperatura desejada, seguido pela inserção do material polimérico na câmara de alimentação e posterior injeção em um molde metálico definido como padrão para todos os ensaios. Esse modelo correspondia a um conjunto pistão-matriz, conforme ilustrado na imagem abaixo. (Figura 19) utilizado para conformação das amostras é composto por um pistão metálico e uma base polimérica branca de politetrafluoretileno (PTFE) conhecido como Teflon®. A altura total do sistema é de 53,34 mm, sendo a base inferior responsável por 20,95 mm. Esta base possui diâmetro interno de 40,08 mm e profundidade útil de 15,00 mm, adequada para conter o material durante a prensagem.

O pistão metálico se ajusta perfeitamente à cavidade, permitindo a compactação uniforme dos polímeros reciclados para posterior caracterização físico-mecânica. Para garantir a qualidade e a reprodutibilidade das amostras, foram moldadas oito unidades por grupo, com cerca de 5 a 7 gramas por amostra.

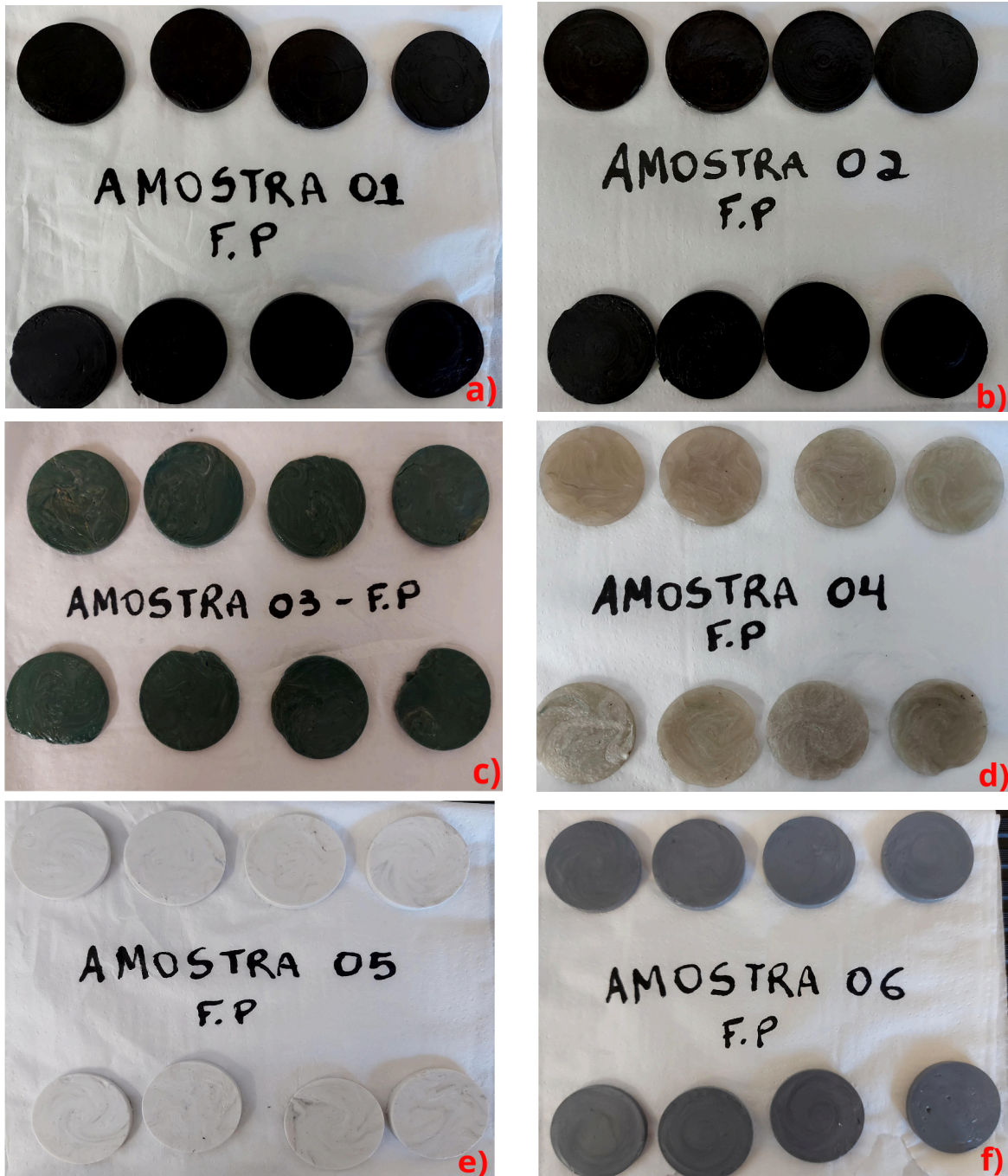
FIGURA 19 - MOLDE PISTÃO MATRIZ, NO A) VISTA DO PISTÃO-MATRIZ COM A INSERÇÃO METÁLICA NO MATERIAL POLIMÉRICO E B) VISTA DAS DUAS PARTES SEPARADAS APÓS O DESENCAIXE.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

O tempo médio para a moldagem de cada conjunto de oito amostras foi de 30 minutos, variando levemente de acordo com o comportamento térmico e a fluidez de cada material. O equipamento era limpo entre grupos para evitar contaminação entre polímeros. A Figura 20 apresenta fotografias dos corpos de prova preparados.

FIGURA 20 - AMOSTRAS EM FORMATO DE DISCO, NA ORDEM DE A) AMOSTRA 01-FP, B) AMOSTRA 02-FP, C) AMOSTRA 03-FP, D) AMOSTRA 04-FP, E) AMOSTRA 05-FP, F) AMOSTRA 06-FP.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

7.3 IDENTIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS RECICLADOS

Na etapa inicial de caracterização, foram aplicados ensaios simples de identificação de polímeros, contemplando os testes de densidade, inflamabilidade, dureza, resistência a risco, análise visual e tátil. Esses métodos foram escolhidos por fornecerem informações complementares: a densidade auxilia na diferenciação dos materiais pela massa específica; a inflamabilidade evidencia o comportamento do polímero frente à combustão; os ensaios de dureza e risco permitem avaliar a resistência superficial; enquanto as análises visuais e táteis contribuem para a identificação preliminar com base em cor, transparência, textura e flexibilidade (BILLMEYER, 1984; MANO; MENDES, 2004; CALLISTER; RETHWISCH, 2014). A adoção desses testes justifica-se pela necessidade de reconhecer, de forma prática e acessível, os polímeros presentes nas amostras em estudo, simulando procedimentos aplicados em indústrias de reciclagem, em laboratórios de controle de qualidade e em aulas práticas em determinados cursos de graduação. Além disso, os ensaios representam uma etapa preliminar essencial, servindo como base de comparação para análises instrumentais posteriores, como FTIR e TGA, o que garante maior confiabilidade e robustez metodológica ao trabalho.

7.3.1 TESTE VISUAL

Para a realização deste e dos testes a seguir foram utilizadas uma amostra de cada grupo dos filamentos poliméricos sendo eles, polímeros pretos opacos (01.FP), polímeros pretos brilhantes (02.FP), polímeros coloridos (03.FP), polímeros translúcidos (04.FP), polímeros brancos (05.FP) e polímeros cinzas (06.FP). As amostras foram analisadas sob luz ambiente, em bancada limpa, de forma padronizada. Para cada amostra, foi registrado se o material apresentava aspecto translúcido, opaco ou transparente, bem como possíveis alterações de cor decorrentes do uso ou degradação. Também foi observado o brilho da superfície, categorizando-o como fosco ou brilhante.

7.3.2 TESTE TÁTIL

Com o intuito de complementar a análise sensorial, foi realizado o teste tátil, utilizando apenas o contato manual direto com as amostras. Durante a manipulação, foi avaliada a textura da superfície (lisa ou áspera), bem como a flexibilidade das amostras por meio de tentativas controladas de curvatura ou dobramento. A resposta ao toque fornece indícios sobre a composição do polímero, sua resistência ao envelhecimento,

presença de plastificantes ou mesmo o grau de cristalinidade, sendo, portanto, uma etapa relevante para o reconhecimento preliminar do tipo de material.

7.3.3 TESTE RESISTÊNCIA AO RISCO

Para a realização deste teste utilizou-se um clipe de papel metálico (sem ponta cortante), que foi deslizado sobre a superfície de cada amostra com força moderada e constante. A facilidade com que a superfície foi marcada foi registrada e classificada de forma qualitativa: risco de baixa resistência (marcação fácil), média resistência (marcação moderada) ou alta resistência (marcação difícil). Esse teste é útil para inferir a dureza superficial do material e pode sugerir o tipo de polímero ou possíveis tratamentos superficiais aplicados anteriormente.

7.3.4 TESTE DE DENSIDADE POR FLUTUAÇÃO

A determinação empírica da densidade das amostras foi realizada utilizando o método de flutuação em soluções de diferentes densidades. Água destilada e solução de álcool etílico (96% P.A Êxodo Científica®) foram utilizadas para esse teste. Amostras foram imersas em cada solução, observando-se seu comportamento (flutuação, submersão ou suspensão).

7.3.5 TESTE DE INFLAMABILIDADE

O teste de inflamabilidade teve como objetivo observar o comportamento das amostras diante da exposição direta à chama. Cada amostra foi fixada com segurança e exposta por aproximadamente 10 segundos à chama de um maçarico de baixa potência. Foram registradas as seguintes variáveis: se a amostra apresentou queima contínua após a retirada da chama, coloração da chama, presença de gotejamento, liberação de fumaça ou fuligem, além do odor emitido durante a queima.

7.3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV

A Microscopia Eletrônica de Varredura tem como objetivo fazer análises morfológicas das amostras. Para isso, as amostras foram presas em porta amostra metálica, com fita dupla face, e recobertas por uma fina camada de ouro, permitindo assim que a superfície se tornasse eletricamente condutora. As avaliações morfológicas foram realizadas através do microscópio eletrônico Zeiss EVO-MA10 (Figura 21), operando com energia de aceleração de 0,2 a 30 kV.

FIGURA 21 - EQUIPAMENTO MEV.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

7.3.7 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER - FTIR

A análise por Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi realizada a fim de identificar qualitativamente os polímeros presentes nas amostras. Para isso, utilizou-se um espectrômetro modelo Spectrum 100S da PerkinElmer, as análises foram conduzidas no intervalo de $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$, com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras por amostra.

7.3.8 TERMOGRAVIMÉTRICA - TGA

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada com o objetivo de avaliar o comportamento térmico dos materiais e identificar faixas de degradação características dos polímeros presentes nas amostras. Para isso, utilizou-se um equipamento termogravimétrico modelo PerkinElmer STA 6000 configurado com atmosfera de nitrogênio, com fluxo de gás mantido a 20 mL/min . O ensaio consistiu no aquecimento das amostras de 30 °C até 550 °C , a uma taxa de 10 °C/min .

7.4 SEPARAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS POLÍMEROS PARA IMPRESSÃO

Após a realização das análises preliminares, iniciou-se o processo de produção dos filamentos, utilizando o material previamente triturado. Para garantir a qualidade do processamento, as amostras foram submetidas a uma etapa de secagem em estufa modelo SSD 85L a 45 °C por aproximadamente 20 horas, procedimento essencial para a eliminação da umidade residual. A presença de água nos polímeros pode comprometer significativamente o desempenho durante a extrusão, provocando falhas na estrutura do filamento, instabilidades no fluxo do material e redução da resistência mecânica das peças impressas (3D Fila, 2025; Filament2Print, 2025; Filamento 3D Lab, 2025; TechCD, 2025).

O grupo 03-FP foi processado na extrusora Filabot EX2 (Figura 22). A temperatura de operação foi inicialmente ajustada para 180 °C e, após o pré-aquecimento, o material triturado foi inserido na extrusora. Observou-se, entretanto, que o polímero não atingia a consistência adequada para a formação contínua do filamento, apresentando-se excessivamente líquido e com baixa estabilidade. Diante dessa dificuldade, foram realizados ajustes progressivos na temperatura da extrusora. Mesmo assim, os resultados permaneceram insatisfatórios, indicando que outros parâmetros do processo, além da temperatura, podem influenciar a qualidade final do filamento, reforçando a importância do controle rigoroso das condições de secagem e extrusão (Filamento 3D Lab, 2025; TechCD, 2025).

FIGURA 22 - EXTRUSORA FILABOT EX2.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Uma vez solucionadas as inconsistências na produção dos filamentos, deu-se seguimento a produção e dos seis grupos de amostras analisados, cinco resultaram na

produção de filamentos com qualidade próxima à dos filamentos comerciais o que permitiu dar prosseguimento à aplicação na impressão 3D.

7.5 APLICAÇÃO EM IMPRESSÃO 3D

Após a produção e armazenamento dos filamentos, respeitando um período de 24 horas na estufa modelo SSD 85L para estabilização do material, iniciou-se o processo de impressão 3D. Como mencionado anteriormente, apenas cinco filamentos foram considerados aptos para essa etapa, devido à sua adequação dimensional e visual. Para a avaliação inicial do desempenho dos filamentos em impressão, optou-se por um objeto de geometria simples, um dado comum, com o intuito de verificar a viabilidade de impressão e o comportamento do material durante o processo. A princípio, a intenção era realizar os testes na impressora Wanhao Duplicator 9. No entanto, verificou-se que o bico estava entupido, sendo necessário alterar o equipamento, e os testes foram então realizados na impressora Creality K1 Max (Figura 23). Após a inserção do filamento e a realização dos ajustes necessários, a impressão foi iniciada.

FIGURA 23 - IMPRESSORA CREALITY K1 MAX.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Finalizadas as impressões e as análises dos objetos produzidos, o material polimérico remanescente foi devolvido ao LabMaker Iguazu. Os filamentos polímeros devolvidos foram devidamente separados conforme os grupos de amostras analisados (01-FP a 06-FP). A devolução teve como objetivo possibilitar a continuidade do projeto de reutilização de materiais, visando a futura produção de novos filamentos.

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1 ANÁLISE DE TESTE DE BANCADA

O teste visual fornece uma análise inicial baseada apenas na cor e no brilho dos materiais. A Tabela 03 mostra que apenas os grupos 01.FP e 02.FP têm coloração preta, diferenciando-se pelo brilho: 01.FP é opaco e 02.FP, brilhoso. Já os grupos 02.FP e 03.FP são os únicos com superfície brilhante.

TABELA 03 - CARACTERÍSTICAS VISUAIS DAS AMOSTRAS ANALISADAS.

| Amostras | Cor aparente | Material brilhoso |
|----------|--------------|-------------------|
| 01-FP | Preto | Não |
| 02-FP | Preto | Sim |
| 03-FP | Colorido | Sim |
| 04-FP | Translúcido | Não |
| 05-FP | Branco | Não |
| 06-FP | Cinza | Não |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Já o teste tátil (Tabela 04) demonstra que todos os materiais analisados apresentaram superfície lisa, somente o grupo 02.FP, que exibiu leve flexibilidade, diferindo dos demais, que foram classificados como duros e rígidos ao toque.

TABELA 04 - CARACTERÍSTICAS TÁTEIS DAS AMOSTRAS ANALISADAS.

| Amostras | Toque (Material liso, áspero) | Material Rígido |
|----------|-------------------------------|-----------------|
| 01-FP | Liso | Rígido |
| 02-FP | Liso | Semi-Rígido |
| 03-FP | Liso | Rígido |
| 04-FP | Liso | Rígido |
| 05-FP | Liso | Rígido |
| 06-FP | Liso | Rígido |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Na Tabela 05, referente ao teste de resistência ao risco, observou-se que os grupos 04.FP e 05.FP foram os que apresentaram maior facilidade de serem riscados, exigindo força mínima para marcar a superfície. Os demais grupos exigiram força moderada, indicando maior resistência superficial ao arranhão.

TABELA 05 - TESTE DE RESISTÊNCIA AO RISCO.

| Amostras | Facilidade em riscar | Força utilizada |
|----------|----------------------|-----------------|
| 01-FP | Médio | Moderada |
| 02-FP | Médio | Moderada |
| 03-FP | Médio | Moderada |
| 04-FP | Alta | Baixa |
| 05-FP | Médio | Moderada |
| 06-FP | Alta | Baixa |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

No teste referente a densidade por flutuação, realizado em meios líquidos como água (1 g/cm^3) e álcool etílico ($0,79 \text{ g/cm}^3$). A grande maioria dos grupos de amostras apresentaram comportamento semelhante, afundando em ambas as soluções, o que sugere densidade superior a 1 g/cm^3 . No entanto, somente o 04-FP flutuou na água, porém afundou no álcool, o que sugere que sua densidade é próximo a $1,0 \text{ g/cm}^3$, como apresentado na Tabela 06.

TABELA 06 - RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO TESTE DE DENSIDADE DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.

| Amostras | Água | Álcool Etílico |
|----------|---------|----------------|
| 01-FP | Afundou | Afundou |
| 02-FP | Afundou | Afundou |
| 03-FP | Afundou | Afundou |
| 04-FP | Flutuou | Afundou |
| 05-FP | Afundou | Afundou |
| 06-FP | Afundou | Afundou |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Por fim, a tabela com o resultado do teste de inflamabilidade apresenta os resultados de odor ao aquecimento e comportamento térmico (Tabela 07). Os grupos 01.FP e 02.FP emitiram odor forte, fundiram de forma rápida e apresentaram coloração azulada na chama, indicando possível presença de aditivos. O grupo 03.FP teve odor fraco, fundiram rapidamente e a chama apresentou coloração amarelo-claro. Já os grupos 04.FP, 05.FP e 06.FP apresentaram odor de intensidade média, com combustão ativa e coloração da chama laranja claro, sugerindo similaridade entre suas composições.

TABELA 07 - RESULTADOS DO TESTE DE INFLAMABILIDADE REALIZADO NAS AMOSTRAS ESTUDADAS.

| Amostras | Odor | Fusão ou Ignição | Cor da chama |
|----------|------------|------------------|---------------|
| 01-FP. | Odor forte | Fusão | Azul |
| 02-FP. | Odor forte | Fusão | Azul |
| 03-FP. | Odor fraco | Fusão | Amarelo claro |
| 04-FP. | Odor médio | Ignição | Laranja forte |
| 05-FP. | Odor médio | Ignição | Laranja claro |
| 06-FP. | Odor médio | Ignição | Laranja claro |

FORTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Diante da diversidade de comportamentos observados nos testes de bancada, elaborou-se uma tabela (Tabela 08) com o propósito de organizar e consolidar todos os dados obtidos de forma sistemática. Essa tabela visa facilitar a análise comparativa entre os diferentes grupos de polímeros, destacando características como aspecto visual, comportamento térmico e resposta mecânica. Além disso, serve como instrumento de apoio para a triagem inicial e para a identificação preliminar dos materiais estudados, contribuindo significativamente para a interpretação dos resultados e o direcionamento das etapas subsequentes da pesquisa.

TABELA 08 - RESULTADOS OBTIDOS.

| Amostras | 01-FP | 02-FP | 03-FP | 04-FP | 05-FP | 06-FP |
|----------------------------|------------------|------------------|------------------|---|------------------|------------------|
| Cor | Preto | Preto | Colorido | Translúcido | Branco | Cinza |
| Brilho | Opaco | Brilhoso | Brilhoso | Opaco | Opaco | Opaco |
| Toque | Liso | Liso | Liso | Liso | Liso | Liso |
| Flexível | Não | Médio | Não | Não | Não | Não |
| Resistência a risco | Médio | Médio | Médio | Fácil | Médio | Fácil |
| Densidade | Afundou em ambas | Afundou em ambas | Afundou em ambas | Flutuou em H ₂ O/ Afundou no álcool | Afundou em ambas | Afundou em ambas |
| Odor | Forte | Forte | Fraco | Médio | Médio | Médio |
| Tipo de Combustão | Fusão | Fusão | Fusão | Ignição | Ignição | Ignição |
| Chama | Azul | Azul | Amarelo | Laranja Claro | Laranja Claro | Laranja Claro |

FORNTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Com base nas características observadas durante os testes de bancada como coloração e intensidade da chama, odor liberado durante a combustão, aspecto superficial, facilidade de marcação e comportamento térmico e considerando os polímeros mais frequentemente utilizados na impressão 3D, foi possível estabelecer uma comparação com propriedades físico-químicas conhecidas de diferentes tipos de polímeros descritos na literatura. Essa análise comparativa possibilitou a proposição da Tabela 09, que sugere a possível identidade dos materiais testados.

A identificação preliminar das amostras considerou parâmetros como densidade aparente, aparência visual, rigidez, flexibilidade e resposta à chama, que são amplamente utilizados na triagem de polímeros em análises qualitativas (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Sendo assim, as amostras 01-FP e 02-FP apresentaram comportamento característico do Polipropileno (PP), evidenciado pela baixa densidade, elevada resistência química, chama azulada e odor intenso durante a combustão, além de serem naturalmente opacas (ASM INTERNATIONAL, 2001). A amostra 02-FP similar a primeira amostra, por sua vez, exibiu acabamento superficial brilhante e maior

flexibilidade, sugerindo a presença de reforços minerais, o que é comum na formulação de blendas poliméricas para melhorar propriedades mecânicas (COSSU; MONTICELLI, 2017).

As amostras 03-FP, 05-FP e 06-FP apresentaram comportamento típico do Ácido Polilático (PLA), com chama amarelada, odor doce ou fraco e baixa flexibilidade, características amplamente relatadas por Strong (2006) e Garlotta (2001). A amostra 06-FP, em particular, mostrou-se de fácil resistência a risco e aparência visual compatível com PLA puro ou PLA com algum tipo de reforço, como fibras naturais ou aditivos nucleantes, comumente utilizados para melhorar sua resistência térmica e mecânica (GEBISA; LANGDON, 2015).

A amostra 04-FP, que apresentou chama laranja intensa e boa marcabilidade, indicou uma possível mistura de PETG com PP. O PETG, por ser um copolímero do PET com adição de glicol, apresenta boa transparência, maior resistência ao impacto em relação ao PLA e características térmicas intermediárias, sendo frequentemente utilizado em aplicações que exigem boa estabilidade dimensional (COSSU; MONTICELLI, 2017).

Dessa forma, a Tabela 09 consolida os resultados dos testes empíricos, alinhando-os com propriedades amplamente descritas na literatura, e serve como base para uma identificação preliminar dos materiais analisados, com vistas ao seu potencial uso como filamentos na impressão 3D.

TABELA 09 - POSSÍVEIS POLÍMEROS LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO OS TESTES REALIZADOS.

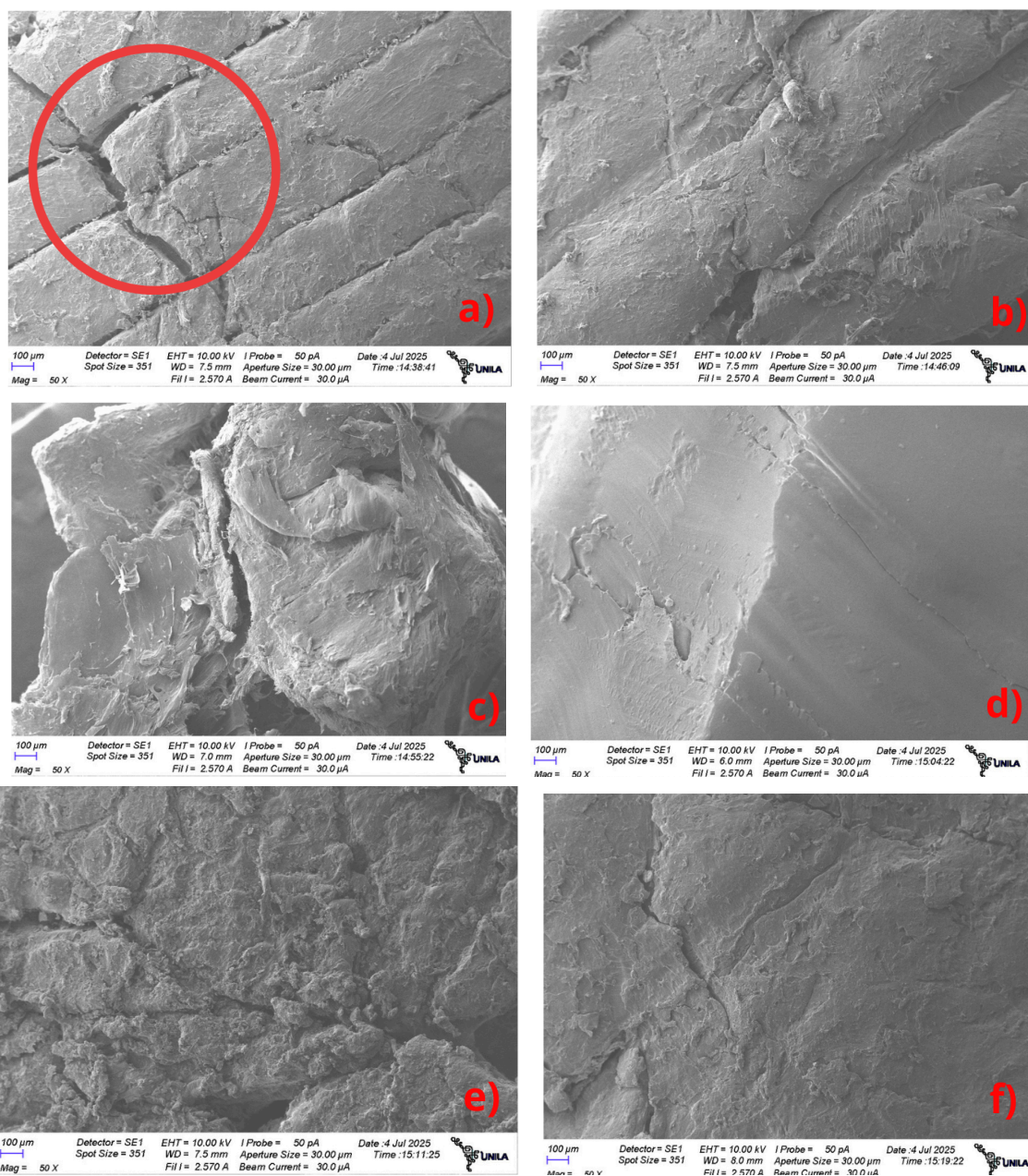
| Amostra | Provável polímeros |
|---------|-----------------------------|
| 01-FP | PP (puro) |
| 02-FP | PP + algum reforço |
| 03-FP | PLA |
| 04-FP | PETG + PP (puro) |
| 05-FP | PLA |
| 06-FP | PLA (puro) ou PLA + reforço |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

8.2 ANÁLISE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV

A caracterização morfológica das amostras por MEV mostrou-se essencial para avaliar o comportamento estrutural dos materiais como filamentos para impressão 3D. As imagens obtidas (Figura 24) permitiram analisar a morfologia de fratura, possibilitando inferências sobre a composição, homogeneidade e a viabilidade de uso na manufatura aditiva.

FIGURA 24 - AMOSTRAS DO MEV. A) AMOSTRA 01-FP, B) AMOSTRA 02-FP, C) AMOSTRA 03-FP, D) AMOSTRA 04-FP, E) AMOSTRA 05-FP E F) AMOSTRA 06-FP.



FORTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

A amostra 01-FP apresentou uma superfície de fratura caracterizada por morfologia rugosa, com estrias características de ruptura frágil. É possível observar a presença de uma fibra imersa na matriz polimérica destacada pelo círculo vermelho, provavelmente fibra de carbono, pois a fibra apresenta morfologia alongada e superfície lisa, em contraste com a matriz polimérica, caracterizada por fraturas irregulares e textura rugosa confirmando esta amostra como um compósito. Já a amostra 02-FP apresentou superfície de fratura altamente rugosa e com formas irregulares e contorções, com indícios de deformação plástica. Há também a presença de algumas fissuras na superfície e sem a indicação de fibras de reforço.

A amostra 03-FP exibiu uma morfologia de fratura dúctil, indicando cisalhamento durante a fratura para a preparação da amostra. Não há a observação de fibras para reforço. Na amostra 04-FP, observou-se uma fratura de superfície lisa, com curvas suaves em forma de concha (conchoidais). Esse padrão possivelmente pode estar relacionado a estrias formadas durante a fratura, o que sugere um comportamento mais frágil. Além disso, não foram identificados particulados ou fibras de reforço nesse material.

A amostra 05-FP apresentou fratura extremamente porosa e granular, associada a estruturas possivelmente particuladas. Já a análise morfológica da amostra 06-FP apresentou morfologia rugosa com áreas de fratura, sem evidência de carga. A homogeneidade foi considerada moderada, mas ainda inferior ao ideal para impressão 3D com alto desempenho.

Por fim, as análises morfológicas das amostras poliméricas por MEV permitiu avaliar a morfologia da superfície das amostras, evidenciando a homogeneidade e presença de fibras de reforço.

8.3 ANÁLISE ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER - FTIR

A espectroscopia FTIR é uma técnica eficaz para identificar polímeros, pois analisa as bandas de absorção específicas dos grupos funcionais, permitindo diferenciar materiais mesmo visualmente semelhantes. Essa caracterização é fundamental para determinar o tipo de polímero presente, o que auxilia na seleção, reciclagem e aplicação adequada dos materiais. Essa abordagem permite identificar compostos como poliolefinas, poliésteres e poliuretanos com boa confiabilidade, a partir da presença ou ausência de bandas típicas, como estiramento C=O, N-H, CH₂ ou C-O-C. A Tabela 10

apresenta os principais picos atribuídos aos polímeros PP, PLA, PETG e TPU, conforme amplamente descrito na literatura científica (SIMÕES et al., 2012; GONZÁLEZ-MURILLO et al., 2021; JAMSHIDIAN et al., 2010; NUNES et al., 2020).

TABELA 10 - QUADRO DE PICOS CARACTERÍSTICOS DOS POLÍMEROS.

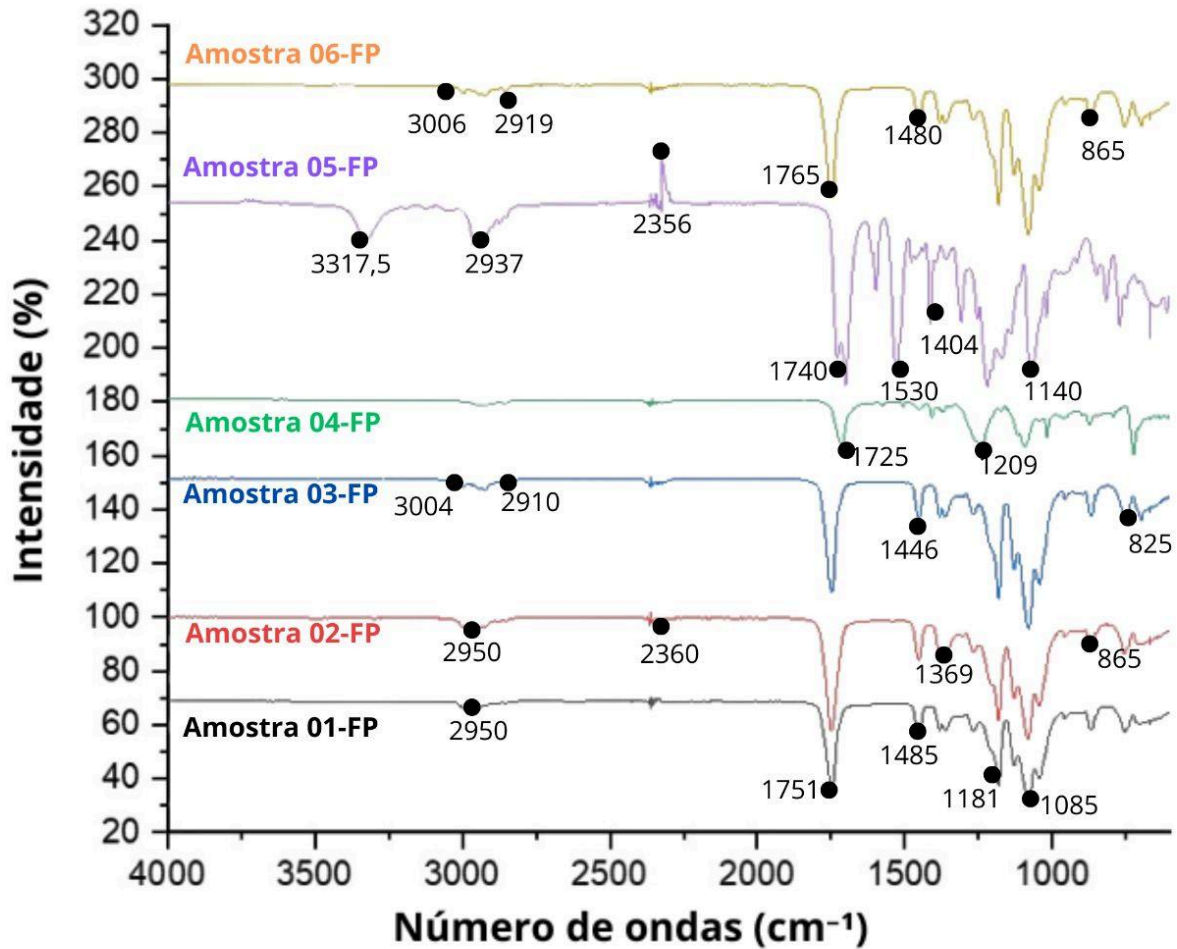
| Polímero | Pico (cm ⁻¹) | Atribuição |
|----------|--------------------------|--|
| PP | ~2950 | Estiramento assimétrico CH ₃ |
| | ~2915 | Estiramento assimétrico CH ₂ |
| | ~1455 | Deformação angular CH ₂ |
| | ~1375 | Deformação angular CH ₃ |
| | ~840–800 | Vibração fora do plano de CH |
| | ~750 | Dobras do grupo CH ₃ |
| PLA | ~1750–1760 | Estiramento C=O (carbonila de éster) |
| | ~1180, ~1080 | Estiramento C–O–C (éster) |
| | ~1455, ~1360 | Deformações CH ₂ /CH ₃ |
| | ~2940 | Estiramento C-H |
| | ~870–750 | Dobras fora do plano de C–H |
| PETG | ~1715 | Estiramento C=O (éster, deslocado) |
| | ~1240, ~1090 | Estiramento C–O |
| | ~3000–3100 | Estiramento aromático C-H |
| | ~730, ~870 | Dobras fora do plano de C–H (aromático) |
| TPU | ~3300–3400 | Estiramento N–H (banda larga) |
| | ~1700–1725 | Estiramento C=O (uretanodiona) |
| | ~1530 | Deformação N–H + estiramento C–N |
| | ~1220–1070 | Estiramento C–O–C e C–N |
| | ~2960 | Estiramento C–H (alifático) |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

A análise comparativa permite a identificação das bandas específicas

associadas a cada polímero, auxiliando na caracterização e verificação da composição das amostras estudadas. A partir da tabela de comparação, fez-se início às análises dos gráficos obtidos através do FTIR. A Figura 25 abaixo mostra a imagem com os gráficos do FTIR.

FIGURA 25 - ESPECTRO DE FTIR DAS AMOSTRAS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Na amostra 01-FP, foram observadas bandas intensas em 2951 cm^{-1} (estiramento assimétrico do grupo metila, CH_3) e 1751 cm^{-1} (estiramento $\text{C}=\text{O}$ de grupo éster), característica marcante de poliésteres como o PLA e o PETG. Além disso, picos em 1184 cm^{-1} e 1085 cm^{-1} são atribuídos ao estiramento $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ (grupo éster), enquanto as deformações da ligação CH ocorrem em 1445 e 1369 cm^{-1} . A ausência de banda $\text{N}-\text{H}$ ($\sim 3300\text{ cm}^{-1}$), bem como a ausência de sinais típicos de ureia ou uretano, contribui para a exclusão do TPU. Esses resultados são compatíveis com os descritos por González-Murillo et al. (2021) e Simoes et al. (2012), indicando que a amostra 01-FP é

provavelmente composta por PLA reforçado com fibra de carbono.

De forma análoga, a amostra 02-FP apresentou espectro praticamente idêntico ao da amostra 01-FP, também compatível com um poliéster alifático, sugerindo a presença de PLA (RAMOS et al., 2018).

A amostra 03-FP apresentou um pico intenso em 1755 cm^{-1} , característico do estiramento da carbonila ($\text{C}=\text{O}$), intensamente associado à estrutura de poliésteres. As bandas em 1180 cm^{-1} e 1080 cm^{-1} , referentes ao estiramento do grupo éster $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, são amplamente relatadas como típicas do PLA (GUERRA et al., 2016). A presença da banda em 2944 cm^{-1} , correspondente ao estiramento $\text{C}-\text{H}$ de grupos metila/metileno, também corrobora com a estrutura desse polímero. Bandas menos intensas em 860 cm^{-1} e 749 cm^{-1} podem estar relacionadas a variações no grau de cristalinidade, como discutido por Jamshidian et al. (2010). Assim, conclui-se que a amostra 03-FP corresponde ao PLA puro.

Na amostra 04-FP, a banda em 1715 cm^{-1} (estiramento da carbonila) sugere a presença de grupos ésteres. Esse deslocamento em relação ao valor típico do PLA ($1750\text{--}1760\text{ cm}^{-1}$) é indicativo de PETG (CHOI et al., 2015), reforçado pelas bandas entre $1240\text{--}1014\text{ cm}^{-1}$ (ligações éster/éter) e pelo pico em 3004 cm^{-1} , além da banda em 730 cm^{-1} , indicativa de estruturas aromáticas. A ausência de picos em torno de 1375 cm^{-1} e 1450 cm^{-1} , associados ao PP, reforça a exclusão deste polímero. Assim, a amostra 04-FP apresenta espectro compatível com PETG (SIMOES et al., 2012; RAMOS et al., 2018).

A banda larga em 3317 cm^{-1} , observada na amostra 05-FP, é característica de grupos $\text{N}-\text{H}$, fortemente associados ao TPU. O pico de 1710 cm^{-1} confirma a presença de grupos carbonila ($\text{C}=\text{O}$), enquanto os estiramentos $\text{C}-\text{O}$ e $\text{C}-\text{N}$ (entre $1224\text{--}1058\text{ cm}^{-1}$) são típicos de grupos uretânicos (NUNES et al., 2020). Bandas entre $1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$, como 1592 e 1532 cm^{-1} , são comuns em compostos com segmentos rígidos de ureia e uretrano. Picos referentes ao PTEG também podem ser vistos no espectro da amostra 05-FP. Dessa forma, a amostra 05-FP apresenta espectro claramente compatível com PETG e TPU.

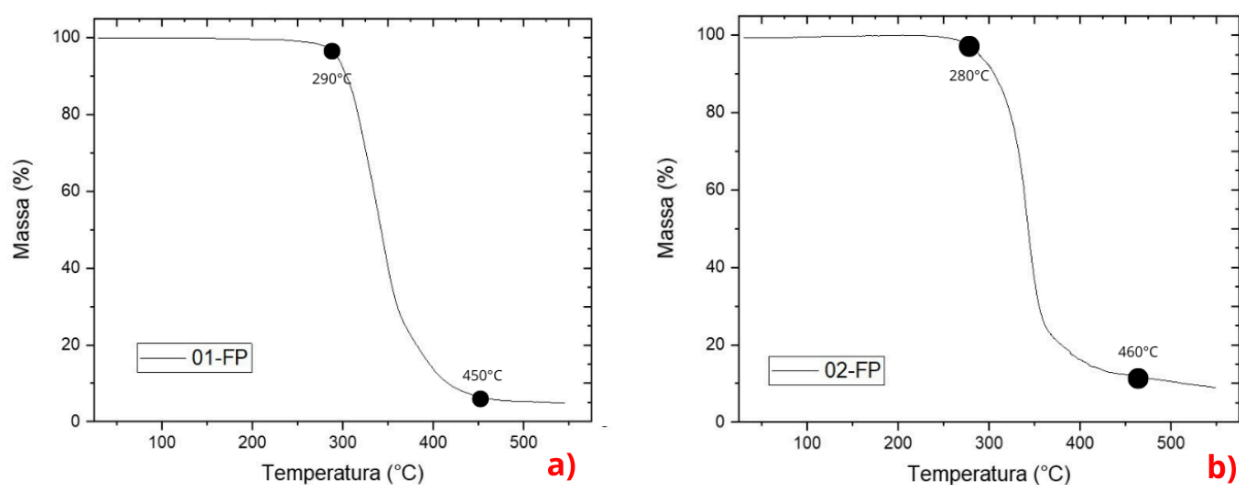
Por fim, a amostra 06-FP apresentou um pico forte em 1785 cm^{-1} , acima da faixa esperada para PETG, o que indica fortemente a presença de PLA (GUERRA et al., 2016). Os picos de 1202 cm^{-1} e 1072 cm^{-1} reforçam a presença de ligações $\text{C}-\text{O}-\text{C}$

(éster). A ausência de bandas amplas de N–H e a ausência de indicadores de PETG ou TPU confirmam a predominância de PLA na amostra 06-FP, embora não se descarte totalmente a possibilidade de aditivos ou reforços alterarem levemente o espectro.

8.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA TGA

A Análise Termogravimétrica (TGA) foi realizada com o objetivo de investigar o comportamento térmico das amostras rotuladas de 01-FP a 06-FP, buscando inferir suas prováveis composições poliméricas. Esta técnica baseia-se no monitoramento da variação de massa de uma amostra em função da temperatura, permitindo identificar etapas de degradação térmica, formação de resíduos e possíveis transições associadas à decomposição dos materiais. A Figura 26 apresenta os espectros de TGA das amostras 01-FP e 02-FP analisadas. A literatura mostra que, em geral, o PLA apresenta perfil térmico com degradação principal entre 280–360 °C, com perda de massa única e bem definida, restando quase nenhum resíduo (KUMAR et al., 2020; FARAH et al., 2016). O PETG geralmente inicia degradação acima de 360 °C e pode apresentar resíduos em torno de 5% em massa (SIMOES et al., 2012). O PP degrada acima de 400 °C em evento único, com pouca ou nenhuma formação de resíduo (GONZÁLEZ-MURILLO et al., 2021). Já o TPU pode apresentar múltiplas etapas de degradação, sendo o evento principal em torno de 400 °C, com degradação prolongada e presença de resíduos carbonáceos em torno de 20% (NUNES et al., 2020).

FIGURA 26 - TGA DAS AMOSTRAS ANALISADAS, A) AMOSTRA 01-FP E B) AMOSTRA 02-FP.

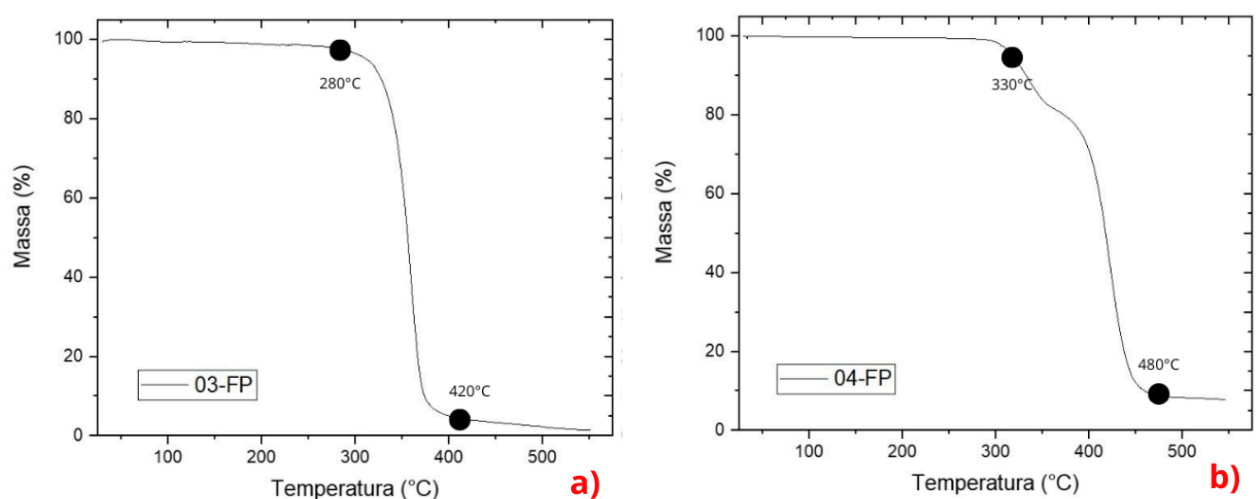


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

A curva de TGA da amostra 01-FP apresenta uma única etapa de perda de massa significativa, iniciando-se por volta de 290 °C e finalizando em torno de 450 °C, com um resíduo final inferior a 5%. Esse perfil térmico é característico do PLA. A ausência de múltiplas etapas também indica que não há presença significativa de aditivos termoestáveis ou cargas minerais, apesar de ter sido observada a presença de fibras por MEV (KUMAR et al., 2020).

A amostra 02-FP também demonstrou um padrão térmico semelhante ao da 01-FP, com uma etapa principal de degradação térmica iniciando-se próximo a 280 °C e se estendendo até 460 °C.

FIGURA 27 - TGA DAS AMOSTRAS ANALISADAS, A) AMOSTRA 03-FP E B) AMOSTRA 04-FP.

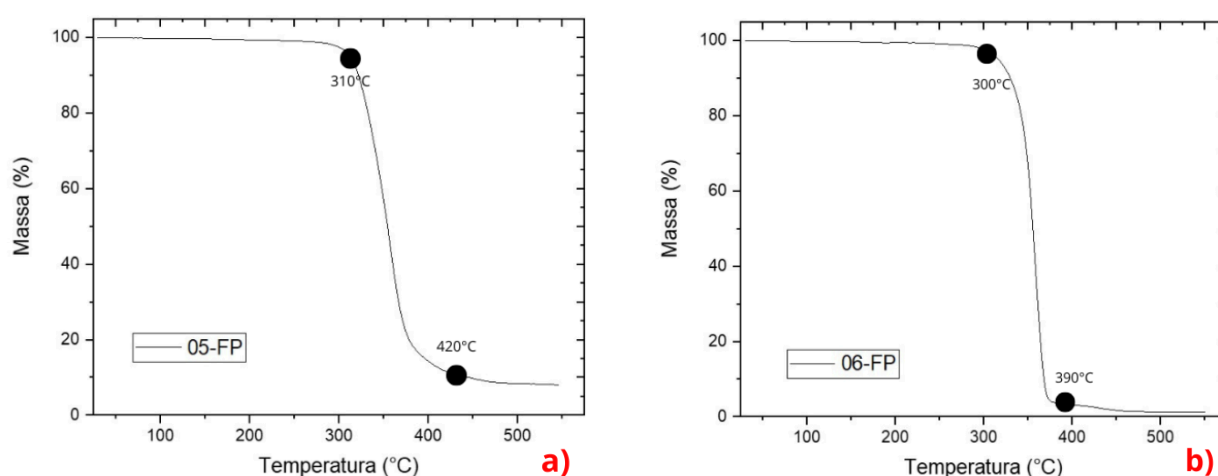


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Na Figura 27, temos as amostras 03-FP e 04-FP, o comportamento térmico da amostra 03-FP apresentou uma única etapa bem definida de degradação, iniciando-se em torno de 280 °C e finalizando pouco antes dos 420 °C, com resíduo mínimo. Esse comportamento, semelhante ao das amostras 01 e 02-FP, reforça a composição de PLA, conforme relatado por Kumar et al. (2020). A ausência de resíduos indica alta pureza e ausência de cargas minerais. A fragilidade tátil e a ausência de odor forte durante testes complementares também sustentam essa identificação. A curva da amostra 04-FP difere das anteriores por apresentar uma degradação térmica mais complexa. A perda de massa ocorre de forma mais gradual, com inflexão perceptível antes da queda principal, iniciando em torno de 330 °C e finalizando após os 480 °C, com um resíduo final superior a 8%.

Tais características são indicativas de copolímeros como o PETG. O PETG, por sua estrutura copolimérica, tende a apresentar perfis de degradação mais amplos, com ombros na curva de TGA e formação de resíduos associados à estrutura aromática e a possíveis aditivos (FARAH et al., 2016; SIMOES et al., 2012). A aparência translúcida observada na amostra, somada à facilidade de riscar e ao brilho moderado, também corrobora essa hipótese.

FIGURA 28 - TGA DAS AMOSTRAS ANALISADAS, A) AMOSTRA 05-FP E B) AMOSTRA 06-FP.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Já na Figura 28, é possível observar a análise das amostras 05-FP e 06-FP. A amostra 05-FP revelou uma curva de degradação térmica muito próxima à da 04-FP, com início da decomposição aos 310 °C e término próximo aos 420 °C. A ausência de resíduos significativos e o comportamento térmico homogêneo sustentam a identificação como PETG, embora a presença de TPU ainda não possa ser totalmente descartada sem outras análises confirmatórias (NUNES et al., 2020).

O perfil de TGA da amostra 06-FP se destacou por apresentar uma perda de massa abrupta entre 300 °C e 390 °C, sem etapas intermediárias e com praticamente nenhum resíduo. Este perfil de degradação indica a presença de PLA, como observado por Kumar et al. (2020) e apoiado pelos dados de FTIR.

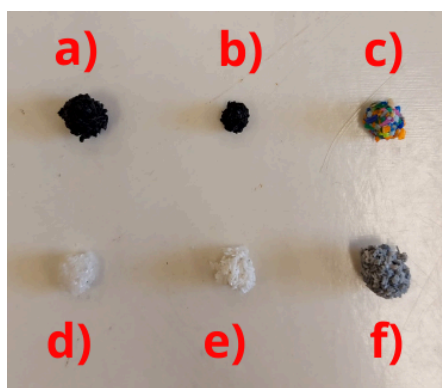
A TGA permitiu identificar diferentes perfis térmicos entre os grupos analisados, possibilitando propor as seguintes composições principais para cada amostra:

- 01-FP, 02-FP, 03-FP e 06-FP: PLA;
- 04-FP: PETG;
- 05-FP: PETG ou PETG com traços de TPU.

8.5 ANÁLISE DA PREPARAÇÃO DOS POLÍMEROS PARA IMPRESSÃO

Para contornar a limitação da produção dos filamentos, optou-se pela formação de pellets com granulometria maior, que facilitarão o fluxo e alimentação contínua na extrusora. Para isso, foi preparada uma solução aglutinante de PVA 2% diluída em água e armazenada em recipiente tipo spray. As amostras foram organizadas em bandejas e pulverizadas com a solução, sendo posteriormente agitadas manualmente para promover a formação dos pellets. Em seguida, os materiais foram colocados em estufa modelo SSD 85L a 50 °C por 24 horas, garantindo a secagem completa. No dia seguinte, os pellets, com tamanho variando entre 8 e 10 mm, foram transferidos para béqueres, facilitando sua introdução na extrusora. O processo de extrusão foi então reiniciado, foram realizados novos ajustes de temperatura e ventilação, sendo que nas primeiras tentativas o material ainda apresentava comportamento de fusão excessiva. Após sucessivos testes, foi possível determinar a temperatura ideal de extrusão, possibilitando a formação de um filamento com aspecto visual e consistência adequados. A Figura 29 apresenta pellets preparados a partir das amostras separadas.

FIGURA 29 - PELLETS DAS AMOSTRAS, NA ORDEM DE A) AMOSTRA 01-FP, B) AMOSTRA 02-FP, C) AMOSTRA 03-FP, D) AMOSTRA 04-FP, E) AMOSTRA 05-FP, F) AMOSTRA 06-FP.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Durante a extrusão, foi observada certa variação de espessura dos filamentos iniciais, com valores superiores ao recomendado para uso em impressoras 3D. No entanto, os parâmetros operacionais foram ajustados ao longo do processo até que se atingisse o diâmetro ideal de 1,75 mm, padrão comercial utilizado em impressão 3D. Para isso, foram necessários ajustes simultâneos de temperatura, velocidade do motor da extrusora, ventilação e tração do filamento, esses parâmetros foram colocados na tabela 11 abaixo.

TABELA 11 - QUANTIDADE DE FILAMENTOS PRODUZIDOS E ALGUNS PARÂMETROS IMPORTANTES.

| Amostras | Temperatura ideal (°C) | Quantidade produzida (g) | Parâmetros Importantes |
|----------|------------------------|--------------------------|--|
| 01-FP | 195 | — | — |
| 02-FP | 170 | 5,20 | Ambos os parâmetros iguais (velocidade média) |
| 03-FP | 180 | 7,59 | Tração do filamento (médio para lento) |
| 04-FP | 205 | 7,93 | Ambos os parâmetros iguais (velocidade baixa) |
| 05-FP | 185 | 8,35 | Velocidade do motor e da extrusora (rápido para médio) |
| 06-FP | 185 | 7,97 | Tração do filamento (médio para lento) |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

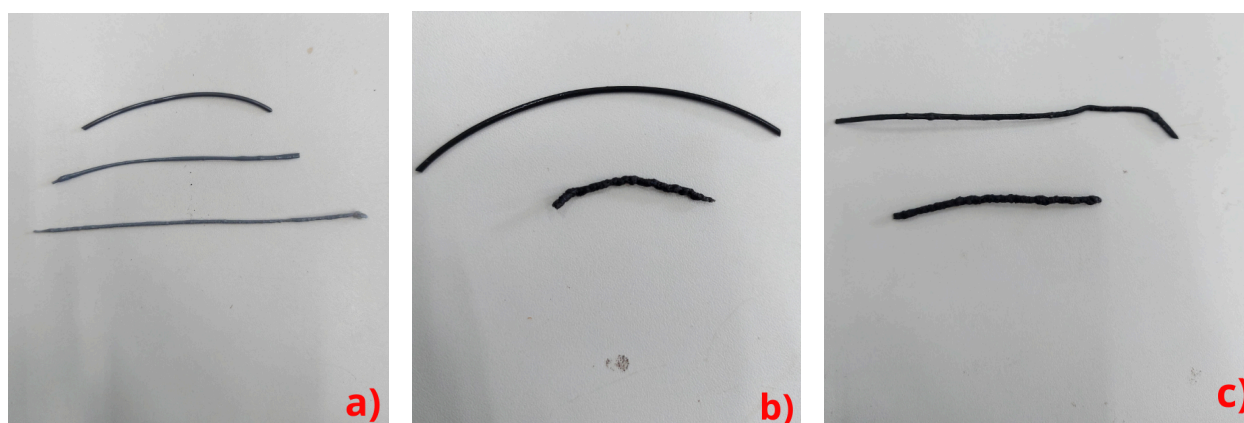
A tração do filamento foi realizada de forma manual, lenta e contínua, com o objetivo de evitar fraturas. Uma vez que o sistema alcançava estabilidade, as velocidades de extrusão e de ventilação eram reduzidas gradualmente, garantindo a uniformidade da extrusão e o resfriamento adequado do filamento.

Ao final de cada ciclo, o filamento era enrolado em carretéis, e a parte inicial do filamento, correspondente à fase de ajuste do processo, era descartada por apresentar irregularidades no diâmetro e maior fragilidade. Dos seis grupos de amostras analisados, cinco resultaram na produção de filamentos com qualidade visual satisfatória e compatibilidade dimensional com os requisitos da impressão 3D, sendo elas 02-FP, 03-FP, 04-FP, 05-FP e 06-FP. Na tabela 11 está a quantidade de filamento produzido e a temperatura na qual foi possível elaborar o filamento.

8.6 ANÁLISE DOS FILAMENTOS POLIMÉRICOS

A amostra 01-FP não apresentou desempenho satisfatório, mesmo com a aplicação da mesma metodologia e ajustes nos parâmetros operacionais. Os filamentos obtidos desse grupo mostraram-se quebradiços, com aglomerado/impurezas superficiais e instabilidade dimensional, provavelmente consequência das fibras de reforço, o que impossibilitou seu uso em processos de fabricação aditiva, na Figura 30 é possível analisar alguns filamentos produzidos, sendo eles dos grupos 01-FP, 02-FP e 06-FP. Dessa forma, apenas os cinco filamentos com padrão aceitável foram utilizados para a produção de peças 3D, permitindo a avaliação prática do desempenho desses materiais no contexto da impressão tridimensional.

FIGURA 30 - COMPARAÇÃO COM DOS FILAMENTOS PRODUZIDOS, NO A) TEMOS FILAMENTOS DO GRUPO 06-FP, NO B) FILAMENTO 02-FP E C) FILAMENTO 01-FP.

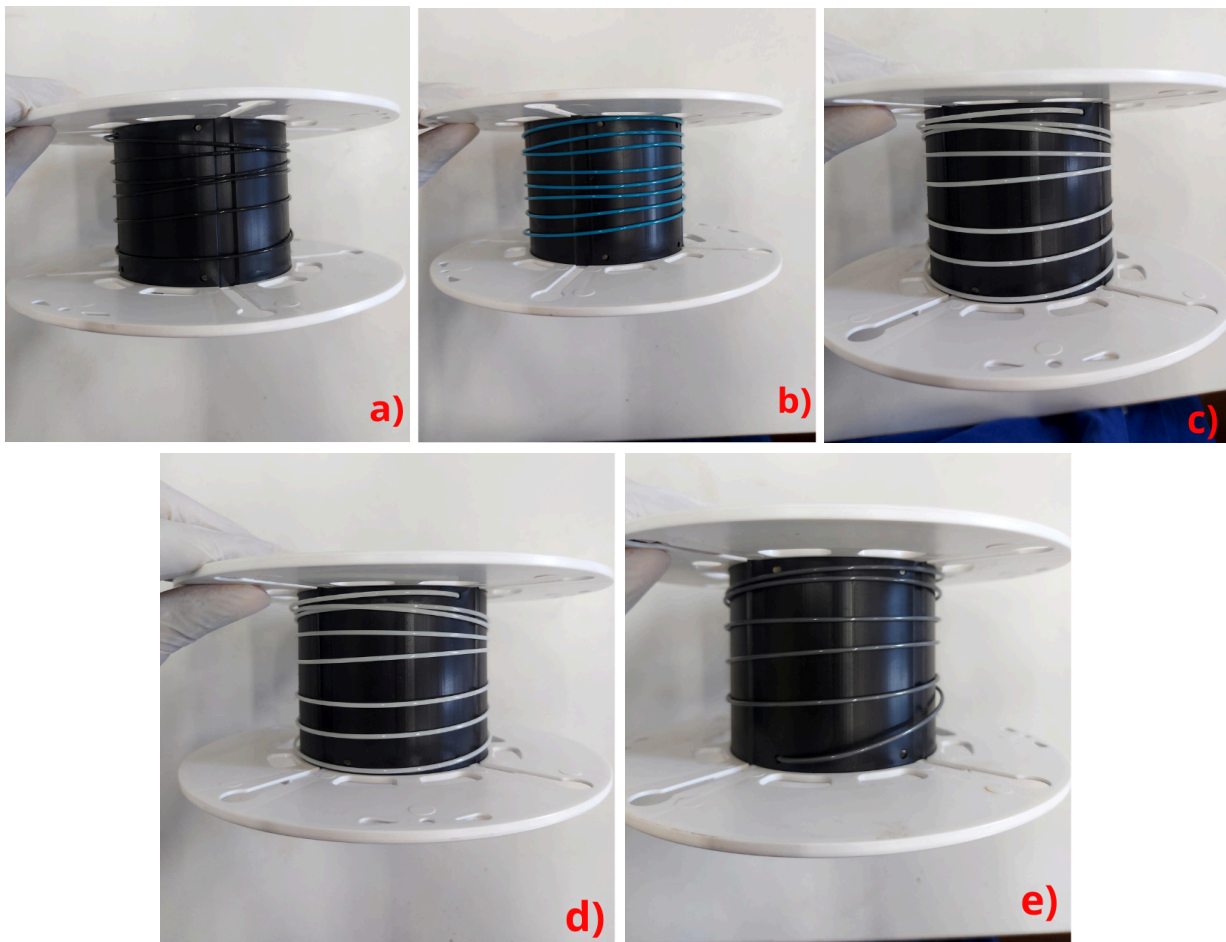


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

Observou-se uma diferença significativa entre a primeira e a última tentativa de produção de filamentos. Na primeira, os filamentos apresentaram aglomerados, diâmetro

irregular, textura áspera e fragilidade. Para a produção de filamentos, foram realizadas diversas tentativas: em média seis por grupo (02-FP a 06-FP), enquanto o grupo 01-FP necessitou de até 10 tentativas. Em cada uma delas, algum parâmetro do processo era ajustado. Já na última tentativa, houve alteração na coloração com tons mais claros ou escuros, além de uma textura lisa, ausência de aglomerados e aspecto brilhoso ou semi-brilhoso, como é possível analisar na Figura 31. Os filamentos (02-FP a 06-FP) apresentaram superfície lisa e brilhante, ausência de impurezas visíveis, resistência mecânica adequada (não quebradiços) e diâmetro uniforme.

FIGURA 31 - FILAMENTOS PRODUZIDOS, SENDO A) FILAMENTO 02-FP; B) FILAMENTO 03-FP; C) FILAMENTO 04-FP; D) FILAMENTO 05-FP E E) FILAMENTO 06-FP.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

8.7 ANÁLISE DA APLICAÇÃO EM IMPRESSÃO 3D

Todas as amostras impressas apresentaram desempenho satisfatório: não houve entupimento do bico extrusor, a deposição do material ocorreu de maneira contínua e uniforme, e as peças produzidas exibiram acabamento superficial compatível com os padrões normalmente obtidos em impressões 3D com filamentos comerciais puros. Esses resultados indicam que os filamentos obtidos são tecnicamente viáveis para aplicações em manufatura aditiva.

Durante a etapa de impressão dos objetos em 3D, observou-se que apenas um dos dados teve todas as camadas completamente impressas (100% das camadas), sendo esse pertencente ao grupo 05-FP. As demais amostras apresentaram diferentes níveis de impressão por camadas, em função de limitações associadas ao material disponível e à condição dos filamentos. A amostra do grupo 02-FP apresentou menos de 30% das camadas impressas, enquanto o grupo 04-FP teve um aproveitamento ainda menor, com menos de 10% das camadas concluídas. Já os grupos 03-FP e 06-FP alcançaram cerca de 90% das camadas impressas.

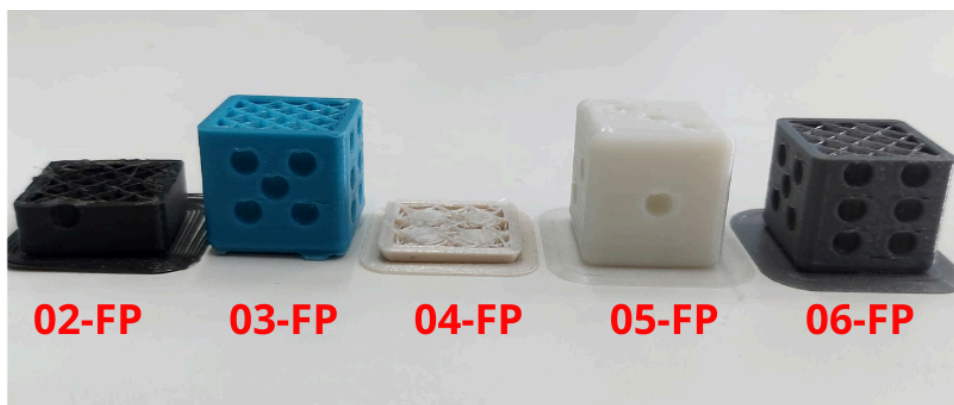
É importante ressaltar que, durante o processo de produção, a amostra 02-FP apresentou fratura antes mesmo de ser inserida na impressora, tornando inviável sua utilização completa. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que todos os filamentos foram armazenados em bancada, ao invés de permanecerem em estufa como anteriormente, no entanto somente a amostra 02-FP, apresentou o filamento extremamente quebradiço e frágil, comportamento semelhante ao observado no filamento 01-FP. Outro ponto relevante foi a identificação de irregularidades no diâmetro do filamento 04-FP, o que comprometeu a alimentação contínua na impressora e impediu a utilização completa do rolo.

8.8 ANÁLISE DAS PEÇAS IMPRESSAS

Após a impressão dos corpos de prova, foi realizada uma análise visual e tátil das peças obtidas (Figura 32). Cada amostra apresentou características distintas quanto ao acabamento superficial, rigidez e qualidade do material, conforme descrito a seguir. Cada descrição a seguir será indicada na mesma ordem da imagem, iniciando pelo primeiro dado (02-FP) e finalizando com o último (06-FP).

- A amostra 02-FP apresentou um bom aspecto geral, com acabamento semi-brilhoso. A estrutura mostrou-se firme, com uma leve maleabilidade, indicando uma rigidez intermediária;
- A amostra 03-FP apresentou-se como um material mais duro, com superfície lisa e um brilho semelhante ao observado em filamentos puros ou virgens, sugerindo boa integridade do polímero;
- Na amostra 04-FP, foi possível observar pequenas bolhas na superfície, o que pode indicar a presença de impurezas ou umidade retida no filamento durante o processo de impressão. O acabamento também apresentou semi-brilho, porém o material foi considerado relativamente frágil. Essa fragilidade pode ser atribuída à natureza do filamento em si ou, à baixa quantidade de material extrudado, o que pode ter comprometido a coesão da peça;
- A amostra 05-FP, sendo a única completamente impressa, apresentou uma superfície lisa, com aspecto duro e rígido, além de um acabamento semi-brilhoso. Esses atributos sugerem boa qualidade do material e consistência na extrusão;
- Por fim, a amostra 06-FP demonstrou também uma textura lisa, com aparência dura e brilhante, indicando um material com bom desempenho na impressão, mesmo que não tenha sido concluída em sua totalidade.

FIGURA 32 - OBJETOS OBTIDOS POR IMPRESSÃO 3D DO FILAMENTO.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2025.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas neste trabalho, foi possível demonstrar, de maneira clara e objetiva, a viabilidade técnica do reaproveitamento de resíduos poliméricos para a produção de filamentos voltados à impressão 3D. Utilizando uma abordagem experimental baseada em múltiplas técnicas de caracterização testes de bancada, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), análise termogravimétrica (TGA), microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível identificar, com elevado grau de confiabilidade, os materiais presentes nos seis grupos de amostras estudadas.

Os testes de bancada possibilitaram uma triagem inicial eficaz, destacando diferenças visuais, táteis e térmicas importantes entre os grupos. O FTIR constitui-se no teste de maior importância para a caracterização dos materiais poliméricos, pois permite a identificação qualitativa dos principais grupos funcionais presentes nas amostras, esse teste permitiu identificar os grupos funcionais de forma clara, associando as amostras 01-FP, 02-FP, 03-FP e 06-FP ao PLA (com diferentes graus de pureza e reforço), 04-FP ao PETG, e 05-FP ao TPU. Tais dados foram corroborados pela TGA, que evidenciou perfis de degradação térmica típicos desses polímeros, com destaque para a estabilidade térmica do PETG e a degradação monofásica do PLA.

As imagens obtidas por MEV forneceram informações importantes sobre a morfologia e a homogeneidade estrutural das amostras, revelando, por exemplo, a presença de fibras de reforço em amostras de PLA e a ocorrência de falhas em materiais de menor coesão.

Durante a etapa de extrusão, cinco dos seis grupos produziram filamentos com qualidade aceitável, com bom acabamento, resistência mecânica e espessura próxima à especificação comercial de 1,75 mm. A impressão 3D com esses filamentos foi realizada com sucesso, validando a funcionalidade prática dos materiais reaproveitados.

Com base nas análises realizadas, foi possível propor a identificação provável dos polímeros presentes em cada grupo de amostras:

- A amostra 01-FP foi identificada como PLA com reforço, possivelmente com fibra de carbono, devido à compatibilidade dos resultados de FTIR e TGA com o

comportamento típico do PLA. Além disso, a análise morfológica por MEV indicou heterogeneidade estrutural, característica comum em materiais com reforço.

- A amostra 02-FP também foi classificada como PLA, uma vez que o espectro de FTIR foi semelhante ao da amostra 01-FP, e a análise morfológica mostrou uma superfície mais flexível. Além disso, apresentou bom desempenho no processo de impressão, indicando estabilidade térmica e dimensional.
- A amostra 03-FP foi identificada como PLA puro, com possível variação em seu grau de cristalinidade. Os dados de TGA, FTIR e MEV foram todos compatíveis com esse polímero, e o material apresentou bom desempenho mecânico durante os testes.
- A amostra 04-FP foi associada ao PETG, uma vez que os espectros de FTIR e as curvas de TGA apresentaram padrões típicos desse copolímero. A análise por MEV também revelou uma estrutura com boa homogeneidade, o que reforça essa identificação.
- A amostra 05-FP demonstrou sinais de ser uma mistura de PETG com TPU, pois o espectro de FTIR revelou a presença de bandas N–H e ureia, típicas de poliuretanos. A MEV indicou baixa homogeneidade, o que pode ser atribuído à combinação de diferentes polímeros.
- Por fim, a amostra 06-FP foi atribuída ao PLA, com base nos resultados de TGA e FTIR, indicou alta rigidez, o que pode estar relacionado a um PLA com alto grau de cristalinidade ou reforçado.

Portanto, conclui-se que a metodologia desenvolvida neste trabalho é eficaz para identificar e reaproveitar resíduos plásticos de origem incerta, transformando-os em insumos úteis para a manufatura aditiva. O estudo reforça o papel da ciência na promoção da economia circular e da sustentabilidade, propondo soluções práticas para o reaproveitamento de polímeros descartados.

10. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Como continuidade deste estudo, propõe-se o aprimoramento dos testes de separação e caracterização dos materiais, incluindo a utilização de processos de separação por densidade, os quais podem contribuir para uma identificação mais eficiente dos polímeros. Além disso, recomenda-se a realização de ensaios mecânicos, visando complementar a avaliação do desempenho dos materiais reciclados.

Outras possibilidades de investigação incluem a análise da reciclabilidade dos filamentos impressos, a fim de verificar se os objetos produzidos podem ser triturados e reutilizados, promovendo um ciclo fechado de reaproveitamento. Essa etapa é fundamental para a validação da viabilidade técnica e econômica da reciclagem em manufatura aditiva, uma vez que possibilita mensurar a perda de propriedades decorrente de sucessivos ciclos de reaproveitamento.

Do mesmo modo, se sugere a impressão de geometrias mais complexas, com o objetivo de avaliar o desempenho dos filamentos reciclados em peças com maiores exigências estruturais e funcionais, como protótipos de engenharia, componentes técnicos e elementos de reposição. Essa abordagem permitiria analisar não apenas a resistência mecânica, mas também aspectos relacionados à precisão dimensional, adesão entre camadas e durabilidade das peças submetidas a esforços contínuos.

11. REFERÊNCIAS

- [1] - ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico. Panorama dos Plásticos no Brasil 2022. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br>
- [2] - ALSHAHRANI, H. et al. Mechanical performance of thermoplastic polyurethane. *Materials Today*, 2021.
- [3] - BAECHLER, C.; DEKLEVA, S.; PEARCE, J. M. Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock. *Rapid Prototyping Journal*, v. 19, n. 2, p. 118–125, 2013.
- [4] - BILLMEYER, F. W. *Textbook of Polymer Science*. 3. ed. New York: Wiley-Interscience, 1984.
- [5] - BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E. H. *Polymer Handbook*. 4. ed. New York: Wiley-Interscience, 1999.
- [6] - CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- [7] - CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [8] - CHOI, H. J. et al. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy for the Characterization of Polymer Blends. *Polymer Journal*, v. 47, n. 6, p. 495–503, 2015.
- [9] - CINCO DÍAS; FINANCIAL TIMES; PLASTICS EUROPE; PHYS.ORG. Relatos sobre queda da produção europeia e desafios de competitividade, 2023.
- [10] - COATES, J. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. In: MEYERS, R. A. (Ed.). *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Chichester: John Wiley & Sons, 2000. p. 10815–10837.
- [11] - DI BENEDETTO, A. T. et al. Mechanical Properties of Polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, 2006.
- [12] - EHRIG, R. J.; CURRY, J. R. *Plastics Recycling: Products and Processes*. New York: Hanser Publishers, 1992.

- [13] - EUROPEAN BIOPLASTICS. Bioplastics Market Data 2022. Berlim, 2023. Disponível em: <https://www.european-bioplastics.org>
- [14] - FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LAURENCE, L. Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Biomedical Applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 107, p. 367–392, 2016.
- [15] - FARRINGTON, D. W. et al. Abrasive Wear and Extruder Nozzle Damage with Carbon-Filled 3D Printing Filaments. *Wear*, v. 360–361, p. 87–95, 2016.
- [16] - FILAMENTO 3D LAB. A umidade no filamento é um dos principais fatores que reduzem a qualidade do material, 2025. Disponível em: <https://3dlab.com.br/umidade-no-filamento/>
- [17] - FILAMENT2PRINT. A presença de água nos filamentos provoca aumento da fragilidade e degradação do material, 2025. Disponível em: <https://filament2print.com/pt/blog/problemas-humedad-filamentos-3d>
- [18] - FILAMENTIVE. Challenges of recycling 3D printing waste into filament, 2019.
- [19] - FRANÇA, M. F. A.; SANTOS, R. G. dos; SILVA, R. A. da. Desafios na fabricação de filamentos de polímeros reciclados para impressão 3D. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 31, e2021007, 2021.
- [20] - GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, v. 3, n. 7, e1700782, 2017.
- [21] - GONZÁLEZ-MURILLO, C. et al. Use of FTIR to Detect Polymer Blends in Waste Streams. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 29, p. 135–144, 2021.
- [22] - GONZÁLEZ-MURILLO, C. et al. Thermal degradation of TPU: A kinetic study. *Polymer Degradation and Stability*, v. 184, p. 109476, 2021.
- [23] - GRAND VIEW RESEARCH. Thermoplastic Polyurethane Market Size Report, 2023. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com>

- [24] - GUERRA, L. M. G. et al. Análise térmica e espectroscópica de filmes de PLA para aplicações em embalagens. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 26, n. 2, p. 114–121, 2016.
- [25] - GÜLTEKIN, D. et al. Mechanical characterization of PETG for FDM. *Additive Manufacturing*, 2020.
- [26] - HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 2115–2126, 2009.
- [27] - JAMSHIDIAN, M. et al. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 9, p. 552–571, 2010.
- [28] - JIEYA. Desafios na reciclagem de PLA, 2025.
- [29] - KAZANTSEV, D. et al. Effects of Fillers on the Mechanical and Structural Behavior of Polymer Composites: A Review. *Polymers*, v. 13, n. 19, p. 3320, 2021.
- [30] - KIM, J. H. et al. Mechanical Properties and Printability of PETG for Additive Manufacturing. *Polymer Testing*, v. 74, p. 39–45, 2019.
- [31] - KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Environmental life cycle analysis of distributed 3D printing using recycled and virgin plastic. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 93, p. 24–30, 2013.
- [32] - KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Environmental life cycle analysis of distributed 3D printing and conventional manufacturing of polymer products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 1, n. 12, p. 1511–1519, 2013.
- [33] - KRÓL, P. FTIR and Raman spectroscopy in polymer characterization. In: *Polymer Testing*. IntechOpen, 2020.
- [34] - KUMAR, S. et al. Thermal and Mechanical Behavior of PLA-Based Composites. *Polymer Testing*, v. 89, 106114, 2020.

- [35] - KUMARI, A. et al. Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Identification of Polymeric Materials. *International Journal of Engineering Research & Technology*, v. 6, n. 3, p. 212–216, 2017.
- [36] - LI, J. et al. Effect of Carbon Fiber on the Thermal Stability and Mechanical Properties of PLA Composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 223, p. 109–126, 2021.
- [37] - LIU, H. et al. Mechanical behavior of PLA and PLA composites. *Composites Part B: Engineering*, 2016.
- [38] - MANDAL, D. et al. Characterization of Poly(ethylene terephthalate) Glycol (PETG) Using FTIR and TGA Techniques. *Journal of Polymer & Composites*, v. 6, n. 2, p. 21–26, 2018.
- [39] - MANO, E. B.; MENDES, L. C. *Introdução a Polímeros*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- [40] - MARK, J. E. *Physical Properties of Polymers Handbook*. 2. ed. Springer, 2007.
- [41] - NAMPOOTHIRI, K. M. et al. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. *Bioresource Technology*, 2010.
- [42] - NIAOUNAKIS, M. *Biopolymers: Applications and Trends*. William Andrew Publishing, 2015.
- [43] - NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, v. 143, p. 172–196, 2018.
- [44] - NUNES, R. C. R. et al. Thermal and mechanical properties of PETG and composites. *Polymer Testing*, v. 90, 106696, 2020.
- [45] - NUNES, S. P. et al. Thermal and mechanical analysis of TPU-based materials using FTIR and TGA. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 137, n. 15, 2020.
- [46] - OECD. *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. Paris: OECD Publishing, 2022.

- [47] - PAPON, E. A.; HAQUE, M. M. Processing and characterization of 3D printed recycled polyethylene terephthalate (rPET) filaments. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 25, e00155, 2020.
- [48] - PETSUUK, A.; PEARCE, J. M. Optical sensor for diameter control in recycled filaments, 2020.
- [49] - PHYS.ORG. Global recycling rate: less than 10%, 2023.
- [50] - PLASTICS EUROPE. Plastics – the fast facts 2023.
- [51] - PLASTICS RECYCLERS EUROPE. Recycling capacity and investments in the EU, 2023
- [52] - PLASTICS RECYCLERS EUROPE; RECYCLING INTERNATIONAL; PACKAGING EUROPE. Reciclagem na União Europeia: capacidades, investimentos e desafios, 2023
- [53] - QURESHI, M. A.; CHAUDHARY, Z.; ZHANG, K. Recent advances in 3D printing of recycled thermoplastics and their composites. *Additive Manufacturing*, v. 35, 101239, 2020.
- [54] - RAMOS, M. R. et al. Identificação de polímeros recicláveis por espectroscopia no infravermelho. *Revista Matéria*, v. 23, n. 2, 2018.
- [55] - RECYCLEBOT. Plataforma DIY de reciclagem para filamento, 2023
- [56] - REUTERS; AP NEWS; THE GUARDIAN. Processo e impasses do tratado internacional sobre plásticos, 2023.
- [57] - RSC – Royal Society of Chemistry. Identifying Polymers by Density. Londres, 2020. Disponível em: <https://edu.rsc.org/experiments/identifying-polymers-by-density/385.article>
- [58] - SANCHEZ, F. A. et al. Characterization of polypropylene and polyethylene blends by FTIR and DSC. *Polymer Testing*, v. 32, n. 5, p. 1012–1020, 2014.
- [59] - SCHWARCZ, J. A.; WYPYCH, F. *Materiais Poliméricos: Estrutura, Propriedades e Aplicações*. São Carlos: EDUFSCar, 2003.

- [60] - SILVA, R. A. et al. Influência da adição de fibras de carbono no compósito PP/CF. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 2019.
- [61] - SIMÕES, R. D. et al. FTIR Characterisation of Biodegradable Polymers for Tissue Engineering Applications. *Materials Science Forum*, v. 730–732, p. 300–305, 2012.
- [62] - SINGH, S.; RAMAKRISHNA, S.; BERTO, F. Sustainability of polymers and polymer composites used in 3D printing. *Materials*, v. 15, n. 1, p. 1–23, 2022.
- [63] - SOUZA, F. G. et al. Caracterização mecânica de PP reforçado com fibras de carbono. *Revista Matéria*, 2017.
- [64] - STATISTA; CINCO DIAS (EL PAÍS); PLASTICS EUROPE. Estatísticas da Europa: queda de produção, capacidade recicladora, circularidade, 2023.
- [65] - TANZI, M. C.; FARE, S.; CANDIANI, G. *Foundations of Biomaterials Engineering*. Academic Press, 2021.
- [66] - TANZI, M. C.; FARÈ, S. Characterization of Recycled Filaments for Additive Manufacturing: A Technical Review. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 27, p. 2151–2166, 2019.
- [67] - TECHCD. A presença de água nos filamentos diminui a durabilidade das peças e reduz a resistência final do material, 2025. Disponível em:
<https://techcd.com.br/noticias/umidade-filamentos/>
- [68] - THAKUR, V. K.; THAKUR, M. K. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, v. 109, p. 102–117, 2014.
- [69] - TUCAB. Importância da separação na reciclagem de filamentos 3D, 2025.
- [70] - TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes. *Rapid Prototyping Journal*, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014.
- [71] - UNEP – United Nations Environment Programme. *From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. Nairóbi: UNEP, 2021.
- [72] - VOGUE BUSINESS; AP NEWS; REUTERS. Tratado global sobre poluição plástica: falhas nas negociações INC, 2023.

- [73] - WANG, L. et al. Thermal Analysis Techniques for Polymer Decomposition and Stability Assessment. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 138, p. 1705–1715, 2019.
- [74] - WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; GOU, J.; HUI, D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, v. 110, p. 442–458, 2017.
- [75] - WANG, Y. et al. Additive Manufacturing of TPU: Challenges and Developments. *Materials*, v. 13, n. 17, 3741, 2020.
- [76] - WOERN, A. L.; PEARCE, J. M. Distributed manufacturing of flexible products: Technical feasibility and economic viability. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 12, n. 3, p. 275–285, 2017.
- [77] - WOHLERS ASSOCIATES. *Wohlers Report 2023: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, 2023.
- [78] - ZANDER, N. E.; GILLAN, M.; MULLEN, R. Recycling of ABS and PLA for 3D printing filament manufacturing: Mechanical and thermal characterization. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 135, n. 15, 46110, 2018.
- [79] - ZANDER, N. E. et al. Recycled polymer feedstocks for 3D printing: Mechanical properties and applications. *Additive Manufacturing*, v. 25, p. 122–130, 2019.
- [80] - ZHANG, C. et al. Dynamic mechanical analysis of TPU. *Polymer Testing*, 2020.