



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

SABRINNA MIRANDA DE MORAES

**ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FILAMENTOS
RECICLADOS E CONVENCIONAIS EM IMPRESSÃO 3D**

CARAÚBAS

2025

SABRINNA MIRANDA DE MORAES

**ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FILAMENTOS
RECICLADOS E CONVENCIONAIS EM IMPRESSÃO 3D**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Ricardo de Souza.

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M827e Moraes, Sabrinna Miranda De.
Estudo Comparativo das Propriedades Mecânicas de
Filamentos Reciclados E Convencionais em
Impressão 3D / Sabrinna Miranda De Moraes. -
2025.

37 f. : il.

Orientadora: Juliana Ricardo De Souza.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Manufatura Aditiva . 2. Propriedades
Mecânicas. 3. PET. 4. Sustentabilidade. I. Souza,
Juliana Ricardo De, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo)
autor(a). Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

SABRINNA MIRANDA DE MORAES

**ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
FILAMENTOS RECICLADOS E CONVENCIONAIS EM IMPRESSÃO 3D**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Defendida em: 09/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Juliana Ricardo de Souza, Profa. Dra. (UFERSA)
Presidente

Carlos Costa de Carvalho, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

Íngride Pamilly Ribeiro Araújo de Oliveira, Profa. Ma. (UFERSA)
Membro Examinador

*Dedico a minha mãe e à minha avó, pelo
amor incondicional e por serem o meu maior
incentivo em todos os momentos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todo discernimento, por ter me guiado até aqui, por ter me amparado e por ter sido tão bom comigo esse tempo todo, sem ele nada disso seria possível. Sou grata por cada benção recebida.

Às mulheres da minha vida, minha mãe Zildênia Miranda e minha avó Iêda Miranda, meus alicerces e meus maiores exemplos de força e perseverança. Não existem palavras suficientes para expressar minha gratidão por tudo o que fizeram por mim. Obrigada por sempre estarem ao meu lado e por nunca medirem esforços para que eu tivesse as oportunidades que vocês não tiveram. A gratidão que sinto é imensurável, e o amor que sinto por vocês é eterno.

Ao meu namorado e companheiro de estudos, Ângelo Carneiro, obrigada pelo amor, pelo companheirismo e por estar sempre ao meu lado me incentivando.

À minha orientadora, Professora Juliana Ricardo, agradeço imensamente sua paciência e por todo o conhecimento compartilhado durante a construção deste trabalho.

À professora Vanessa Andrade, minha gratidão especial por ter me apresentado a UFERSA, abrindo as portas para essa jornada acadêmica. À professora Adiana, obrigada pela ajuda fundamental e pelo incentivo não só no decorrer do curso, assim como na fase final deste trabalho. À professora Ana Tereza, por permitir a utilização da impressora 3D e do laboratório de robótica educacional, fundamentais na execução desta pesquisa.

Aos técnicos Fabrício e Samir, pelo suporte e auxílio técnico essenciais para a realização da parte prática deste estudo.

A todos os meus familiares e amigos que torceram por mim, meu muito obrigada.

*Consagre ao Senhor tudo o que você
faz, e os seus planos serão bem-sucedidos
(Provérbios 16:3).*

RESUMO

A impressão 3D tem um papel crescente na produção, e a busca por soluções sustentáveis impulsiona o reaproveitamento de resíduos plásticos, especialmente as garrafas PET (politereftalato de etileno), que são amplamente descartadas no mundo. Uma alternativa de baixo custo para esses resíduos é transformá-los em filamento para impressoras 3D, unindo tecnologia e sustentabilidade. No entanto, é importante ressaltar que essa solução levanta dúvidas sobre a qualidade mecânica desse filamento reciclado, especialmente quando comparada à de outros filamentos comerciais, como o Políácido Láctico (PLA), a Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Politereftalato de Etileno Glicol (PETG). Partindo desse princípio, o presente trabalho tem como objetivo responder a essa questão por meio de um estudo comparativo das propriedades mecânicas de filamentos reciclados e convencionais em impressão 3D, utilizando uma abordagem experimental. Avalia-se, desta forma, se as peças impressas com esse material apresentam resistência a tração e flexão suficientes para aplicações práticas, contribuindo para a redução do lixo plástico e o avanço da economia circular. Os resultados revelaram que o PET reciclado apresentou desempenho intermediário na tração, com resistência média superior ao ABS e próxima ao PLA e PETG. Nos ensaios de flexão, o material destacou-se alcançando cargas máximas superiores aos comerciais em algumas amostras, embora tenha apresentado maior dispersão nos dados devido a irregularidades na extrusão. Conclui-se que o PET reciclado é tecnicamente viável, oferecendo resistência mecânica satisfatória para aplicações práticas e contribuindo para a economia circular.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Propriedades mecânicas, Sustentabilidade, PET.

ABSTRACT

3D printing plays an increasingly important role in manufacturing, and the search for sustainable solutions has driven the reuse of plastic waste, especially PET bottles (polyethylene terephthalate), which are widely discarded worldwide. A low-cost alternative for these residues is their transformation into filament for 3D printers, combining technology and sustainability. However, it is important to note that this solution raises questions regarding the mechanical quality of recycled filament, particularly when compared to other commercial filaments such as Polylactic Acid (PLA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), and Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG). Based on this premise, the present study aims to address this issue through a comparative analysis of the mechanical properties of recycled and conventional filaments used in 3D printing, employing an experimental approach. Thus, it is evaluated whether parts printed with this material exhibit sufficient tensile and flexural strength for practical applications, contributing to the reduction of plastic waste and the advancement of the circular economy. The results revealed that recycled PET exhibited intermediate tensile performance, with an average strength higher than ABS and close to that of PLA and PETG. In flexural tests, the material stood out by achieving maximum loads higher than those of commercial filaments in some samples, although it showed greater data dispersion due to extrusion irregularities. It is concluded that recycled PET is technically viable, offering satisfactory mechanical strength for practical applications and contributing to the circular economy.

Keywords: Additive manufacturing, Mechanical properties, Sustainability, PET.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno

CPs - Corpos de Prova

MPa - Megapascal

PET - Politereftalato de Etileno

PETG - Polietileno Tereftalato Glicol

PLA - Ácido Polilático

PS - Poliestireno

PETR - PET Reciclado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	MANUFATURA ADITIVA	15
3.2	POLÍMEROS	16
3.3	ABS	16
3.4	PLA	17
3.5	PETG	17
3.6	PET RECICLADO	18
4	METODOLOGIA	20
4.1	DESENHO TÉCNICO E MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA	21
4.1.1	Tração	21
4.1.2	Flexão	22
4.2	IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVAS	23
4.3	ENSAIOS MECÂNICOS	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (*Additive Manufacturing* - AM), muitas vezes também conhecida como impressão 3D, é uma gama de processos de manufatura de peças através da adição de material, camada por camada, diretamente a partir de dados de modelos digitais 3D. A AM utiliza modelos tridimensionais (3D) desenvolvidos em *softwares* de *design* e auxiliado por computador (CAD) para produzir produtos construídos a partir da deposição de material, camada por camada, até a obtenção da peça 3D. Vários termos são referidos ao AM, como manufatura de camadas, manufatura de camadas aditivas, processos aditivos, técnicas aditivas, fabricação de forma livre e fabricação de forma livre sólida (KUMAR; SATHIYA, 2021).

A ideia de produzir objetos camada por camada surgiu no início do século XX, mas foi em 1987 que surgiu o primeiro sistema comercializado de prototipagem rápida, a estereolitografia, também chamada de SLA (Stereolithography Apparatus) (ASME, 2016). A popularidade dos processos AM disparou no início de 2009 e foi motivada por diversas influências inter-relacionadas, tais como a expiração de patentes de AM, investimentos governamentais em AM como um processo de fabricação avançado e a proliferação de impressoras AM de baixo custo baseadas principalmente na extrusão de material (BOURELL *et al*, 2017).

Além disso, a natureza distinta do processo de manufatura aditiva dá origem a uma série de vantagens sobre os processos tradicionais. Do ponto de vista da aplicação, o AM oferece altos graus de customização e personalização com pouco impacto na complexidade e no custo de manufatura, já que o ferramental e o componente de custo associado não existem para os processos de AM (YANG *et al*, 2017). Como resultado, o custo por peça não depende mais do volume de produção. O custo geral de fabricação das tecnologias AM é, portanto, relativamente independente da complexidade do projeto e está apenas relacionado ao uso de material, consumo de energia e custo de mão de obra (GAO *et al*, 2015; LAKHDAR *et al*, 2021).

Nesse contexto, observa-se que a manufatura aditiva também pode desempenhar um papel importante na sustentabilidade, especialmente quando associada ao uso de materiais recicláveis. O Politereftalato de Etileno (PET) é um dos polímeros termoplásticos mais utilizados globalmente, especialmente na fabricação de embalagens para bebidas, alimentos e produtos industriais. Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2023), o Brasil gera cerca de 3,5 milhões de toneladas de resíduos plásticos anualmente, dos quais aproximadamente 30% são compostos por embalagens PET descartadas. A maior parte desse volume ainda não recebe destinação adequada,

contribuindo para o aumento da poluição ambiental e o acúmulo de resíduos em aterros e ecossistemas (WORLD ECONOMIC FORUM, 2020).

De acordo com Garcia *et al.* (2012), os ensaios mecânicos são essenciais para analisar o comportamento dos materiais quando submetidos a esforços externos, estabelecendo uma relação direta entre as tensões aplicadas e as deformações resultantes. Por meio desses ensaios é possível identificar propriedades como a elasticidade, plasticidade, resistência, resiliência e tenacidade. Além da caracterização técnica, a realização desses ensaios cumpre dois objetivos práticos principais: garantir o controle de qualidade rotineiro no recebimento e finalização de produtos, e fornecer dados para o desenvolvimento e inovação de novos materiais e processos de fabricação.

Portanto, torna-se fundamental investigar o comportamento mecânico de peças fabricadas com filamento de PET reciclado, buscando validar sua viabilidade técnica e contribuição para o desenvolvimento sustentável da manufatura aditiva. Tal investigação pode incentivar a economia circular, promovendo a redução de resíduos plásticos e estimulando práticas mais responsáveis no consumo e descarte do PET.

2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento deste estudo. A seguir, são detalhados o objetivo geral, que define o foco principal da pesquisa, e os objetivos específicos, que descrevem as etapas e meios necessários para alcançar o objetivo geral.

2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar a resistência mecânica do filamento PET reciclado em impressão 3D, a fim de compará-lo com o desempenho dos filamentos tradicionais, PLA, ABS, e PETG, através de ensaios mecânicos de tração e flexão.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenho dos Corpos de prova em software CAD;
- Produzir CPs em 3D utilizando filamento de PET reciclado, ABS, PETG e PLA seguindo parâmetros de impressão padronizados;
- Realizar ensaios mecânicos: tração e flexão;
- Avaliar o desempenho mecânico do PET reciclado frente aos filamentos tradicionais (PLA, ABS e PETG), com base nos dados obtidos nos ensaios de tração e flexão.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para a compreensão do estudo desenvolvido. Inicialmente, aborda-se o conceito de Manufatura Aditiva, destacando a tecnologia de impressão 3D e sua relevância no cenário produtivo atual. Na sequência, são detalhadas as características, propriedades e aplicações dos polímeros termoplásticos comerciais utilizados como parâmetro comparativo nesta pesquisa: ABS, PLA e PETG. Por fim, discute-se o PET reciclado, explorando seu potencial como matéria-prima sustentável e os desafios técnicos associados à sua utilização na produção de filamentos.

3.1 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva, particularmente por meio da impressão 3D, tem revolucionado os métodos de fabricação em diversos setores, permitindo a produção de componentes com geometrias complexas, customização e redução de desperdícios (GEBISA; LANGA, 2018). Dentre as tecnologias mais difundidas está a modelagem por fusão e deposição (Fused Deposition Modeling – FDM), que utiliza termoplásticos como material base, apresentando-se como uma alternativa de baixo custo e ampla aplicabilidade.

Nesse contexto, a busca por soluções sustentáveis tem promovido o reaproveitamento de resíduos plásticos como matéria-prima para impressão 3D. O Politereftalato de Etileno (PET), um dos plásticos mais utilizados na fabricação de garrafas e embalagens, possui excelente potencial de reciclagem e reutilização, podendo ser transformado em filamento para uso em impressoras 3D (MENEZES *et al.*, 2021).

No entanto, a aplicação de materiais reciclados na manufatura aditiva ainda enfrenta desafios técnicos, especialmente no que se refere à integridade estrutural dos produtos. A avaliação das propriedades mecânicas de peças fabricadas com filamento reciclado é fundamental para garantir seu desempenho em aplicações reais (SILVA *et al.*, 2020).

Visto que os polímeros termoplásticos mais empregados com destaque, ainda são o PLA (Ácido Polilático), valorizado por sua facilidade de impressão e uso em protótipos e peças decorativas; o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), escolhido por sua maior resistência mecânica e térmica, sendo útil para peças funcionais e que demandam durabilidade; e o PETG (Polietileno Tereftalato Glicol), que oferece um equilíbrio entre a facilidade do PLA e a resistência do ABS, sendo aplicado em uma gama versátil de produtos, incluindo itens com boa difusão de luz. Além desses, polímeros de engenharia como o Nylon (Poliamida)

e ASA são utilizados para aplicações que exigem propriedades específicas, como alta resistência ao impacto, flexibilidade ou proteção contra raios UV, sendo comuns em componentes automotivos e aeroespaciais. A seguir tem-se o referencial teórico dos polímeros utilizados nesta pesquisa experimental comparativa.

3.2 POLÍMEROS

A manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, tem se consolidado como uma tecnologia de grande relevância no desenvolvimento e na produção de componentes em diversos setores industriais. Dentre os materiais empregados nesse processo, os polímeros se destacam por sua versatilidade, facilidade de processamento e ampla disponibilidade comercial, sendo amplamente utilizados em aplicações que vão desde prototipagem rápida até a fabricação de peças funcionais.

Os polímeros utilizados na manufatura aditiva podem ser classificados, de modo geral, em termoplásticos, termorrígidos e elastômeros, sendo os termoplásticos os mais empregados, especialmente em tecnologias como *Fused Deposition Modeling* (FDM). Esses materiais apresentam a capacidade de amolecer quando aquecidos e solidificar ao resfriar, permitindo sua extrusão em camadas sucessivas durante o processo de impressão. Entre os polímeros mais utilizados destacam-se o ácido polilático (PLA), o acrilonitrila butadieno estireno (ABS), e o politereftalato de etileno glicol (PETG) (SANTANA *et al.*, 2018).

3.3 ABS

O ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) é um termoplástico amorfo, formado por três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno. Sua microestrutura é amorfa e suas propriedades mecânicas, consideradas razoáveis, são baseadas nessa composição (CARDINALI, 2018). O material se destaca por apresentar uma elevada tenacidade à fratura e uma grande resistência ao impacto. Além disso, outra característica importante que impulsiona sua ampla utilização é a sua baixa densidade (FERNANDES, 2016).

O ABS possui outras boas características não-mecânicas. O material é de fácil usinagem e aceita pintura facilmente, o que é uma vantagem quando não é possível imprimir um objeto na cor final desejada. Ele também interage muito bem com colas comuns, permitindo a impressão de vários componentes que podem ser unidos permanentemente para formar um

objeto sólido. No entanto, o material possui uma desvantagem significativa: ele se degrada quando exposto à luz solar, já na temperatura ambiente o material é considerado estável e não prejudicial à saúde humana, mas, em elevadas temperaturas (aproximadamente 400°), o ABS pode sofrer a decomposição e liberar substâncias cancerígenas (FERNANDES, 2016).

3.4 PLA

O PLA (Ácido Polilático), é um polímero poliéster alifático linear, de natureza termoplástico e semicristalina, esse polímero é sintetizado a partir de fontes renováveis, como açúcar de milho, batata e cana-de-açúcar, através de bioconversão e polimerização. O PLA se destaca por ser um biocompatível, biodegradável e de baixo impacto ambiental (SANTANA *et al.*, 2018). Devido a essas e outras propriedades vantajosas, o PLA vem sendo cada vez mais utilizado em diversas aplicações, especialmente em embalagens flexíveis e rígidas. Além disso, seu uso tem se expandido para áreas mais especializadas, como o setor biomédico, onde suas características de biodegradabilidade e biocompatibilidade são particularmente valorizadas (ARAÚJO, AGRAWAL, MÉLO, 2015).

Por apresentar propriedades semelhantes com o Poliestireno (PS) e o Politereftalato de Etileno (PET), o PLA (Ácido Polilático) também pode ser aplicado em diferentes setores industriais, com destaque para manufatura aditiva, na qual é amplamente utilizado como material para impressão 3D (OLIVEIRA, 2019).

O PLA (Poliácido Lático) é um dos materiais mais utilizados na impressão 3D, especialmente entre as comunidades *makers*, por ser de fácil uso e amplamente disponível em diversas cores. Quando comparado ao ABS, o PLA figura entre os materiais de maior utilização na tecnologia de impressão 3D apresenta melhores propriedades termomecânicas, como maior resistência mecânica e menor coeficiente de expansão térmica, o que reduz problemas de empenamento durante a impressão. Contudo, o material apresenta algumas limitações, como baixa resistência ao impacto, fragilidade e pequeno alongamento até a ruptura, o que restringe seu uso em aplicações que exigem maior ductilidade e tenacidade (SANTANA *et al.*, 2018).

3.5 PETG

O Politereftalato de Etileno Glicol (PETG) vem se consolidando como um dos polímeros predominantes e amplamente utilizados no campo da impressão 3D, devido à sua combinação equilibrada entre resistência mecânica, flexibilidade e facilidade de

processamento. Esse material surgiu da necessidade de desenvolver filamentos capazes de produzir peças mais duráveis, resistentes ao impacto e com boa estabilidade dimensional durante a fabricação. O PETG pode ser considerado uma alternativa intermediária entre o PLA e o ABS, unindo a resistência e ductilidade típicas do ABS à facilidade de impressão e acabamento superficial semelhantes às do PLA (OLIVEIRA, 2021).

Uma característica positiva do PETG em relação ao PLA é a sua elevada ductilidade. Enquanto o PLA tende a apresentar ser um material de comportamento frágil, rompendo de forma repentina, o PETG possui a capacidade de se deformar antes de quebrar, permitindo que o usuário identifique sinais de falha antes da fratura completa. Essa característica o torna mais confiável para aplicações que exigem maior absorção de impacto ou deformações sem perda imediata da integridade estrutural. Além disso, a flexibilidade do PETG possibilita o desenvolvimento de geometrias funcionais, como tampas com encaixe rápido, abas de fixação e componentes que precisam se ajustar ou sustentar outras partes com precisão. Dessa forma, o material se destaca pela versatilidade e desempenho mecânico aprimorado em comparação ao PLA, sendo amplamente empregado na fabricação de suportes, conectores e peças técnicas em impressão 3D (MATTERHACKERS, 2020).

Sua estrutura é derivada do PET convencional, porém modificada pela adição de glicol durante o processo de polimerização o que explica o “G” presente na sigla. Essa modificação química impede a cristalização completa do material, resultando em um polímero de natureza amorfa, mais transparente, menos quebradiço e com melhor desempenho no processamento térmico. O PETG apresenta uma temperatura de transição vítrea próxima de 80 °C, com propriedades mecânicas semelhantes às do PET. Devido a essas propriedades, o PETG é amplamente empregado não apenas na impressão 3D, mas também na produção de embalagens, frascos e componentes técnicos que exigem transparência, durabilidade e resistência mecânica (SANTANA *et al.*, 2018).

3.6 PET RECICLADO

A má gestão de resíduos plásticos, cujo volume global aumentou para 359 milhões de toneladas métricas em 2018, é um dos principais riscos ambientais atuais. Dessa forma, a reciclagem do PET representa uma alternativa estratégica para minimizar os impactos ambientais, reduzindo o consumo de matéria-prima virgem e a emissão de gases de efeito estufa associados à sua produção. Contudo, apesar do aumento dos índices de coleta seletiva, apenas cerca de 56,4% do PET descartado no Brasil é efetivamente reciclado (ABIPET, 2022). A maior

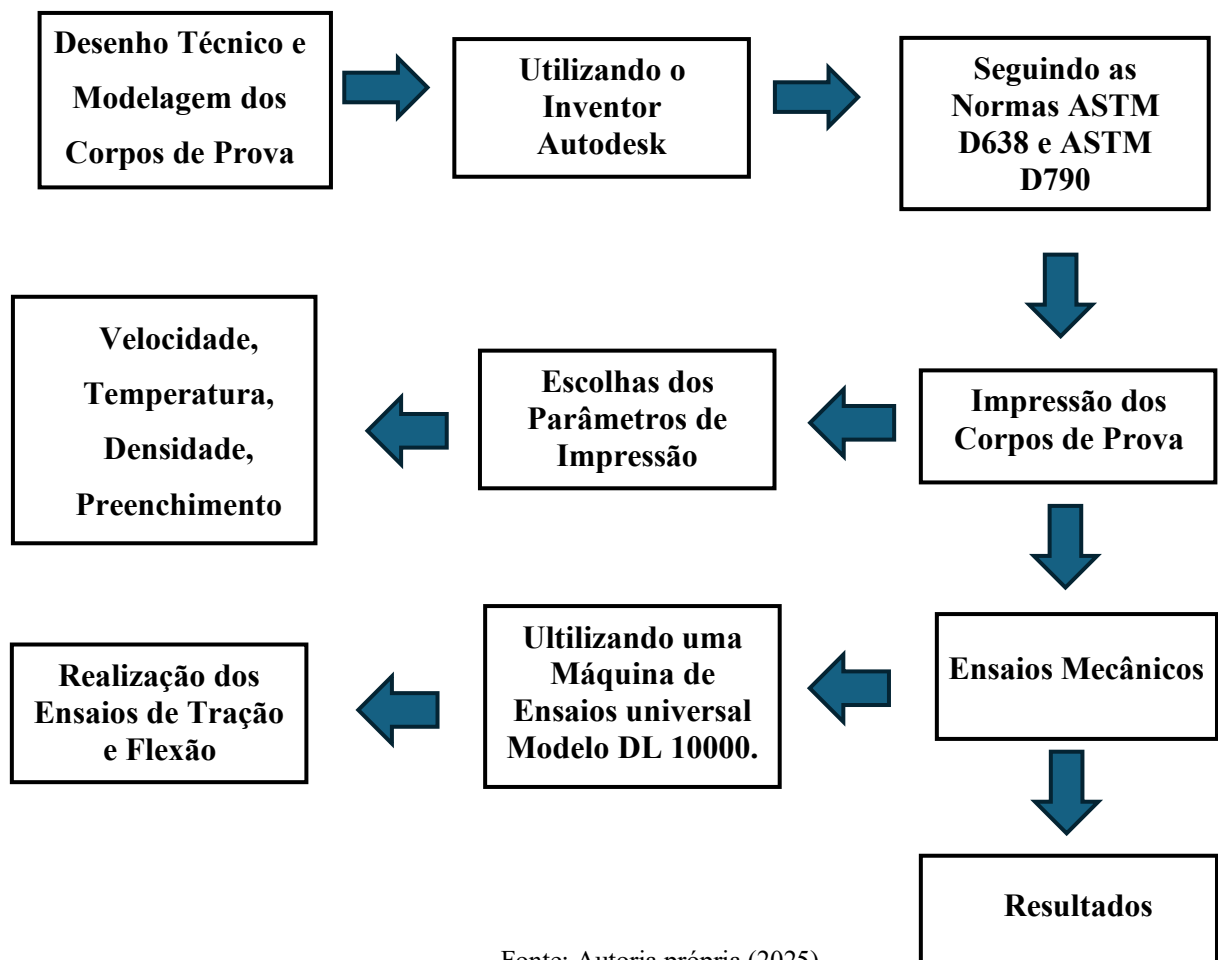
parte dos resíduos recicláveis ainda enfrenta barreiras técnicas e logísticas, além de limitações no mercado para produtos reciclados de alta qualidade.

Nesse contexto, a manufatura aditiva, por meio da impressão 3D, emergiu como uma solução potencial para o uso de polímeros residuais. O Tereftalato de Polietileno (PET), um dos seis principais plásticos identificados no lixo urbano e popular pela sua facilidade de reciclagem, pode ser convertido em filamentos para essa tecnologia. Contudo, o reprocessamento pode provocar alterações nas propriedades do PET, afetando seu desempenho (OGUNSAKIN; ONITIRI, 2024). A ausência de estudos consistentes que validem essas propriedades limita a confiança e a adoção mais ampla do filamento reciclado em aplicações técnicas e industriais.

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi realizada por meio de uma abordagem experimental e comparativa, o foco principal foi a avaliação da resistência mecânica de peças produzidas por impressão 3D com filamento de Polietileno Tereftalato (PET) reciclado, na qual foi comparado com as propriedades de filamentos comerciais, como o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Ácido Polilático (PLA) e PETG (Polietileno Tereftalato Glicol). O filamento reciclado utilizado neste estudo foi produzido por meio de uma extrusora de baixo custo, que tem como controlador base o Arduino, desenvolvida no trabalho de Carneiro (2025). Esse dispositivo foi projetado para transformação de garrafas PET em filamentos de impressora 3D. A fabricação dessa extrusora possibilitou a obtenção do material (PETR) analisado neste trabalho. O processo de caracterização foi dividido em algumas etapas: desenho técnico e modelagem dos corpos de prova, impressão dos corpos de prova, ensaios mecânicos e resultados e discussão, como mostrado no Fluxograma abaixo.

Fluxograma 1: Fluxograma da metodológico



Fonte: Autoria própria (2025).

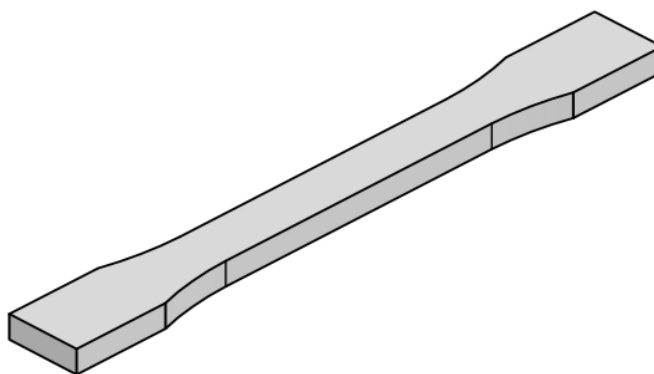
4.1 DESENHO TÉCNICO E MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração e flexão foram modelados digitalmente no software Autodesk Inventor, seguindo as especificações das normas ASTM D638 e ASTM D790, respectivamente. As Figuras 1, 2 mostram os modelos usados para os corpos de prova para os ensaios de tração e flexão respectivamente.

4.1.1 Tração

A norma ASTM D638 define as dimensões e geometria dos corpos de prova destinados aos ensaios de tração em materiais plásticos, visto que a norma de tração (D638) apresenta 5 tipos de corpos de prova, adotou-se o corpo de prova tipo 1, que é o indicado para plásticos rígidos, semirrígidos e para compósitos reforçados.

Figura 1- Modelo de corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: Autoria própria (2025).

As dimensões especificadas pela norma ASTM D638 podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1- Dimensões corpos de prova tração.

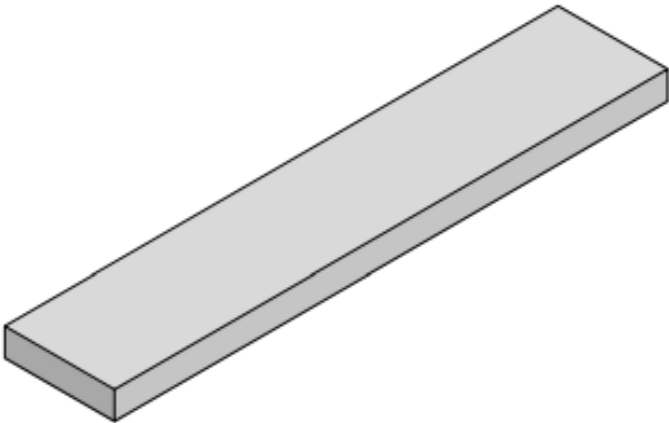
Símbolo	DESCRIÇÃO	VALOR (mm)
W	Largura da seção estreita	13
L	Comprimento da seção estreita	57
WO	Largura total (mínima)	19
LO	Comprimento total	165
G	Comprimento útil	50
D	Distância entre apertos	115
R	Raio do filete	76
E	Espessura	7

Fonte: Adaptado da norma ASTM D638.

4.1.2 Flexão

A ASTM D790 estabelece os parâmetros para os ensaios de flexão em três pontos, sendo amplamente reconhecida por sua confiabilidade e aplicação em estudos envolvendo polímeros.

Figura 2 - Modelo de corpo de prova para ensaio de flexão



Fonte: Autoria própria (2025)

As dimensões especificadas pela norma ASTM D790 podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2- Dimensões corpos de prova de Flexão.

Símbolo	DESCRIÇÃO	VALOR (mm)
L	Comprimento total	127
b	Largura	12,7
d	Espessura	3,2

Fonte: Adaptado da norma ASTM D790.

4.2 IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVAS

Os parâmetros de impressão foram determinados a partir da literatura utilizada como referencial teórico, baseando-se principalmente no estudo de Oliveira (2021).

Tabela 3 – Parâmetros para impressão 3D dos corpos de prova

Formato do preenchimento interno	Retilíneo
Velocidade de impressão	50 mm/s
Densidade de preenchimento	100%
Espessura de cada camada	0,2mm
Velocidade de impressão da primeira camada	35mm/s

Fonte: Autoria própria (2025).

Em relação à escolha dos materiais, os ensaios foram realizados com os filamentos de PETG (Politereftalato de Etileno Glicol), ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PLA (Poliácido Láctico) e PETR (PET reciclado). Para os filamentos comerciais, as temperaturas de impressão foram definidas seguindo as recomendações técnicas dos respectivos fabricantes. Já para o filamento de PETR (PET reciclado), os parâmetros térmicos foram adotados com base no estudo de Carneiro (2025), trabalho no qual o material foi processado e extrusado. As temperaturas específicas utilizadas para cada material estão detalhadas na Tabela 4.

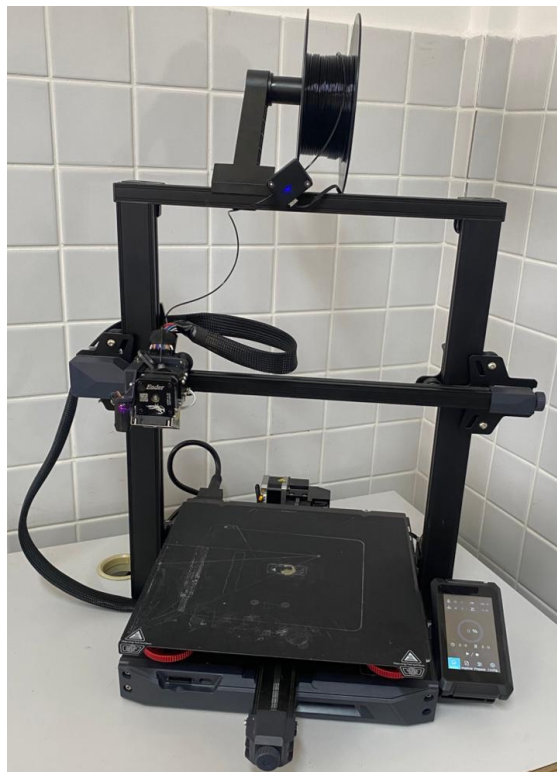
Tabela 4- Temperaturas de impressão relativas a cada material

Material	Temperatura do bico	Temperatura da mesa
ABS	260°C	105°C
PLA	195°C	60°C
PETG	230°C	80°C
PETR	260°C	80°C

Fonte: Autoria própria (2025).

Para a impressão dos CPs foi utilizada uma Impressora 3D modelo Ender 3 S1Plus. Esse modelo possui uma base magnética que oferece boa aderência para a impressão e facilita a remoção do objeto finalizado, além disso, contém dois eixos Z, que garante maior estabilidade e precisão dos movimentos verticais, o que resulta em uma qualidade de impressão superior. Opera sob o princípio da Modelagem por Deposição Fundida (FDM), onde o material é depositado camada por camada. Diferentemente de modelos fechados, esta impressora possui estrutura aberta, onde a movimentação ocorre através do deslocamento da mesa no eixo Y e do corpo de extrusão de impressão nos eixos X e Z. A Figura 3 apresenta a imagem da impressora.

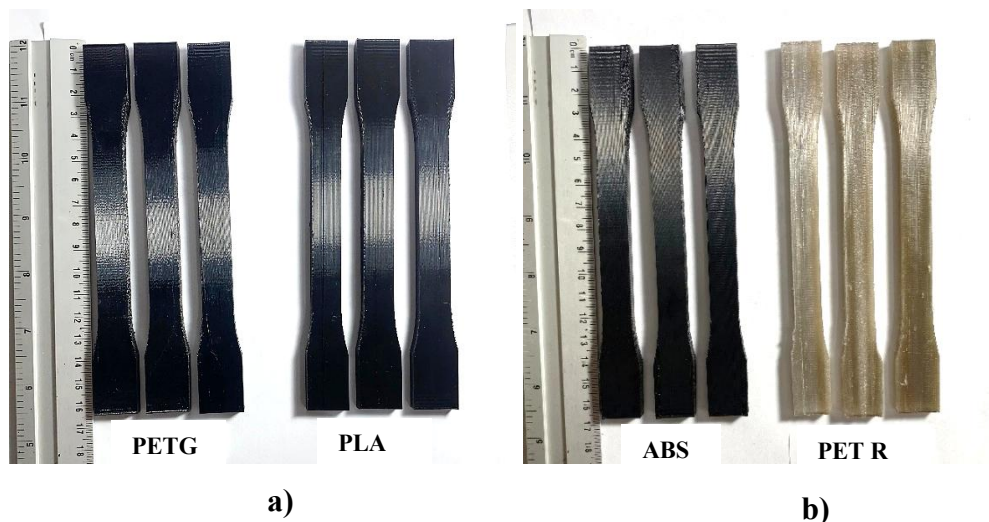
Figura 3- Impressora Ender 3 S1 Plus.



Fonte: Autoria própria (2025).

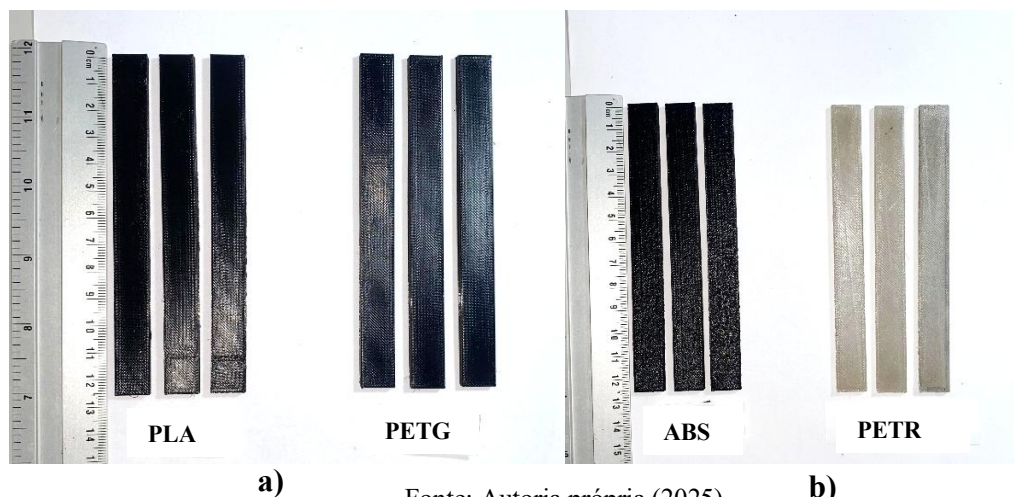
Em seguida, foram impressos três corpos de prova de cada material analisado e para cada tipo de ensaio. Os ensaios mecânicos de flexão e tração foram conduzidos em conformidade com as normas ASTM D790 e ASTM D638, respectivamente. As Figuras 4 e 5 apresentam as amostras logo após a impressão.

Figura 4- Corpos de prova para ensaios de tração após impressão a) PETG e PLA e b) ABS E PET reciclado.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 5- Corpos de prova para ensaios de flexão a) PLA e PETG e b) ABS E PET reciclado.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos de tração e flexão foram realizados na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus Mossoró, no laboratório de ensaios mecânicos, conduzidos em uma Máquina Universal de Ensaio (MUE) da marca EMIC, Modelo DL 10000 e célula de carga utilizada de 100kN, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6- Máquina de ensaios universal Modelo DL 10000.



Fonte: Autoria própria (2025).

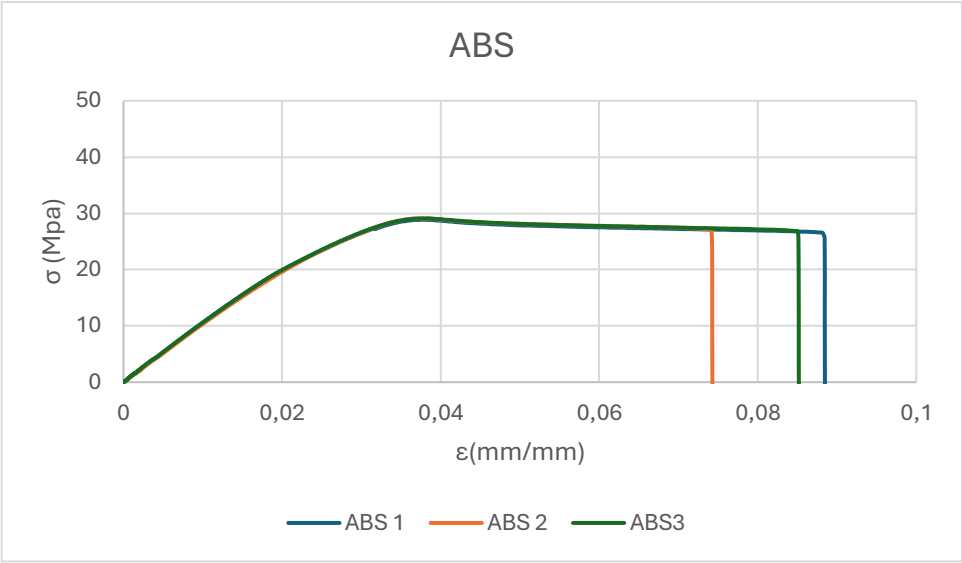
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos para os quatro materiais analisados: ABS, PLA, PETG e PETR. As curvas tensão vs deformação e a tensão média máxima permitiram avaliar e comparar o comportamento mecânico desses filamentos, com ênfase na análise do desempenho do PET reciclado em relação aos filamentos comerciais, tais curvas podem ser observadas nas Figuras 7, 8, 9 e 10.

De acordo com os resultados, verifica-se que enquanto os gráficos de tensão vs deformação do ABS, PLA e PETG apresentaram alta repetibilidade, com suas curvas praticamente idênticas entre as amostras, o PETR demonstrou grande dispersão nos resultados. O corpo de prova PETR 1 apresentou ruptura precoce de aproximadamente 27 MPa, enquanto o corpo de PETR 2 atingiu quase 40 MPa, aproximando-se da resistência do PLA e do PETG. Tal inconsistência do PETR é uma característica esperada em materiais reciclados, dado que seu desempenho pode ser influenciado por diversos fatores, como irregularidades na etapa de extrusão do filamento reciclado, impurezas ou contaminantes presentes no material coletado.

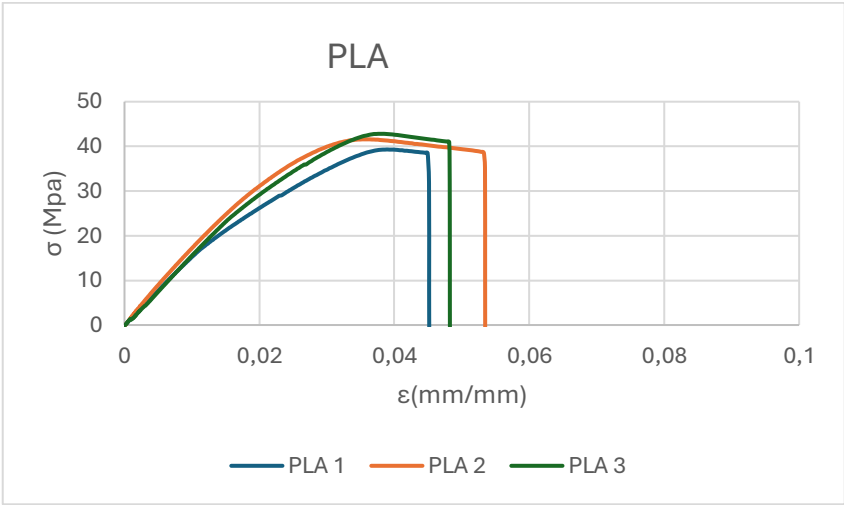
Outro fator relevante a ser considerado é a heterogeneidade da matéria-prima, uma vez que a utilização de garrafas provenientes de diferentes aplicações pode introduzir variações na composição química do polímero. Tais diferenças impactam diretamente a homogeneidade do filamento e, conseqüentemente, a uniformidade da impressão, dificultando a adesão entre as camadas durante a impressão, como destacado por BUSTOS SEIBERT *et al.* (2022). Apesar dessas limitações, o PET reciclado apresentou desempenho mecânico consideravelmente bom, especialmente considerando seu caráter sustentável e de menor custo quando comparado aos filamentos comerciais. Neste contexto, o uso de materiais reciclados, como o Polietileno Tereftalato (PET), emerge como uma alternativa viável e ambientalmente amigável, estimulando a coleta seletiva e a reciclagem, pelo plástico reciclado pós-consumo reduzir a sobrecarga nos aterros sanitários e diminuir o volume de resíduos sólidos (MEDRAN RANGEL *et al.*, 2023; *apud* BRANDÃO *et al.*, 2024.)

Figura 7- Gráfico tensão X deformação ABS.



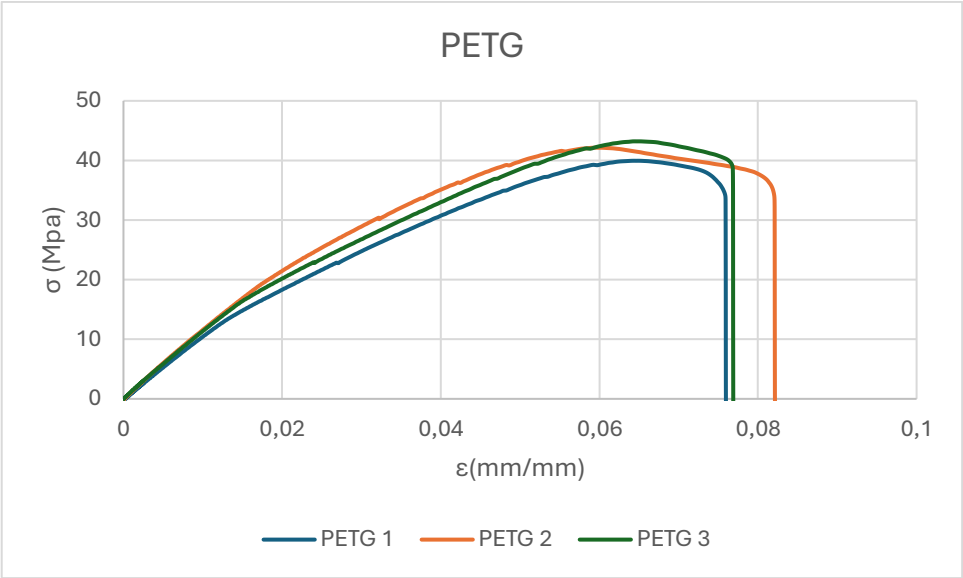
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 8- Gráfico tensão X deformação PLA.



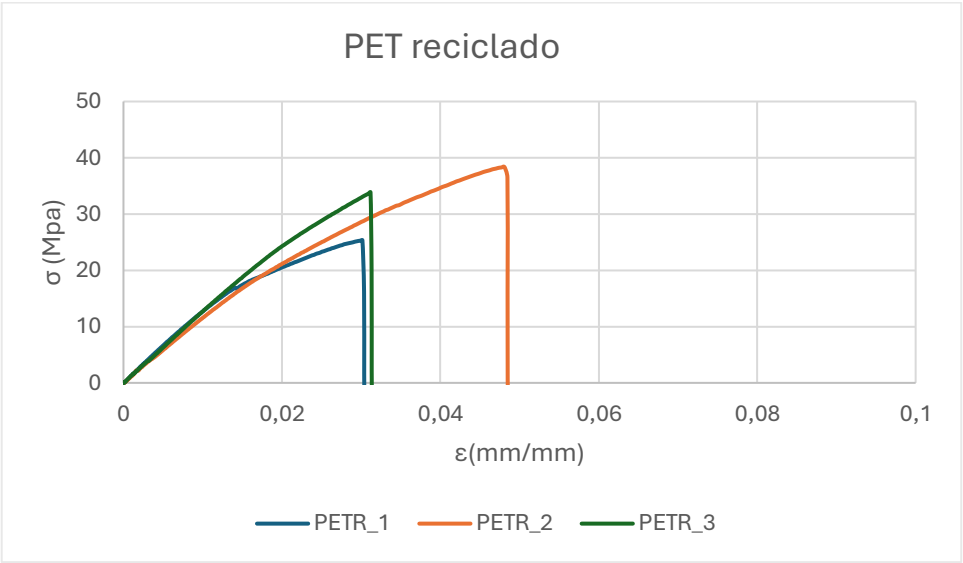
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 9- Gráfico tensão X deformação PETG.



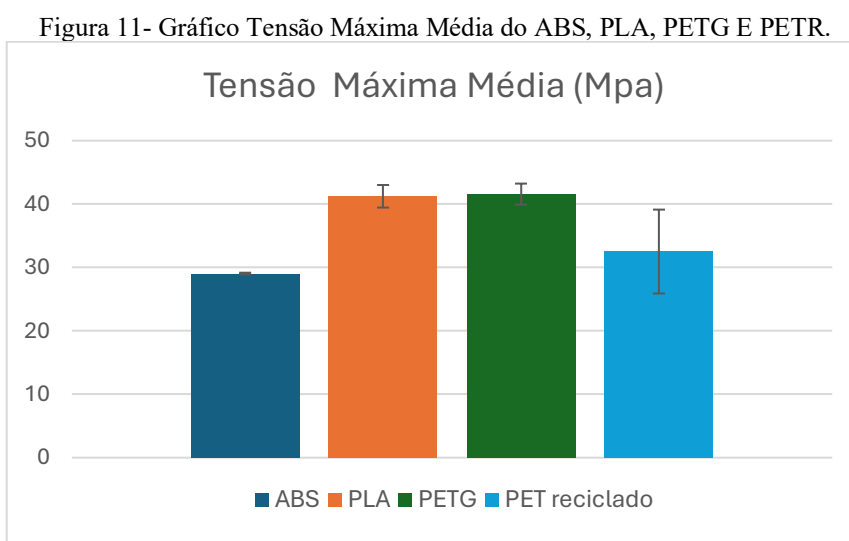
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 10- Gráfico tensão X deformação PETR.



Fonte: Autoria própria (2025).

A análise das curvas tensão máxima média, na Figura 11, também evidenciou que o PET reciclado demonstrou um bom desempenho mecânico, apresentando resistência superior ao ABS e relativamente próxima aos demais materiais como PLA e PETG. No entanto, como pode ser observado na Figura 11, o PETR apresenta maior variabilidade entre os corpos de prova. Essa dispersão revela que esse material ainda é sensível às condições do processo de reciclagem e extrusão, principalmente pela manufatura aditiva. Tais limitações não inviabilizam sua utilização, mas indicam a necessidade de padronização no processo de extrusão, impressão e controle de parâmetros térmicos para, assim garantir maior uniformidade nas propriedades mecânicas.

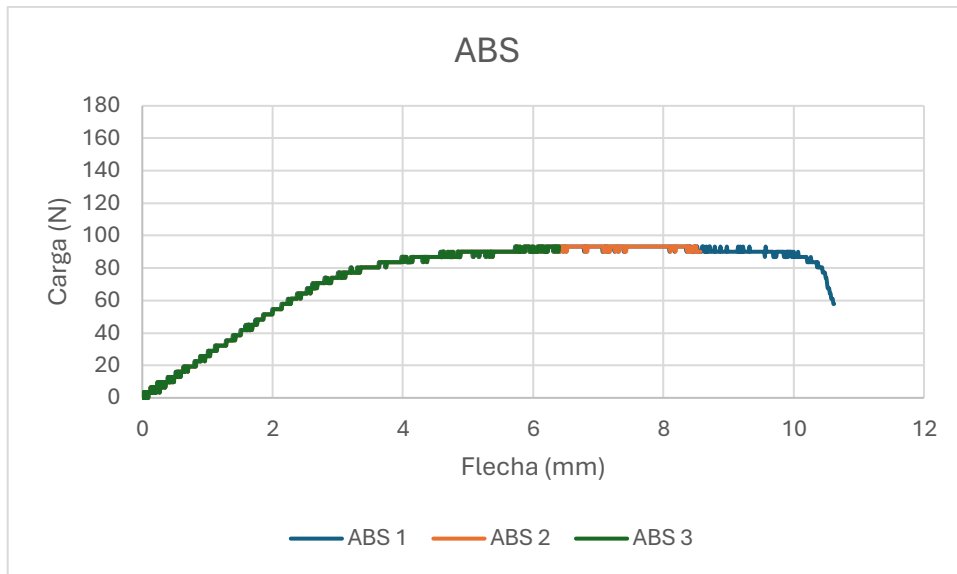


Fonte: Autoria própria (2025).

Os Gráficos de Carga (N) X Flecha(mm) obtidos no ensaio de flexão permitiram avaliar a resistência e a rigidez dos materiais estudados, Figuras 12, 13, 14 e 15. Conclui-se que o PET reciclado demonstrou um bom desempenho mecânico, alcançando cargas máximas superiores às dos polímeros convencionais utilizados na impressão 3D. A melhor amostra de PET reciclado apresentou a maior resistência do estudo, superando PLA, PETG e ABS. Mesmo suas amostras menos resistentes demonstraram, através destes resultados, um comportamento equivalente ao de materiais convencionais de bom desempenho.

É possível identificar na Figura 12, que todos os ensaios com o filamento de ABS apresentam resultados similares, as curvas seguem a mesma tendência para os três ensaios realizados. Além disso, verifica-se que esta é a menor faixa de carga registrada de todos os filamentos estudados, não ultrapassando 100 N em nenhum ensaio.

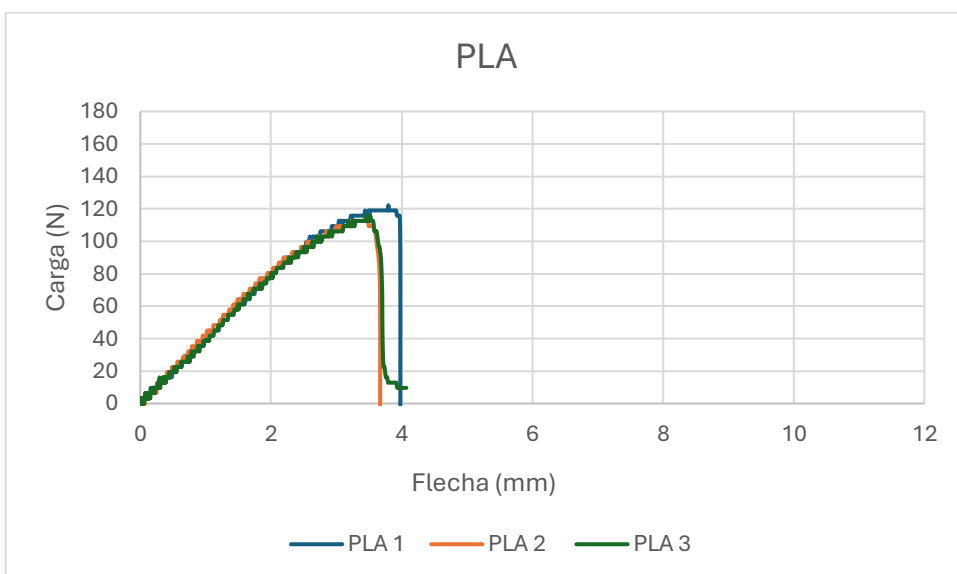
Figura 12- Gráfico de Flexão ABS.



Fonte: Autoria própria (2025).

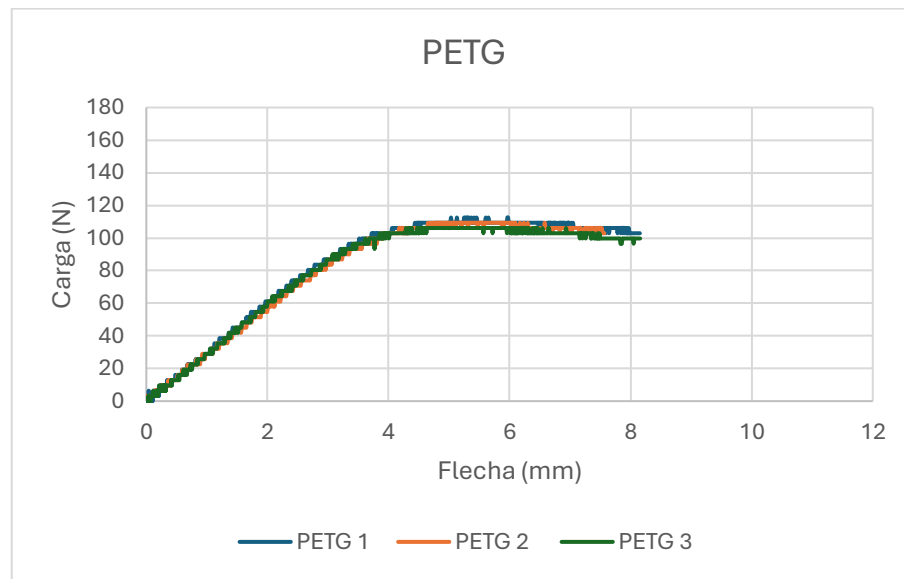
Enquanto os filamentos de PLA e PETG, Figuras 13 e 14, apresentaram resultados superiores ao de ABS, mantendo-se picos máximos numa faixa de 100 a 120 N em carga, seguindo tendência gráfica semelhante. Destacando-se o desempenho do PETG com flecha de 8 mm, sendo o dobro da registrada para o PLA (4 mm). É importante ressaltar que durante os ensaios alguns ocorridos foram registrados, como por exemplo, a fratura precoce do PLA em dois de seus três corpos de prova.

Figura 13- Gráfico de Flexão PLA.



Fonte: Autoria própria (2025).

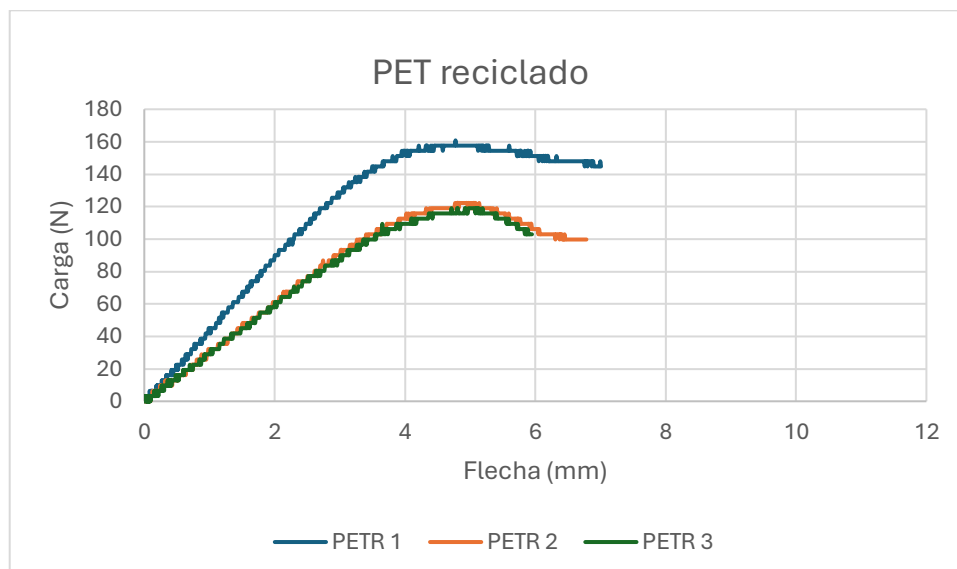
Figura 14- Gráfico de Flexão PETG.



Fonte: Autoria própria (2025).

Já para o filamento de PET reciclado, Figura 15, apenas os ensaios 2 e 3 seguem a mesma tendência em curva gráfica, apresentando uma faixa de carga máxima entre 100 e 120 N, não havendo semelhança total quando comparado ao ensaio 1, com comportamento gráfico discrepante, alcançando carga máxima de 160 N.

Figura 15- Gráfico de Flexão PETR.



Fonte: Autoria própria (2025).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desempenho do filamento PETR foi comparado ao dos tradicionais filamentos de impressão 3D, PLA, ABS, e PETG através dos ensaios mecânicos de tração e flexão. A análise conjunta desses ensaios evidencia que o PETR possui potencial significativo como material alternativo e sustentável para manufatura aditiva, apresentando desempenho mecânico intermediário.

No ensaio de tração, o PET reciclado atingiu tensões máximas intermediárias, superiores ao ABS e relativamente próximas ao PLA e ao PETG. Embora tenha mostrado maior dispersão entre as amostras, seu comportamento médio demonstra satisfatória resistência, especialmente considerando seu caráter reciclado. No ensaio de flexão, o PETR destacou-se ainda mais, atingindo inclusive a maior carga máxima em uma de suas amostras, comparado aos demais. Isso indica que o PETR pode apresentar rigidez e resistência semelhantes ou até superiores aos outros filamentos comerciais estudados nessa pesquisa.

A principal limitação observada em ambos os ensaios se refere à dispersão significativa do PETR, muito superior à dos materiais convencionais. Essa inconsistência pode estar relacionada principalmente às condições do processo de extrusão e a variabilidade das garrafas coletadas, que possuem várias origens: esses dois fatores comprometem a adesão entre camadas e reduz o desempenho tanto em tração quanto em flexão. Ainda assim, os valores obtidos e, especialmente, os desempenhos máximos demonstram que o PETR é promissor, quando se trata de propriedades mecânicas equivalentes ou superiores aos materiais comerciais.

Em síntese, conclui-se que o PET reciclado é tecnicamente viável e sustentável para uso na manufatura aditiva, apresentando resistência mecânica satisfatória e, em alguns casos, destaque frente aos materiais comerciais. Com melhorias no controle de qualidade da reciclagem e da extrusão, o PETR pode se consolidar como um filamento de bom desempenho para impressão 3D, unindo boa resposta mecânica, baixo custo e benefícios ambientais significativos.

REFERÊNCIAS

- ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **12º censo da reciclagem de PET no Brasil**. São Paulo: ABIPET, 2022. Disponível em: https://abipet.org.br/wpcontent/uploads/2022/12/Infografico_12_Censo_da_Reciclagem_no_Brasil_Novembro_2022.pdf. Acesso em: 8 out. 2025.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- ARAÚJO, J. P. de; AGRAWAL, P.; MÉLO, T. J. A. de. Blendas PLA/PEgAA: avaliação da reatividade entre os polímeros e da concentração de PEgAA nas propriedades e na morfologia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 118-127, 2015.
- ASME -THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Stereolithography: the first 3D printing technology**. 2016. Disponível em: <https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/260-stereolithography-the-first-3d-printing-technology>. Acesso em: 27 nov. 2025.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D638-22: standard test method for tensile properties of plastics**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D790-17: standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- BOURELL, D. L. et al. Materials for additive manufacturing. **CIRP Annals**, v. 66, n. 2, p. 659-681, 2017.
- BRANDÃO, Raul de Souza; LIMA, José Augusto Pedro; ALEXANDRE, Jonas. Importância ambiental do uso de PET-PCR em materiais de construção. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, [S. l.], v. 12, n. 35, 2024. DOI: 10.17271/23178604123520245107. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/cidades_verdes/article/view/5107. Acesso em: 27 nov. 2025.
- BUSTOS SEIBERT, M. et al. Manufacturing of a PET filament from recycled material for material extrusion (MEX). **Recycling**, v. 7, n. 5, p. 69, 2022. DOI: 10.3390/recycling7050069. Acesso em: 27 nov. 2025.

- CARDINALI, Jéssica. **Avaliação das propriedades mecânicas de corpos de prova de PLA com diferentes cores obtidos por processo aditivo por extrusão**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- CARNEIRO, Ângelo da Silva. **Desenvolvimento de uma extrusora de PET reciclado para produção de filamento 3D utilizando Arduino**. 2025. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2025.
- FERNANDES, J. F. M. **Estudo da influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PLA**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.
- GAO, W. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, v. 69, p. 65–89, 2015.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- GEBISA, A. W.; LANGA, S. V. A review on 3D printing: an additive manufacturing technology. **South African Journal of Industrial Engineering**, v. 29, n. 2, p. 192–213, 2018. Disponível em: <https://sajie.journals.ac.za/>. Acesso em: 4 jul. 2025.
- KUMAR, M. B.; SATHIYA, P. Methods and materials for additive manufacturing: a critical review on advancements and challenges. **Thin-Walled Structures**, v. 159, p. 107228, 2021.
- LAKHDAR, Y. et al. Additive manufacturing of advanced ceramic materials. **Progress in Materials Science**, v. 116, p. 100736, 2021.
- MATTERHACKERS. **How to succeed when printing with PETG filament**. 2020. Disponível em: <https://www.matterhackers.com/news/how-to-succeed-when-printing-with-petg-filament>. Acesso em: 8 nov. 2025.
- MEDRAN RANGEL, A. et al. Os 3Rs aplicados ao plástico: uma revisão sobre a redução, reutilização e reciclagem do plástico em tecnologias ambientais. **Revista Ciência & Trópico**, v. 47, n. 2, p. 139–157, 2023.
- MENEZES, P. L. et al. Recycled PET for 3D printing: a sustainable alternative for manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123456, 2021.
- OGUNSAKIN, A.; ONITIRI, M. Recycling PET bottles for additive manufacturing: a method for 3D printer filament production. **Nigerian Journal of Technology**, v. 43, n. 4, p. 676–684, 2024. DOI: 10.4314/njt.v43i4.8.

OLIVEIRA, Allisson Moraes de. **Estudo da influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas de materiais usuais: uma revisão de literatura**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2021.

OLIVEIRA, Dhonata Sebastião Caldas. **Efeito do ângulo de impressão nas propriedades elétricas e mecânicas de peças poliméricas impressas em 3D**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura Plena em Física) – Universidade Federal do Pará, Abaetetuba, 2019.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; SABINO NETTO, A. C.; MERLINI, C. **Estudo comparativo entre PETG e PLA para impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica**. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, e-12267, 2018.

SILVA, M. A. et al. Mechanical properties of 3D printed parts using recycled thermoplastics: a review. *Polymer Testing*, v. 90, p. 106706, 2020. WORLD ECONOMIC FORUM. **The new plastics economy: rethinking the future of plastics & catalysing action**. Cologny: World Economic Forum, 2020. Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf. Acesso em: 27 nov. 2025.

YANG, Y. et al. 3D printing of continuous fiber reinforced polymer composites and their mechanical properties. *Materials & Design*, v. 119, p. 11–19, 2017.

APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICO DOS CORPOS DE PROVA

