

ANDRÉ LUIZ VASCONCELLOS DE ARAÚJO

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM CORPOS DE PROVA OBTIDOS
POR IMPRESSÃO 3D, UTILIZANDO MATERIAL VIRGEM E RECICLADO

Belo Horizonte

2026

ANDRÉ LUIZ VASCONCELLOS DE ARAÚJO

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM CORPOS DE PROVA OBTIDOS
POR IMPRESSÃO 3D, UTILIZANDO MATERIAL VIRGEM E RECICLADO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Sandro Cardoso Santos, Dr.

Belo Horizonte

2026

A663a Araújo, André Luiz Vasconcellos de
Análise das propriedades mecânicas em corpos de prova obtidos por impressão 3D, utilizando material virgem e reciclado / André Luiz Vasconcellos de Araújo. – 2026.
49 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientador: Sandro Cardoso Santos.

Banca examinadora: Sandro Cardoso Santos, Cristina Almeida Magalhães e Artur Caron Mottin.

Bibliografia: f. 47-49.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Impressão tridimensional – Teses. 2. Sustentabilidade – Teses. 3. Produção enxuta – Teses. 4. Materiais – Propriedades mecânicas – Teses. 5. Polímeros – Estrutura – Teses. I. Santos, Sandro Cardoso. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 620.192

ANDRÉ LUIZ VASCONCELLOS DE ARAÚJO

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM CORPOS DE PROVA
OBTIDOS POR IMPRESSÃO 3D, UTILIZANDO MATERIAL VIRGEM E
RECICLADO

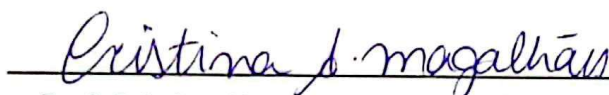
Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 16/06/2026



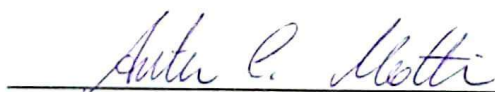
Prof. Sandro Cardoso Santos, Dr., Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Cristina Almeida Magalhães, Dra., Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Artur Caron Mottin, Dr., Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Aos meus pais, familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, cujo suporte e incentivo foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Aos meus familiares, cujos exemplos me inspiram a cada dia.

Ao CEFET-MG, por me acolher. Ao Departamento de Engenharia Mecânica, pelo curso. Aos Professores, pelo esforço diário em garantir a formação de seus alunos.

Ao meu orientador, Professor Sandro Cardoso, pelo direcionamento em cada etapa deste trabalho, cuja ausência tornaria a conclusão do trabalho impossível.

Aos técnicos de laboratório do Campus VI, cuja paciência e compreensão permitiram todos os experimentos aqui presentes.

Por fim, aos meus colegas de curso, cujos conselhos e companheirismo auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A consolidação da Indústria 4.0 e a crescente demanda por práticas sustentáveis impulsionam a busca por materiais que unifiquem desempenho técnico à redução de impacto ambiental. A manufatura aditiva, especificamente a tecnologia de modelagem por deposição de material fundido (FDM), se popularizou globalmente como ferramenta ágil de prototipagem e produção final, gerando, contudo, um volume significativo de resíduos poliméricos. Nesse cenário, a reciclagem mecânica surge como alternativa, visando reintroduzir esses materiais na cadeia produtiva. No entanto, para que a substituição de insumos virgens por reciclados seja efetiva na indústria nacional, é fundamental compreender como o ciclo de reprocessamento altera as propriedades físicas e mecânicas dos polímeros. Este trabalho apresenta o comportamento experimental do processo de impressão 3D com materiais reprocessados, discutindo os desafios da degradação térmica e as oportunidades de eficiência estrutural. É exposto um estudo experimental comparativo realizado nos laboratórios do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), onde foram avaliados corpos de prova de PLA e PETG, virgens e reciclados, submetidos a ensaios de tração destrutivos. O estudo investigou fenômenos críticos como a anisotropia, a adesão entre camadas e a influência da densidade de preenchimento, revelando comportamentos de degradação química e densificação física entre os materiais. O estudo do tema possui importância devido ao objetivo de validar tecnicamente o uso de filamentos reciclados em aplicações de engenharia, estimulando a sustentabilidade na manufatura.

Palavras-chave: Impressão 3D, Sustentabilidade, Propriedades Mecânicas, Degradação de Polímeros e Densificação.

ABSTRACT

The consolidation of Industry 4.0 and the increasing demand for sustainable practices drive the search for materials that unify technical performance with reduced environmental impact. Additive manufacturing, specifically Fused Deposition Modeling (FDM) technology, has popularized globally as an agile prototyping and final production tool, generating, however, a significant volume of polymeric waste. In this scenario, mechanical recycling emerges as a viable alternative aimed at reintroducing these materials into the production chain. Nevertheless, for the substitution of virgin inputs with recycled ones to be effective in the domestic industry, it is essential to understand how the reprocessing cycle alters the physical and mechanical properties of polymers. This study presents an experimental comparative analysis conducted at the Federal Center for Technological Education of Minas Gerais (CEFET-MG), evaluating virgin and recycled PLA and PETG specimens subjected to destructive tensile testing. The investigation addresses critical phenomena such as anisotropy, interlayer adhesion, and the influence of infill density, revealing chemical degradation and physical densification behaviors among the materials. The results aim to technically validate the use of recycled filaments in engineering applications, stimulating sustainability in manufacturing.

Keywords: Additive Manufacturing. FDM 3D Printing. Mechanical Recycling. Tensile Properties. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1.– Fluxograma do processo experimental.....	19
Figura 4.2.– Corpo de prova visualizado no software Ultimaker Cura.....	22
Figura 4.3.– Máquina Universal de Ensaio (MUE) INSTRON EMIC 23-20.....	23
Figura 4.4.– Garras mecânicas modelo GR006 20kN.....	24
Figura 4.5.– Balança eletrônica de precisão.....	25
Figura 4.6.– Corpos de prova de PETG nas condições virgem (coloração escura) e reciclado (coloração clara).....	27
Figura 4.7.– Corpo de prova posicionado para o ensaio.....	28
Figura 4.8.– Amostras durante a impressão. Acima preenchimento 100%, abaixo preenchimento 50% (triangular).....	29
Figura 5.1.– Análise comparativa da resistência à tração máxima entre as diferentes condições de impressão.....	30
Figura 5.2.– Comparativo da deformação máxima na ruptura entre todos os grupos experimentais.....	31
Figura 5.3.– Médias marginais estimadas da Tensão Máxima de Ruptura.....	42
Figura 5.4.– Médias marginais estimadas do Módulo de Young.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. – Propriedades dos filamentos virgens (dados do fabricante).....	21
Tabela 5.1. – Resultados para Módulo de Young e Massa média das amostras.....	32
Tabela 5.2. – Dados de resistência absoluta e específica para os materiais virgens e reciclados.....	34
Tabela 5.3. – Propriedades mecânicas obtidas para o PLA.....	36
Tabela 5.4. – Propriedades mecânicas obtidas para o PETG.....	37
Tabela 5.5. – Grau de Anisotropia (GA) e tensões de ruptura para os materiais virgens e reciclados.....	39
Tabela 5.6. – ANOVA para Tensão Máxima de Ruptura.....	42
Tabela 5.7. – ANOVA para Módulo de Young.....	43

LISTA DE SIGLAS

Sigla	Significado
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
E	Módulo de elasticidade (Módulo de Young)
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por Deposição Fundida)
GA	Grau de Anisotropia
GCODE	Código de controle numérico utilizado em manufatura aditiva
MUE	Máquina Universal de Ensaios
Mm	Massa média
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
PLA	Poliácido Láctico
σ_{esp}	Tensão específica
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima
Tg	Temperatura de transição vítrea
XY	Direção de impressão no plano horizontal
Z	Direção de impressão vertical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Justificativa.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo Geral.....	13
2.2. Objetivos Específicos.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1. Manufatura aditiva.....	14
3.2. Fontes de desperdício.....	15
3.3. Características dos filamentos em análise.....	16
3.4. Reciclagem de termoplásticos.....	16
3.5. Ensaio de tração para polímeros.....	17
3.6. Influência da orientação de impressão nas propriedades mecânicas.....	17
4. METODOLOGIA.....	19
4.1. Materiais.....	20
4.2. Geometria e Dimensões dos Corpos de Prova.....	22
4.3. Máquinas e Equipamentos.....	23
4.3.1. Impressora 3D (FDM).....	23
4.3.2. Máquina Universal de Ensaio.....	23
4.3.3. Balança Eletrônica de Precisão.....	24
4.4. Impressão dos Corpos de Prova.....	25
4.4.1. Preparação dos filamentos.....	25
4.4.2. Parâmetros de Impressão.....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.1. Propriedades Mecânicas.....	32
5.2. Influência do preenchimento e tensão específica.....	33
5.3. Comparação dos Materiais Reciclados em Relação aos Materiais Virgens.....	35
5.4. Análise do Grau de Anisotropia.....	38
5.5. Limitações do Estudo.....	40
5.6. Análise Estatística.....	40
6. CONCLUSÕES.....	45
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
8. REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*), popularmente conhecida como impressão 3D, tem suas origens na década de 80 (Gibson *et al.* 2009). Inicialmente, equipamentos caros, popularizaram-se nos anos 2000 através de projetos de código aberto e vencimento de patentes. De acordo com o relatório da *Fortune Business Insights*, o mercado global de impressão 3D está projetado para alcançar a marca de US\$105,99 bilhões até o ano de 2030, apresentando uma taxa composta de crescimento anual de 24,9% durante o período de previsão de 2023 a 2030.

A técnica utiliza carretéis de filamentos variados, onde em uma superfície o material é derretido em camadas bidimensionais sobrepostas, criando assim o objeto tridimensional final. No entanto, apesar de se tratar de um processo customizável e personalizado pelo usuário, ainda assim há desperdícios e perdas. Certas geometrias necessitam de objetos de apoio durante o processo, conhecidos como suporte, que devem ser descartados ao final. Outras necessitam de auxiliares para adesão na mesa, conhecidos como *raft* (base de suporte), *brim* (extensão periférica), ou *skirt* (contorno de início). Impressões multicolor necessitam de purga constante, desperdiçando até metade do material, a depender da geometria (Rosa *et al.* 2022). Além disso, a própria peça pode falhar de formas variadas, resultando em perda total do material.

Os filamentos para impressão 3D são variados, no entanto alguns se tornaram comuns devido às suas propriedades, especialmente a facilidade de impressão. O PLA (poliácido láctico) se tornou o mais popular (Santana *et al.* 2018), devido à sua baixa temperatura de impressão e opcionalidade de utilizar mesa aquecida. É renovável, devido à sua origem vegetal de amido de milho ou cana-de-açúcar. É biodegradável, no entanto, devido sua estabilidade, sua degradação é lenta ou ineficaz em condições ambientais comuns, exigindo compostagem industrial. Outro material comum devido a sua capacidade de impressão é o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), um derivado do petróleo, mas possui maior resistência ao calor e durabilidade, se comparado ao PLA. Já o PETG (Polietileno Tereftalato Glicol) se encontra como um intermediário entre os dois, possuindo ainda brilho superficial e estabilidade química.

A produção de filamentos destes materiais envolve a extrusão de pelotas plásticas em filamentos, que são bobinados em carretéis para venda. Com o objetivo de garantir a sustentabilidade dos processos de impressão 3D, e preocupações modernas em relação a descarte de lixo e uso de plásticos, há iniciativas para reciclar material descartado, com o objetivo de reextrusão de filamentos e segunda impressão de peças. No entanto, tais soluções ainda possuem preços proibitivos ao usuário cotidiano, além de existirem preocupações sobre o material produzido.

Polímeros são macromoléculas compostas por unidades repetidas chamadas monômeros. Para utilização em impressão FDM, os polímeros devem ser do tipo termoplásticos, o que significa que elevar a temperatura reduz a viscosidade, diferente de termorrígidos como resinas epóxi ou elastômeros como a borracha. Degradações durante e após o processo de impressão, devido à exposição ao calor, oxigênio, luz e umidade, podem causar quebras nas cadeias moleculares, resultando em perdas de propriedades variadas, principalmente mecânicas.

Há diversos testes para verificar propriedades físicas de materiais. A maior preocupação mecânica de peças FDM é devido à sua anisotropia, em que verticalmente suas peças são unidas de forma superficial pela natureza do processo de impressão. Logo, o ensaio mais adequado e que há maior padronização e estudo é o ensaio de tração.

1.1. Justificativa

A escolha de comparar o PLA (Poliácido Láctico) com o PETG (Polietileno Tereftalato Glicol) é justificada pela relevância industrial de ambos. Enquanto o PLA é amplamente estudado e utilizado devido à sua biodegradabilidade e facilidade de impressão, o PETG tem ganhado destaque crescente no setor industrial por sua estabilidade química, resistência térmica e ductilidade superiores.

A reintrodução dos resíduos na cadeia produtiva através da reciclagem mecânica possui finalidade econômica e ambiental. No entanto, a substituição de filamentos virgens por reciclados só é vantajosa se o produto final mantiver sua integridade funcional e vida útil adequada; caso contrário, a falha prematura da peça geraria um novo ciclo de descarte e

reprocessamento, consumindo mais energia e anulando os benefícios ambientais. Desta forma, este trabalho busca validar a aplicação de PLA e PETG reciclados.

A relevância técnica deste estudo é potencializada pelo crescimento do mercado global de manufatura aditiva, o qual se consolida como um pilar estratégico da Indústria 4.0 em aplicações que vão desde a prototipagem rápida até a produção de componentes funcionais definitivos. Contudo, essa expansão industrial traz consigo um aumento proporcional na geração de resíduos plásticos provenientes de suportes descartados, falhas de impressão e obsolescência de peças, demandando soluções alinhadas aos preceitos da economia circular. Nesse cenário, investigar a reciclagem mecânica e o reprocessamento de termoplásticos como o PLA e o PETG vai além do ganho puramente econômico, representando um avanço para mitigar o impacto ambiental da atividade industrial, viabilizando canais sustentáveis de reaproveitamento que reduzem a dependência de matrizes fósseis virgens e inserem a manufatura aditiva no ciclo de reaproveitamento de materiais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Comparar as propriedades mecânicas de peças fabricadas por impressão 3D FDM, utilizando filamentos virgens de PLA e PETG, com seus equivalentes reciclados. Além disso, é objetivo analisar como a adesão de camadas é afetada.

2.2. Objetivos Específicos

Para o cumprimento do objetivo geral, foram definidas as seguintes etapas específicas:

- Definir e validar parâmetros de impressão adequados para o processamento dos filamentos reciclados comerciais de PLA e PETG, visando a obtenção de corpos de prova íntegros e livres de defeitos macroscópicos.
- Realizar ensaios de tração uniaxial conforme a norma ASTM D638 em corpos de prova fabricados em duas orientações distintas: XY (horizontal), para avaliar a resistência do filamento, e Z (vertical), para avaliar a resistência da fusão interlaminar.

- Investigar a influência da densidade de preenchimento, 50% e 100%, na eficiência estrutural das peças, determinando a Tensão Específica para quantificar a eficiência estrutural dos materiais reciclados em estruturas otimizadas.
- Comparar o desempenho relativo entre PLA e PETG, analisando se a maior estabilidade térmica e ductilidade do PETG resultam em uma vantagem técnica sobre o PLA no contexto da reciclagem mecânica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Manufatura aditiva

As tecnologias FDM dependem de etapas digitais para seu funcionamento. Um modelo tridimensional, criado por softwares como SolidWorks, Blender, Autocad, é importado para um software de fatiamento, geralmente relacionado à empresa da impressora, como o PrusaSlicer, Bambu Studio, ou de código aberto, como o Ultimaker Cura (Reis *et al.* 2018). Dentro destas interfaces, diversos parâmetros de impressão podem ser definidos, a depender da geometria da peça final, materiais utilizados, e objetivos da impressão (Bolelli, 2017; Ferreira *et al.* 2022).

Dentre os parâmetros críticos:

- Temperatura de bico: Temperatura na qual o filamento é aquecido para atingir a viscosidade adequada para extrusão.
- Temperatura de mesa: Auxilia na adesão da primeira camada, prevenindo o empenamento, sendo indispensável para materiais como o ABS e recomendada para PLA e PETG.
- Velocidade de impressão: Determina a rapidez do movimento do cabeçote de extrusão nos eixos X e Y.
- Altura de camada: Define a resolução vertical da peça e a quantidade de material extrudado. Em geral, alturas menores resultam em melhor acabamento, mas aumentam o tempo de produção.

- Preenchimento: Define a densidade e o padrão geométrico interno da peça, impactando diretamente a relação peso, resistência, e quantidade de material utilizado.

O material extrusado se encontra quente e maleável, e ao entrar em contato com o ar ambiente é resfriado de forma natural ou forçada através de uma ventoinha, se solidificando na posição desejada. Ao ser depositado, a temperatura do bico de impressão e do material tornam a superfície da camada anterior maleável novamente, resultando assim em uma adesão parcial. Assim, materiais de impressão 3D são anisotrópicos, com propriedades variáveis conforme a direção (Bolelli, 2017).

3.2. Fontes de desperdício

Por se tratar de um processo automatizado, a habilidade do operador se torna limitada à fase pré-processo, o que dificulta a recuperação de uma peça caso ocorra um erro. Estes erros podem surgir através de parâmetros inadequados, falhas mecânicas do equipamento ou dos materiais escolhidos. Estas peças, caso não possam ser aproveitadas, são então descartadas.

No entanto, mesmo um processo bem-sucedido resulta em descarte de material. A impressão, a depender da geometria, necessita de auxílio para ser completa, na forma de fixadores de mesa e suportes, que não fazem parte da peça. Esses então devem ser cortados ou quebrados no final da impressão.

Outra fonte de desperdício de material é exclusiva de impressoras coloridas. Essa tecnologia utiliza o mesmo bico conectado à diferentes carretéis de material, com cores variadas. Ao necessitar de uma cor diferente em uma mesma camada ou entre camadas, de acordo com o modelo, o bico se direciona a um local separado na estrutura, onde descarta material enquanto as cores gradualmente se modificam, até a cor desejada ser alcançada. Isso resulta em grandes quantidades de material descartado, com tendência de aumento conforme a popularização da tecnologia (Rosa *et al.* 2022).

3.3. Características dos filamentos em análise

Como solução de um material ecologicamente sustentável, mas também de boa impressão, o Políácido Láctico (PLA) se tornou o filamento mais popular (Santana *et al.* 2018). Sua produção envolve vegetais, em especial o milho, cana-de-açúcar ou também beterraba. Também é biodegradável, mas lentamente, e quando queimado de forma inadequada pode contaminar o ambiente (Rosa *et al.* 2022). Tecnicamente, o PLA é um poliéster alifático que se destaca por sua elevada rigidez e resistência à tração, apresentando um comportamento semi cristalino ou amorfo dependendo de sua história térmica, com uma temperatura de transição vítrea situada entre 55 °C e 65 °C.

Em contrapartida, o Polietileno Tereftalato Glicol (PETG) tem emergido como uma alternativa no contexto da indústria 4.0, combinando a facilidade de impressão do PLA com a durabilidade mecânica do ABS. Diferentemente do PLA, o PETG é um copoliéster amorfo caracterizado por sua tenacidade e flexibilidade superiores, além de uma estabilidade térmica maior, com uma temperatura de transição vítrea próxima a 80°C (Santana *et al.* 2018). Sua estrutura química lhe confere resistência a agentes químicos e à umidade, tornando-o um candidato promissor para aplicações que exigem maior vida útil sob condições adversas.

3.4. Reciclagem de termoplásticos

Uma possibilidade de reciclagem para ambos seria a reextrusão do material (Rosa *et al.* 2022). Da mesma forma que o filamento é produzido em fábrica, uma máquina aquecida a temperaturas adequadas prensa o material através de uma abertura de diâmetro especificado, de forma a gerar um novo carretel para a impressão.

No entanto, o processamento térmico impõe desafios específicos, especialmente para o PLA, um material higroscópico, ou seja, absorve umidade atmosférica em sua estrutura. Isto é um problema principalmente antes da impressão, pois a água sublima quando em contato com o bico, resultando em bolhas na peça. Além disso, o material sofre degradação exposto aos raios do sol, se tornando quebradiço com o tempo. A reextrusão submete o PLA a um novo ciclo térmico, intensificando a degradação, e a presença de umidade pode causar hidrólise, quebrando cadeias moleculares e reduzindo propriedades mecânicas do filamento obtido

(Regazzi *et al.* 2016). Já o PETG, embora também demande cuidados com a umidade, demonstra uma resistência à degradação térmica superior à do PLA durante o reprocessamento, mantendo suas propriedades de ductilidade de forma mais estável.

Assim, é preciso atestar as propriedades físicas do material reextrusado, e compará-las. O ABS exposto às intempéries é passível de ser reciclado, pois o material degradado, que se encontra principalmente na superfície, é diluído no restante e retém boas propriedades mecânicas, com alongamento máximo de 90% do material original (Sanchez *et al.* 2003). Uma hipótese investigada neste trabalho foi se a recuperação de propriedades do material reciclado também ocorre com o PLA e PETG.

3.5. Ensaio de tração para polímeros

A norma ASTM D638 padroniza ensaios de tração para polímeros impressos (Bolelli, 2017). No entanto, a variedade de parâmetros de impressão impacta os resultados, sendo necessário controle para garantir comparação com demais estudos (Ferreira *et al.* 2022).

A resistência de uma peça FDM é governada por dois mecanismos distintos, sendo resistência Intra Camada, ou seja, quando a força é aplicada na direção das fibras, a resistência depende majoritariamente da força das cadeias poliméricas do material, e Resistência Intercamada, quando a força é aplicada perpendicularmente às camadas, a resistência depende da qualidade da fusão entre as fibras.

A adesão entre camadas ocorre através da difusão térmica das cadeias poliméricas na interface entre dois filamentos adjacentes. Se o material reciclado apresentar viscosidade alterada ou degradação química, essa difusão é prejudicada. Nesses casos, a fratura ocorre por delaminação e não pelo rompimento do material, resultando em uma falha prematura.

3.6. Influência da orientação de impressão nas propriedades mecânicas

A orientação de deposição dos cordões poliméricos em relação ao eixo de aplicação do carregamento mecânico é um dos parâmetros mais determinantes na integridade estrutural de componentes fabricados por modelagem por deposição de material fundido. Devido à natureza inerente do processo, que constrói os objetos por meio da sobreposição de camadas

bidimensionais quentes, as propriedades mecânicas resultantes são intrinsecamente anisotrópicas (Tavares, 2023). Esse fenômeno estabelece que a capacidade de suportar tensões varia conforme a direção do esforço aplicado, predominantemente entre os planos intra camada, associados à orientação horizontal, e as interfaces interlaminares, associadas à orientação vertical.

Quando um componente é orientado e ensaiado na direção horizontal, as forças de tração atuam paralelamente ao alinhamento longitudinal. Sob essa condição de carregamento, o comportamento mecânico da peça é governado de forma majoritária pelas propriedades intrínsecas do polímero base e pela resistência das ligações covalentes que formam a espinha dorsal de suas cadeias macromoleculares. A literatura científica aponta de forma consensual que a orientação horizontal maximiza a tensão limite de tração e o módulo de elasticidade, visto que o material aproveita a continuidade física das linhas de deposição para distribuir e transmitir as tensões internas de maneira uniforme ao longo da seção transversal (Andrade, 2019).

Inversamente, o cenário torna-se crítico quando a deposição ocorre na orientação vertical, configurando uma situação onde o eixo de aplicação da carga uniaxial se posiciona perpendicularmente ao plano das camadas. Nessa disposição geométrica, as propriedades mecânicas do componente deixam de depender da resistência intrínseca das fibras poliméricas e passam a ser governadas exclusivamente pela qualidade e eficiência da fusão térmica. Devido ao resfriamento rápido do material e à flutuação térmica localizada durante a transição de camadas, a interface interlaminar torna-se a região de menor resistência da peça, atuando como uma zona de descontinuidade física e estrutural.

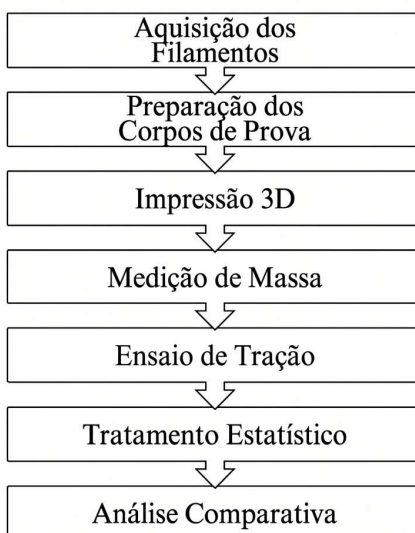
As falhas em corpos de prova verticais ocorrem majoritariamente de forma prematura por delaminação, um mecanismo de ruptura frágil caracterizado pelo destacamento limpo das camadas antes que a matriz polimérica atinja sua deformação plástica plena (Shanmugam *et al.* 2021). O entendimento e a quantificação desse diferencial mecânico, expresso por índices de anisotropia, é fundamental para a engenharia de projetos funcionais, validando a necessidade de se investigar como fatores adicionais, como os ciclos de reciclagem mecânica e as flutuações dimensionais de fluxo, interferem diretamente na difusão macromolecular dessas interfaces (Tavares, 2023).

4. METODOLOGIA

Esta seção apresenta o procedimento experimental adotado para analisar e comparar as propriedades mecânicas e a processabilidade de corpos de prova fabricados por manufatura aditiva FDM, utilizando polímeros nas condições virgem e reciclada comercialmente. A investigação concentra-se em dois termoplásticos de ampla aplicação industrial e acadêmica: Poliacido Láctico (PLA) e Polietileno Tereftalato Glicol (PETG).

Para garantir o rigor científico e a reprodutibilidade dos resultados, a pesquisa foi estruturada em etapas sequenciais interdependentes. Inicialmente, realizou-se a caracterização geométrica e a parametrização do processo de fatiamento utilizando um perfil de fatiamento e código numérico (GCODE) padronizado. Em seguida, os corpos de prova foram manufaturados sob condições controladas, contemplando diferentes orientações de deposição e percentuais de preenchimento. Posteriormente, as amostras foram submetidas à caracterização gravimétrica preliminar e, por fim, a ensaios destrutivos de tração uniaxial para a obtenção das propriedades mecânicas de interesse.

Figura 4.1.– Fluxograma do processo experimental



Fonte: Elaboração própria.

4.1. Materiais

Foram selecionados dois tipos de polímeros termoplásticos para este estudo: Polilático (PLA) e Polietileno Tereftalato Glicol (PETG). Para avaliar o impacto do processo de reciclagem nas propriedades mecânicas, cada material foi adquirido nas condições Virgem (Controle) ou Reciclado. Todos os filamentos possuem diâmetro nominal de 1,75 mm($\pm 0,05$ mm), padrão de mercado para impressoras do tipo FDM de baixo custo. Segundo informações dos fabricantes, o PLA e PETG virgens possuem massa específica de 1,24 g/cm³ e 1,27 g/cm³ respectivamente, valores que se mantêm equivalentes em suas versões recicladas. Em teoria, a reciclagem mecânica não altera de forma significativa a densidade volumétrica dos polímeros base.

Importante ressaltar que a seleção dos filamentos não seguiu um critério de padronização de fabricante entre os grupos virgem e reciclado, mas foi condicionada pela restrita disponibilidade comercial destes insumos no mercado atual. Durante a fase de aquisição, foi identificada uma escassez de fornecedores de filamentos reciclados. Para o PETG, foi localizado apenas um fabricante nacional com o material disponível; para o PLA reciclado, a escassez no mercado interno exigiu a importação.

A Tabela 4.1 apresenta as propriedades mecânicas e físicas disponibilizadas pelo fabricante para os filamentos virgens utilizados como referência neste estudo. Não foram encontradas fichas técnicas contendo propriedades equivalentes para os materiais reciclados, em função da limitada disponibilidade de informações por parte dos fornecedores. Dessa forma, os valores apresentados foram utilizados apenas como referência inicial para contextualização dos materiais.

Tabela 4.1. – Propriedades dos filamentos virgens (dados do fabricante)

Propriedade	PLA	PETG
Propriedades do material base		
Densidade (g/cm ³)	1,24	1,27
Temperatura de fusão (°C)	185	240
Temperatura de transição vítrea, T _g (°C)	60	85
Tensão de escoamento (MPa)	66	51
Resistência à flexão (MPa)	130	72
Módulo de elasticidade (MPa)	4350	2120
Propriedades mecânicas após impressão (ASTM D638)		
Tensão de escoamento (MPa)	24,8	18,6
Módulo de elasticidade (MPa)	1896	1067,9
Tensão de ruptura (MPa)	46	32,6
Alongamento (%)	3,69	7,74

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados técnicos fornecidos pelos fabricantes.

Observa-se uma redução de algumas propriedades mecânicas dos materiais após o processamento por manufatura aditiva FDM, com destaque para a diminuição do módulo de elasticidade, indicando perda de rigidez estrutural associada à presença de vazios intercamadas e à anisotropia do processo de deposição. Ainda assim, a tendência relativa entre os materiais é mantida, com o PLA apresentando maior rigidez e menor deformabilidade em comparação ao PETG. Esses resultados evidenciam que o desempenho mecânico de peças impressas não depende apenas das propriedades intrínsecas do polímero, mas é fortemente influenciado pelas condições de processamento.

Embora os fabricantes disponibilizem resultados obtidos em corpos de prova impressos segundo a ASTM D638, diferenças nos equipamentos, parâmetros de impressão, geometrias, condições de ensaio e orientação de deposição podem resultar em propriedades mecânicas distintas das observadas experimentalmente neste estudo.

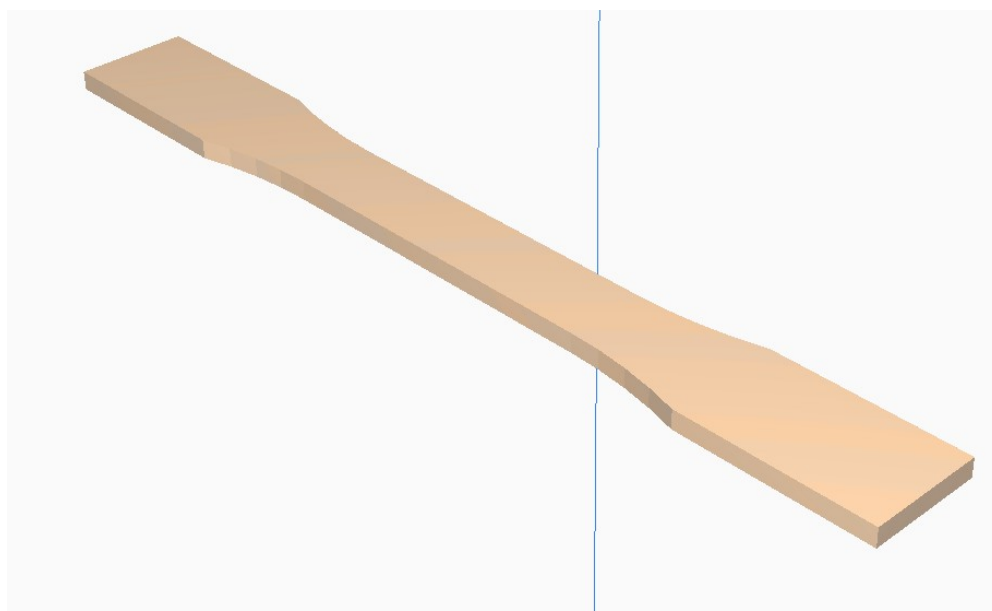
4.2. Geometria e Dimensões dos Corpos de Prova

Assim como Rosa *et al.* (2022), para a impressão do corpo de prova para o ensaio de tração, foi utilizado o corpo de prova ASTM D638 – Tipo I, adequado para materiais com espessura de até 7 mm. O modelo digital (CAD) do corpo de prova foi parametrizado com as seguintes dimensões:

- Comprimento total: 165 mm
- Largura da seção estreita: 13 mm
- Espessura: 3,2 mm
- Comprimento da seção calibrada: 50 mm

Para a modelagem do corpo de prova foi utilizado o software SolidWorks, cujo arquivo foi transferido para o *slicer* Ultimaker Cura, conforme mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2.– Corpo de prova visualizado no software Ultimaker Cura



Fonte: Elaboração própria.

4.3. Máquinas e Equipamentos

4.3.1. Impressora 3D (FDM)

A fabricação dos corpos de prova foi realizada em uma impressora 3D de tecnologia FDM, modelo Elegoo Neptune 3, equipada com bico extrusor de latão com diâmetro de 0,4 mm. Este diâmetro é o padrão industrial para equilibrar qualidade superficial e tempo de impressão. O equipamento possui sistema de extrusão Bowden, ao invés de extrusão direta (*Direct Drive*).

4.3.2. Máquina Universal de Ensaios

Os ensaios de tração foram conduzidos em uma Máquina Universal de Ensaios (MUE) INSTRON EMIC 23-20 com célula de carga calibrada e interface computadorizada de aquisição dinâmica de dados, cuja interface de controle é apresentada na figura 4.3.

Figura 4.3.– Máquina Universal de Ensaios (MUE) INSTRON EMIC 23-20



Fonte: Elaboração própria.

O equipamento possui tipos de adaptadores dedicados aos ensaios que também realiza, como compressão e flexão. Com o objetivo de realizar o ensaio de tração destrutivo, foram utilizadas garras mecânicas auto-travantes por efeito cunha, para evitar o deslizamento da amostra durante o tracionamento, modelo GR006 20kN. Este equipamento é mostrado na figura 4.4.

Figura 4.4.– Garras mecânicas modelo GR006 20kN



Fonte: Elaboração própria.

4.3.3. Balança Eletrônica de Precisão

Todas as amostras foram submetidas à caracterização gravimétrica. Os corpos de prova foram pesados individualmente utilizando uma balança digital de precisão Shimadzu, modelo ATY224R, visando a obtenção da massa média (M_m) de cada grupo para o cálculo posterior da Tensão Específica. O modelo possui capacidade máxima de 220 g e resolução de 0,0001 g (0,1 mg). Adicionalmente, foram cortados e pesados segmentos de 1 metro de comprimento de cada filamento (virgem e reciclado) para a determinação da densidade linear

da matéria-prima, permitindo a verificação de variações de fluxo. A figura 4.5 retrata o equipamento utilizado nos ensaios.

Figura 4.5.— Balança eletrônica de precisão



Fonte: Elaboração própria.

4.4. Impressão dos Corpos de Prova

4.4.1. Preparação dos filamentos

Para cada classificação de ensaio, foram utilizados 3 corpos de prova de filamento virgem e 3 do reciclado, para cada material, orientados a 0° e 90° em relação ao eixo de aplicação da força de tração, com os corpos impressos longitudinalmente apresentando preenchimento de 100% e 50% triangular, totalizando 36 amostras. O teste foi realizado conforme a norma ASTM D638, em máquina de ensaios universal, com velocidade de ensaio de 5 mm/min, disponível no campus CEFET-MG. Conforme a norma, é necessário manter os corpos de prova em ambiente climatizado a 23°C e umidade em 50% por 24 horas antes dos ensaios. Os dados obtidos foram utilizados para gerar os gráficos comparativos apresentados no Capítulo 5.

A adoção de triplicatas para cada condição experimental é baseada nas diretrizes de triagem da norma ASTM D638, que estabelece um tamanho amostral mínimo para a determinação de propriedades de tração em plásticos. Embora ensaios convencionais com polímeros injetados possam demandar um maior número de amostras devido à variabilidade estatística do material, a manufatura aditiva por FDM opera sob um regime de alta repetibilidade geométrica e paramétrica controlada numericamente via código GCODE, minimizando a dispersão. Além disso, esse tamanho amostral foi condicionado por restrições operacionais de disponibilidade de tempo de uso da Máquina Universal de Ensaio (MUE) nos laboratórios do CEFET-MG, uma limitação prática comum em pesquisas acadêmicas experimentais que não compromete a identificação das tendências mecânicas avaliadas.

Durante a etapa de produção dos corpos de prova, foi avaliada a processabilidade dos materiais reciclados em comparação aos virgens. Foi observado que a utilização do mesmo perfil de fatiamento e código numérico (GCODE) foi executável para ambos os grupos. De acordo com o rigor experimental, é fundamental manter o mesmo GCODE, a fim de manter relações geométricas, paramétricas e trajetória do bico extrusor durante a produção dos corpos de prova. Significa, portanto, que as alterações resultantes da reciclagem comercial não degradam o material a ponto de inviabilizar a extrusão sob parâmetros térmicos e de velocidade padronizados.

No entanto, o filamento de PETG reciclado apresentou instabilidades. Durante a extrusão, foi observada a ocorrência de crepitação, mecanismo que significa a vaporização de umidade retida no filamento ao entrar em contato com o bico aquecido, resultando em um acabamento superficial com maior rugosidade e na intensificação do efeito de *stringing*.

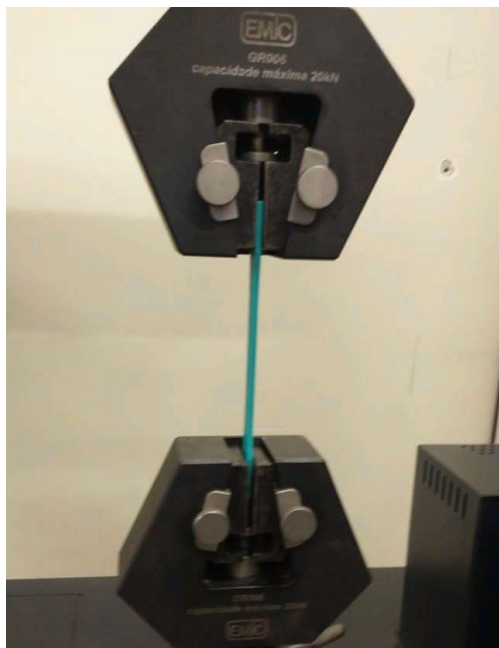
Figura 4.6.– Corpos de prova de PETG nas condições virgem (coloração escura) e reciclado (coloração clara).



Fonte: Elaboração própria.

Para início do ensaio de tração, foi criado um perfil específico para o tipo de amostra, referenciando seu preenchimento, sua orientação, seu material, e a condição entre virgem e reciclado. Todos os perfis possuíam velocidade de tração de 5mm/min. Com o corpo de prova posicionado, e o botão de início do ensaio pressionado, as garras se afastam, e a máquina produz o gráfico Tensão-Deformação dinamicamente, podendo os gráficos das 3 amostras serem visualizados e comparados, garantindo o mesmo padrão.

Figura 4.7.– Corpo de prova posicionado para o ensaio.



Fonte: Elaboração própria.

4.4.2. Parâmetros de Impressão

O fatiamento dos modelos digitais foi realizado no software Ultimaker Cura. Para garantir a validade da comparação entre os materiais virgens e reciclados, os parâmetros base foram mantidos constantes, variando apenas conforme a necessidade de cada polímero (PLA ou PETG). Para fins de constância metodológica e comparabilidade dos resultados, os parâmetros seguem as recomendações de Santana *et al.* (2018), conforme listado a seguir:

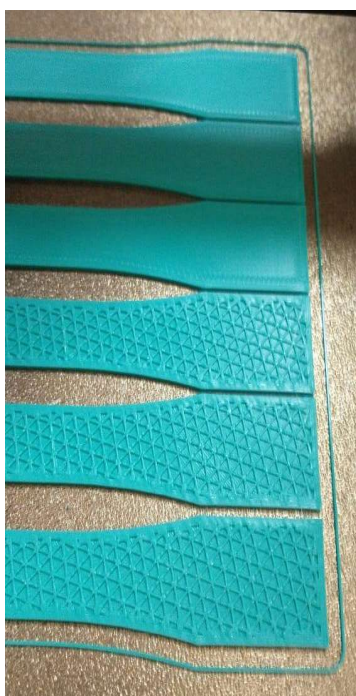
- Altura de Camada: 0,2 mm;
- Número de Perímetros (Paredes): 3 perímetros, 1,2mm;
- Ventoinhas ligadas;
- Temperaturas PLA: Bico a 210 °C / Mesa a 60 °C;
- Velocidade de impressão PLA: 100mm/s;
- Temperaturas PETG: Bico a 250 °C / Mesa a 80 °C;

- Velocidade de impressão PETG: 60mm/s.

Para avaliar a anisotropia e a adesão entre camadas, os corpos de prova foram impressos nas orientações Horizontal (XY) ou Vertical (Z). Para garantir a estabilidade das amostras verticais (Z) e prevenir falhas de impressão por descolamento, foi utilizado o recurso de *Brim*, *Raft* e suportes do tipo árvore (*tree*).

Para as peças impressas na direção horizontal, optou-se por um preenchimento de 100% para minimizar a influência do padrão interno na resistência à tração, aproximando a peça de um sólido isotrópico, e 50% triangular. Para as peças impressas vertical, haveria pouca influência da porcentagem de preenchimento, devido à pequena espessura do corpo de prova. Por isso, foi optado um preenchimento somente de 100%, para análise especificamente da adesão entre as camadas.

Figura 4.8.– Amostras durante a impressão. Acima preenchimento 100%, abaixo preenchimento 50% (triangular).



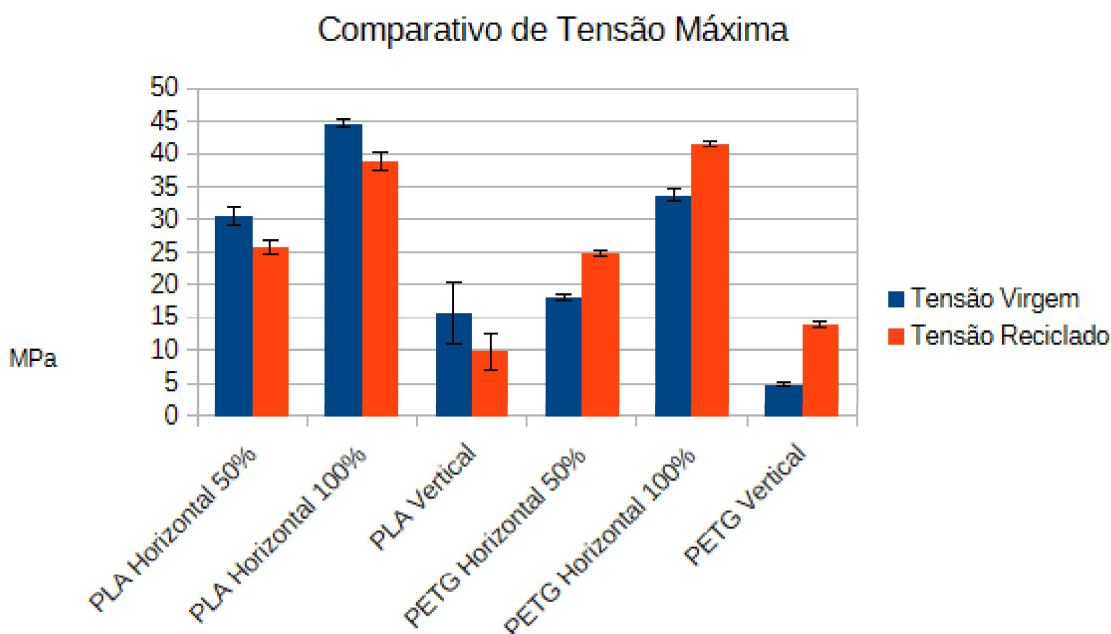
Fonte: Elaboração própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos tensão-deformação apresentaram comportamento compatível com materiais poliméricos. De início há o regime elástico, linear, onde é obtido o módulo de elasticidade E . Ao atingir o limite de escoamento, o material entra em sua fase plástica, deformando de forma permanente, para atingir sua tensão última e, por fim, sua tensão de ruptura, onde o ensaio finaliza. É possível então calcular a resistência à tração, e o alongamento na ruptura, utilizando estudos de Tavares (2023) e Shanmugam *et al.* (2021).

Diante disso, foi realizado inicialmente o levantamento das propriedades de resistência máxima dos corpos de prova. Para fins de visualização das variações observadas nos ensaios destrutivos, a Figura 5.1 apresenta a comparação da resistência à tração máxima entre as diferentes condições de impressão, contrapondo os materiais poliméricos em seus estados virgem e reciclado.

Figura 5.1.– Análise comparativa da resistência à tração máxima entre as diferentes condições de impressão.

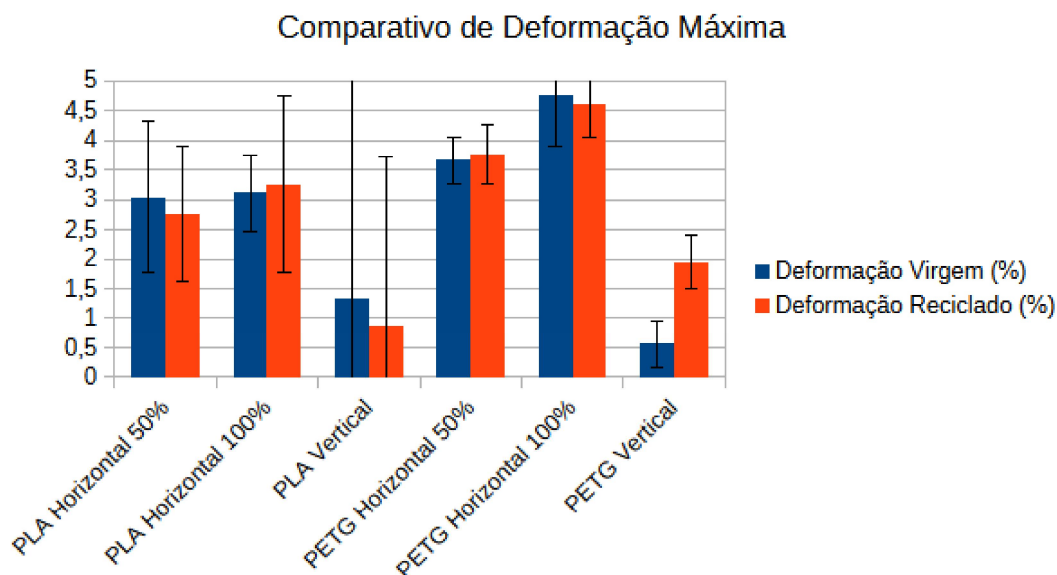


Fonte: Elaboração própria.

Conforme a figura 5.1, ao analisar isoladamente as amostras virgens e recicladas, o comportamento dos materiais está de acordo com as expectativas, com as maiores tensões atingidas na orientação Horizontal com preenchimento de 100%, e as menores tensões na orientação Vertical de impressão, e com as maiores tensões demonstradas pelo PLA virgem, o material mais rígido dentre os ensaios. Além disso, os materiais reciclados possuíam comportamentos opostos, com o PLA reciclado demonstrando menores tensões, e o PETG reciclado maiores tensões, se comparados aos seus equivalentes virgens.

Além disso, foi avaliada a capacidade de alongamento de cada grupo até o instante da falha estrutural. Essa relação entre comportamento elástico e plástico é ilustrada na Figura 5.2, que apresenta o comparativo da deformação máxima na ruptura entre todos os grupos experimentais avaliados.

Figura 5.2.– Comparativo da deformação máxima na ruptura entre todos os grupos experimentais.



Fonte: Elaboração própria.

Assim como a figura 5.1, a figura 5.2 revela padrões ao analisar separadamente as amostras virgens e recicladas, com as maiores deformações encontradas nas orientações Horizontais com preenchimento de 100%, e as menores nas amostras de orientação vertical. No entanto, ao comparar o comportamento das amostras recicladas com suas respectivas amostras virgens, não há um padrão visível, com comportamentos variados entre quantidades de preenchimento, orientação de impressão e material.

5.1. Propriedades Mecânicas

Para fins de comparação entre todos os tipos de amostras avaliadas, a Tabela 5.1 reúne os valores do Módulo de Young e da massa média dos corpos de prova, incluindo seus respectivos desvios padrão. Essa organização permite uma visão consolidada do comportamento mecânico e das propriedades em função do Estado do Material e da Condição de Impressão.

Tabela 5.1. – Resultados para Módulo de Young e Massa média das amostras

Material	Estado	Condição	Módulo de Young (MPa)	Desvio Padrão	Massa Média (g)	Desvio Padrão
PLA	Virgem	Horizontal 50%	1580,03	36,68	7,35	0,04
PLA	Virgem	Horizontal 100%	2321,16	39,04	9,26	0,01
PLA	Virgem	Vertical	1628,03	126,51	9,36	0,08
PLA	Reciclado	Horizontal 50%	1415,37	42,98	7,11	0,03
PLA	Reciclado	Horizontal 100%	2081,5	43,18	8,97	0,05
PLA	Reciclado	Vertical	1508,28	217,36	9,11	0,12
PETG	Virgem	Horizontal 50%	738,85	35,89	7,38	0,04
PETG	Virgem	Horizontal 100%	1132,41	35,48	9,21	0,02
PETG	Virgem	Vertical	1067,03	82,69	8,87	0,3
PETG	Reciclado	Horizontal 50%	954,45	107,96	8,09	0,01
PETG	Reciclado	Horizontal 100%	1340,9	56,51	10,07	0,04
PETG	Reciclado	Vertical	963,86	235,32	9,54	0,11

Fonte: Autor

A análise estatística dos dados revela que as amostras impressas na orientação Vertical apresentaram um maior desvio padrão, indicando uma maior dispersão, tanto na caracterização gravimétrica quanto no Módulo de Young. O PLA reciclado vertical registrou um desvio de 217,36 MPa (média de 1508,28 MPa), enquanto o PETG reciclado vertical apresentou uma dispersão ainda mais severa, com desvio de 235,32 MPa (média de 963,86 MPa). Este fenômeno indica uma forte influência da qualidade da adesão intercamada e da heterogeneidade interna das amostras reprocessadas. Como a fratura nessa orientação ocorre por delaminação, a presença de defeitos localizados, tais como vazios interlaminares, microporosidades resultantes da crepitação por umidade ou variações pontuais na viscosidade do polímero degradado, atuam de forma aleatória como concentradores de tensão. Esse comportamento justifica o comportamento oscilatório dos resultados no eixo Z, evidenciando que a instabilidade molecular gerada pela reciclagem comercial compromete a confiabilidade estrutural do componente sob carregamentos perpendiculares às camadas.

5.2. Influência do preenchimento e tensão específica

Além da tensão máxima absoluta ($\sigma_{\max}$), foi calculada a Tensão Específica (σ_{esp}), ou índice de eficiência estrutural, dividindo a tensão máxima pela massa média (M_m) de cada grupo. Este parâmetro permite avaliar a eficiência do material por grama utilizada.

$$\sigma_{\text{esp}} = \frac{\sigma_{\max}}{M_m} \quad \text{Eq. 1}$$

Com base nessa metodologia, os resultados foram consolidados para cada condição experimental. A Tabela 5.2 apresenta os valores organizados em ordem decrescente de tensão específica, do maior para o menor.

Tabela 5.2. – Dados de resistência absoluta e específica para os materiais virgens e reciclados.

Material	Estado	Condição	Tensão máx (MPa)	Massa média (g)	σ_{esp} (MPa/g)
PLA	Virgem	Horizontal 100%	44,6310	9,2634	4,8180
PLA	Reciclado	Horizontal 100%	38,7971	8,9705	4,3250
PLA	Virgem	Horizontal 50%	30,5690	7,3489	4,1597
PETG	Reciclado	Horizontal 100%	41,5611	10,0677	4,1282
PETG	Virgem	Horizontal 100%	33,7170	9,2088	3,6614
PLA	Reciclado	Horizontal 50%	25,7449	7,1089	3,6215
PETG	Reciclado	Horizontal 50%	24,8751	8,0902	3,0747
PETG	Virgem	Horizontal 50%	18,0586	7,3832	2,4459
PLA	Virgem	Vertical	15,7179	9,3589	1,6795
PETG	Reciclado	Vertical	13,7689	9,5366	1,4438
PLA	Reciclado	Vertical	9,7934	9,1103	1,0750
PETG	Virgem	Vertical	4,8654	8,8683	0,5486

Fonte: Autor

A análise de eficiência revelou que o PLA Virgem 100% é o material mais eficiente do estudo, com um índice de 4,82 MPa/g, seguido de perto pelo PETG Reciclado Sólido (4,13 MPa/g).

Ao comparar as estratégias de fatiamento, a análise gravimétrica revelou um comportamento geométrico não linear característico da manufatura aditiva por FDM. A razão matemática exata entre a massa média das amostras com 50% de *infill* e as amostras sólidas (100%) convergiu para aproximadamente 80% em todos os grupos experimentais. Para o PLA, a relação foi de 79,33% na condição virgem e 79,25% na condição reciclada; para o PETG, os índices foram de 80,16% (virgem) e 80,36% (reciclado).

Esse fenômeno é explicado pelo fato de que a redução nominal de 50% no preenchimento interno afeta apenas o núcleo celular do componente. Como os corpos de prova ASTM D638 Tipo I possuem uma espessura reduzida de 3,2 mm e foram manufaturados com 3 perímetros de parede, a maior porção volumétrica da peça é composta por material maciço periférico. Consequentemente, a alteração do *infill* interno gera uma economia real de apenas 20% na massa total da peça. Contudo, essa economia de massa de apenas 20% resultou em uma perda de resistência proporcionalmente muito maior. O PLA virgem, por exemplo, sofreu uma queda de eficiência específica de 4,82 MPa/g para 4,16 MPa/g, sugerindo que, para geometrias esbeltas sob tração pura, os perímetros externos

necessitam do suporte de um núcleo totalmente maciço para distribuir os esforços de forma homogênea.

Aprofundando a análise das razões de Tensão Específica, observa-se como o alívio de peso impõe penalidades distintas a cada polímero. No caso do PLA, a redução do preenchimento interno demonstrou uma perda de eficiência: a relação de Tensão Específica entre as configurações de 50% e 100% de *infill* preservou 86% da eficiência no grupo virgem e 84% no grupo reciclado. Em contrapartida, o PETG se mostrou altamente sensível à redução de densidade interna. O PETG Virgem reteve apenas 67% de sua eficiência por grama ao passar de sólida para 50% de *infill*.

Contudo, o destaque da análise de eficiência retorna sobre o PETG Reciclado na configuração de 50% de preenchimento. Este grupo atingiu um índice de 3,07 MPa/g, superando em aproximadamente 25% a eficiência do PETG Virgem de mesmo preenchimento, com 2,45 MPa/g. Além disso, o PETG Reciclado atenuou a perda por alívio de peso ao preservar 75% da sua eficiência específica em relação à sua versão sólida. Este resultado reforça a influência benéfica da densificação no comportamento estrutural.

Por fim, o impacto severo da anisotropia também se refletiu de forma contundente nos índices de eficiência por massa na orientação vertical. O PLA Virgem reteve apenas 35% da sua eficiência específica no eixo Z em comparação ao plano horizontal, índice que caiu para 25% no PLA Reciclado. O PETG Virgem apresentou o cenário mais crítico do estudo, preservando uma razão de apenas 15% de sua eficiência por grama no eixo Z, devido à sua fragilidade interlaminar original. Em contrapartida, o PETG Reciclado elevou essa retenção para 34%, patamar equivalente ao do PLA virgem.

5.3. Comparação dos Materiais Reciclados em Relação aos Materiais Virgens

Com o objetivo de analisar o impacto direto do reprocessamento comercial nas propriedades mecânicas dos materiais, os resultados dos ensaios de tração uniaxial foram organizados em função do Estado do Material e das respectivas Condições de Fabricação. A análise considerou três propriedades principais: a tensão máxima de ruptura, o Módulo de

Young e a deformação na ruptura. Inicialmente, avaliou-se o comportamento do PLA, cujos dados experimentais estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. – Propriedades mecânicas obtidas para o PLA.

Material	Estado	Condição	Tensão máx (MPa)	Módulo Young (MPa)	Deformação na ruptura (%)
PLA	Virgem	Horizontal 50%	30,5690	1580,0260	3,0433
PLA	Virgem	Horizontal 100%	44,6310	2321,1553	3,1067
PLA	Virgem	Vertical	15,7179	1628,0263	1,3200
PLA	Reciclado	Horizontal 50%	25,7449	1415,3690	2,7667
PLA	Reciclado	Horizontal 100%	38,7971	2081,4953	3,2600
PLA	Reciclado	Vertical	9,7934	1508,2837	0,8800

Fonte: Autor

A análise dos ensaios de tração revelou um comportamento condizente com a degradação termomecânica esperada para o PLA. Conforme apresentado na Tabela 5.3, o material reciclado sofreu redução de resistência em todas as condições testadas. Na orientação Horizontal, o PLA reciclado apresentou uma tensão máxima de 38,80 MPa, representando uma queda de 13,0% em relação ao virgem, 44,63 MPa.

Este resultado corrobora os estudos de Regazzi *et al.* (2016), que atribuem a perda de propriedades mecânicas à cisão de cadeias moleculares causada por hidrólise e cisalhamento térmico durante o reprocessamento na rosca da extrusora. As ligações covalentes são quebradas, diminuindo o comprimento das cadeias poliméricas, prejudicando a difusão térmica e a adesão na interface das camadas durante a impressão. Como consequência, o material perde a capacidade de transferir tensões uniformemente, facilitando a propagação de trincas.

Na orientação Vertical, onde o esforço é suportado pela fusão entre camadas, o PLA reciclado sofreu uma redução de resistência mais crítica, atingindo 9,79 MPa contra 15,72 MPa do virgem, uma perda de 37,7%. Isso evidencia que a degradação do material afeta a adesão interlaminar, tornando a peça reciclada crítica para aplicações com carga no eixo Z, devido à falha prematura por delaminação. Assim, os resultados sugerem que, apesar do aumento da fluidez, devido a redução do comprimento das cadeias, a difusão térmica na interface das camadas foi prejudicada.

Para validar se a perda de resistência ocorria devido variações no fluxo de material, foi realizada a caracterização gravimétrica dos filamentos de PLA. A densidade linear do PLA Reciclado (2,999 g/m) se mostrou estatisticamente equivalente à do PLA Virgem (2,974 g/m), com uma variação desprezível de 0,84%.

Este dado isola a causa da falha: sendo a quantidade de massa depositada virtualmente idêntica para ambos os grupos, descartando a hipótese de sub-extrusão ou falta de material. Portanto, sugere que a redução de desempenho mecânico, especialmente a perda de 37,7% na adesão vertical é consequência da degradação do polímero.

Em seguida, estendeu-se a mesma análise ao PETG, sob o mesmo protocolo experimental. Os resultados obtidos para as amostras virgens e recicladas, sob diferentes condições de impressão, estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. – Propriedades mecânicas obtidas para o PETG.

Material	Estado	Condição	Tensão máx (MPa)	Módulo Young (MPa)	Deformação equivalente
PETG	Virgem	Horizontal 50%	18,0586	738,8520	3,6633
PETG	Virgem	Horizontal 100%	33,7170	1132,4073	4,7533
PETG	Virgem	Vertical	4,8654	1067,0270	0,5600
PETG	Reciclado	Horizontal 50%	24,8751	954,4523	3,7700
PETG	Reciclado	Horizontal 100%	41,5611	1340,8967	4,6067
PETG	Reciclado	Vertical	13,7689	963,8550	1,9533

Fonte: Autor

Diferentemente do PLA, o PETG reciclado apresentou um desempenho mecânico superior ao seu equivalente virgem. Foi observado um aumento na rigidez e na tensão máxima de ruptura. Na orientação horizontal, o PETG reciclado atingiu 41,56 MPa, um aumento de 23,2% sobre o virgem, 33,72 MPa. Já na orientação vertical, o PETG Virgem apresentou uma falha de adesão, suportando apenas 4,87 MPa., enquanto o PETG Reciclado mitigou essa deficiência, atingindo 13,77 MPa, um aumento de 182%, se aproximando do comportamento do PLA no eixo Z.

Embora tenha sido registrada a ocorrência de crepitação durante a impressão do PETG Reciclado, indicando uma degradação térmica por vaporização de umidade retida na matéria-prima, ao catalogar a massa de amostras de 1 metro de comprimento, foi constatado que o filamento de PETG Reciclado, 3,255 g/m possui uma densidade linear 10,1% superior à

do PETG Virgem, 2,955 g/m. Este dado pode explicar o desempenho mecânico superior do material reciclado. Considerando que os filamentos possuem origem de fabricantes distintos, esta diferença de densidade indica uma provável variação na composição reciclada. Como a impressora opera em malha aberta (baseada em volume teórico para um diâmetro fixo de 1,75 mm), a maior massa por metro do filamento reciclado sugere a ocorrência de sobre-extrusão.

Na prática, esse resultado sugere uma deposição excessiva de material de aproximadamente 10% em relação ao programado, o que aumentou a pressão interna no bico, forçando o material fundido contra a camada anterior. Esse mecanismo pode ter contribuído para a compactação das camadas e redução dos defeitos internos, mascarando perdas de propriedade mecânica que a degradação química deveria ter causado à matriz polimérica.

5.4. Análise do Grau de Anisotropia

A manufatura aditiva por FDM é anisotrópica, ou seja, as propriedades mecânicas variam dependendo da direção de aplicação da carga. Para quantificar o impacto da reciclagem na coesão entre camadas, foi adotado o Grau de Anisotropia (GA), definido neste trabalho com base na razão entre a resistência à tração na orientação vertical (σ_z) e na orientação horizontal (σ_{xy}).

Para permitir a interpretação do resultado em uma escala adimensional e comparativa, o índice foi normalizado segundo a expressão:

$$GA = 1 - \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{xy}} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

Nesta escala, um valor de 0 indicaria um material perfeitamente isotrópico, enquanto valores próximos a 1 indicam anisotropia severa. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. – Grau de Anisotropia (GA) e tensões de ruptura para os materiais virgens e reciclados.

Material	Condição	Tensão XY (MPa)	Tensão Z (MPa)	Fator de Anisotropia (GA)	Variação com a Reciclagem
PLA	Virgem	44,63	15,72	0,6478	-
PLA	Reciclado	38,8	9,79	0,7476	Aumentou (+15%)
PETG	Virgem	33,72	4,87	0,8557	-
PETG	Reciclado	41,56	13,77	0,6687	Diminuiu (-22%)

Fonte: Autor

A análise do fator de anisotropia revelou efeitos opostos do processo de reciclagem para cada polímero. No caso do PLA, foi observado um agravamento da anisotropia: o material virgem apresentou um índice de 0,6478, enquanto o reciclado elevou este índice para 0,7476. Esse aumento significa que a degradação termomecânica por cisão de cadeias macromoleculares reduziu de forma mais intensa a coesão interlaminar no eixo vertical do que a resistência no plano horizontal. Conforme a literatura, Regazzi *et al.* (2016) apontam que os ciclos sucessivos de extrusão reduzem o peso molecular médio do PLA, limitando a difusão térmica e o entrelaçamento molecular na interface das camadas depositadas, o que pode tornar a peça mais propensa a falhas catastróficas por delaminação prematura.

Em contrapartida, o PETG exibiu uma redução da anisotropia com o uso do material reprocessado. O PETG Virgem registrou o pior índice de previsibilidade mecânica do estudo (0,8557), indicando uma maior fragilidade na adesão entre camadas. O PETG Reciclado, contudo, mitigou esse cenário ao reduzir o fator para 0,6687, se aproximando do valor de isotropia do PLA Virgem. Novamente, esse ganho na uniformidade de propriedades não permite concluir que a matriz polimérica do PETG se tornou quimicamente superior após a reciclagem, mas pode estar relacionado ao efeito da densificação física provocada pela variação dimensional do filamento. A sobre-extrusão geométrica pode ter promovido a compactação das camadas quentes sob maior pressão no bico, reduzindo defeitos internos e descontinuidades entre camadas.

Uma redução no índice de anisotropia, como a observada no PETG reciclado, implica diretamente em uma maior previsibilidade estrutural da peça. Isso significa que o componente se comporta de maneira mais uniforme e confiável, independentemente da direção dos esforços de tração ou cisalhamento aplicados, mitigando o risco de falhas imprevistas por destacamento de camadas, reduzindo a necessidade de coeficientes de segurança elevados. Inversamente, o comportamento do PLA reciclado restringe o seu uso a aplicações estáticas ou puramente horizontais, consolidando a importância de se mapear o índice de anisotropia para validar a substituição de polímeros virgens por insumos sustentáveis na indústria.

5.5. Limitações do Estudo

Com o objetivo de conferir transparência científica à pesquisa, devem ser pontuadas as limitações inerentes à prática experimental adotada. A principal delas se refere à procedência dos insumos: devido à escassez comercial de filamentos reprocessados no mercado nacional, os materiais virgens e reciclados foram adquiridos de fabricantes distintos. Consequentemente, a variação de propriedades mecânicas observada, especialmente o ganho de resistência do PETG reciclado, não pode ser atribuída isoladamente ao ciclo de reciclagem, visto que engloba diferenças de formulação industrial, presença de aditivos e tolerâncias dimensionais do diâmetro do filamento de cada marca. Além disso, o tamanho amostral limitado a triplicatas por grupo experimental restringe o refinamento estatístico, embora atenda aos requisitos iniciais da norma ASTM D638.

5.6. Análise Estatística

Para determinar a significância estatística das variações observadas nas propriedades mecânicas, utilizou-se a Análise de Variância (ANOVA) de três fatores. Este procedimento estatístico computacional foi empregado para avaliar como as variáveis independentes, Material (PLA ou PETG), Estado (Virgem ou Reciclado) e Condição de Impressão (Horizontal 50%, Horizontal 100% ou Vertical), influenciam isoladamente e de forma conjunta a resistência à tração e a rigidez das amostras. A técnica permite, portanto,

diferenciar variações inerentes ao processo de manufatura de mudanças causadas pelo histórico térmico ou pela geometria das peças.

Matematicamente, o cálculo da ANOVA baseia-se na decomposição da variabilidade total dos resultados em parcelas menores, permitindo isolar a contribuição de cada fator para as diferenças observadas. Esta relação é expressa pela estatística F, calculada pela divisão da variância entre os grupos pela variância interna dos grupos: valores de F elevados indicam que as diferenças entre os grupos são maiores do que a variação natural dos dados, sugerindo influência do fator analisado.

A partir da estatística F, determina-se o valor p. O valor p é obtido através da função de distribuição de probabilidade da estatística F, indicando quão compatíveis os resultados experimentais são com a hipótese de que não existem diferenças reais entre os grupos analisados, ou seja, que as diferenças observadas ocorreram apenas por acaso. Quanto menor o valor p, menor a compatibilidade dos resultados com essa hipótese. Assim, se o valor de p for inferior ao nível de significância adotado, $\alpha = 0,05$, correspondente a um intervalo de confiança de 95%, rejeita-se a hipótese nula de igualdade entre as médias, indicando que o fator testado exerce influência estatisticamente significativa sobre a propriedade medida.

Além do efeito isolado de cada variável, a ANOVA avalia suas interações conjuntas, como, por exemplo, se o impacto da reciclagem no PETG se comporta de maneira distinta do observado no PLA em função da orientação de impressão. Dessa forma, é possível identificar quando as diferenças observadas são causadas pelos fatores estudados e quando são apenas resultado da variabilidade normal dos ensaios. Os resultados dessa análise para a Tensão Máxima de Ruptura, representativa da resistência mecânica em tração dos materiais, são apresentados na Tabela 5.6 e na Figura 5.3.

Tabela 5.6. – ANOVA para Tensão Máxima de Ruptura

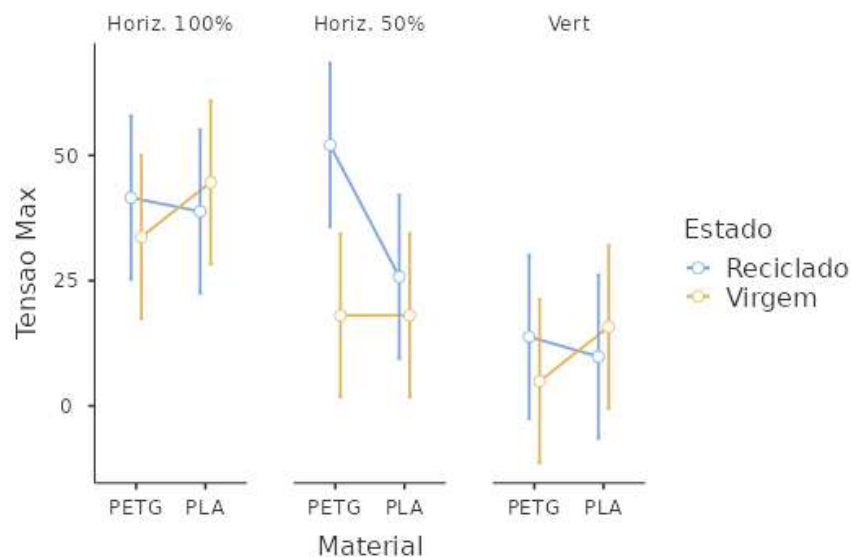
ANOVA - Tensao max

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Material	31.9	1	31.9	0.170	.684
Estado	544.5	1	544.5	2.900	.102
Condição	4988.8	2	2494.4	13.284	< .001
Material * Estado	751.5	1	751.5	4.002	.057
Material * Condição	574.0	2	287.0	1.528	.237
Estado * Condição	770.1	2	385.0	2.051	.151
Material * Estado * Condição	73.6	2	36.8	0.196	.823
Resíduos	4506.6	24	187.8		

Fonte: Autor

Figura 5.3.– Médias marginais estimadas da Tensão Máxima de Ruptura

Material * Estado * Condição



Fonte: Autor

A análise de variância para a Tensão Máxima indica que a Condição de Impressão é o único fator com efeito estatisticamente significativo sobre a resistência do material ($F = 13,284$; $p < 0,001$), evidenciando que a orientação de impressão e a densidade de preenchimento exercem influência relevante no desempenho mecânico em tração. Os demais fatores e interações não apresentaram significância estatística ao nível de 5% ($p > 0,05$), embora a interação entre Material e Estado tenha apresentado um valor de p próximo ao limiar de significância ($p = 0,057$), sugerindo uma possível tendência de interação que não pode ser confirmada estatisticamente com os dados disponíveis neste estudo.

Na sequência, a análise foi estendida ao Módulo de Young, de forma a avaliar o efeito dos fatores estudados sobre a rigidez elástica dos materiais. Os resultados são apresentados na Tabela 5.7 e na Figura 5.4.

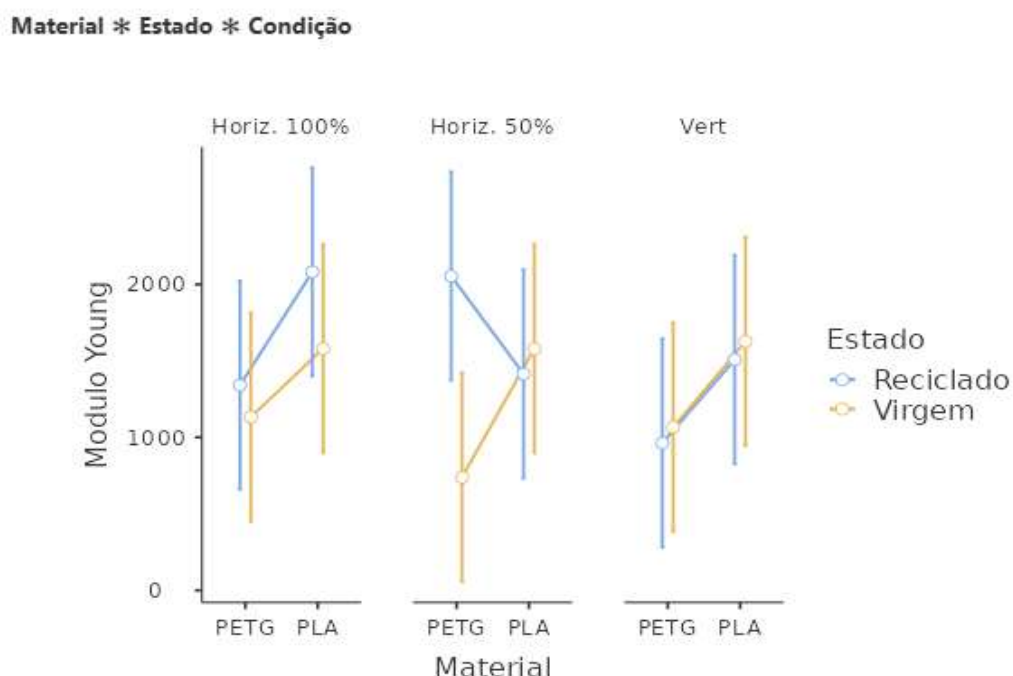
Tabela 5.7. – ANOVA para Módulo de Young

ANOVA - Modulo Young

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Material	1.56e+6	1	1.56e+6	4.748	.039
Estado	670734	1	670734	2.045	.166
Condição	360594	2	180297	0.550	.584
Material * Estado	362300	1	362300	1.105	.304
Material * Condição	448811	2	224405	0.684	.514
Estado * Condição	738033	2	369017	1.125	.341
Material * Estado * Condição	1.35e+6	2	672805	2.052	.150
Resíduos	7.87e+6	24	327956		

Fonte: Autor

Figura 5.4.— Médias marginais estimadas do Módulo de Young



Fonte: Autor

Em relação ao Módulo de Young, a ANOVA indica que o Material é o único fator com efeito estatisticamente significativo ($F = 4,748$; $p = 0,039$), evidenciando diferenças intrínsecas de rigidez entre PLA e PETG.

O fator Estado (Virgem ou Reciclado) não apresentou significância estatística ($p = 0,166$), sugerindo que não há evidência estatística de efeito do processo de reciclagem mecânica sobre a rigidez elástica dos materiais nas condições avaliadas. De forma semelhante, a Condição de Impressão (Horizontal 50%, Horizontal 100% e Vertical) também não apresentou efeito significativo sobre o Módulo de Young ($p = 0,584$), indicando que, diferentemente do comportamento observado na resistência à tração, não se observa efeito estatisticamente significativo dos parâmetros de fabricação avaliados sobre a rigidez inicial do material.

6. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi comparar o comportamento mecânico de polímeros obtidos via reciclagem em relação a seus equivalentes virgens na aplicação em manufatura aditiva. Os resultados experimentais obtidos expandem o entendimento sobre a viabilidade técnica de fatiamento e deposição de filamentos reciclados comerciais, demonstrando que é possível utilizar perfis de impressão e códigos numéricos padronizados (GCODE) sem a necessidade de alterações severas ou complexas nos parâmetros térmicos e de velocidade. Essa constatação inicial valida a processabilidade macroscópica desses insumos reprocessados, abrindo caminhos para a sua introdução direta em fluxos de trabalho já estabelecidos.

Quanto ao comportamento estrutural do PLA, as análises mecânicas seguiram a tendência prevista na literatura para polímeros reprocessados. O material reciclado apresentou uma redução de 13,0% na resistência à tração horizontal e uma queda expressiva de 37,7% na resistência vertical. A utilização da análise gravimétrica do filamento auxiliou o diagnóstico ao demonstrar que a densidade linear do PLA reciclado e do virgem é estatisticamente equivalente, com uma variação menor do que 1%. Esse dado foi fundamental para descartar a hipótese de falhas de deposição, sub-extrusão ou falta de material. Os resultados experimentais sugerem que a redução de desempenho está associada à degradação das cadeias poliméricas induzida pelo histórico térmico do reprocessamento, o que limita a aplicação de componentes em PLA reciclado a estruturas de baixa solicitação mecânica, especialmente aquelas sujeitas a esforços predominantemente intralaminares, com restrição ao carregamento no eixo Z.

Em contrapartida, o PETG Reciclado apresentou resultados divergentes, superando o material virgem em todas as condições avaliadas, havendo um ganho de 23,2% na orientação horizontal e de 182% na orientação vertical. Esse desempenho pode ser explicado pela maior densidade do filamento reciclado, que apresentou um aumento na densidade de 10,1% em relação ao virgem, gerando um efeito de sobre-extrusão de massa e densificação física da peça durante a impressão em malha aberta. Esse mecanismo constitui uma hipótese plausível para explicar o comportamento observado, podendo atuar no fechamento de vazios internos e na compactação das camadas, mitigando a anisotropia e as falhas de adesão interlaminar

verificadas no PETG virgem, embora essa hipótese não possa ser confirmada exclusivamente pelos ensaios realizados neste estudo. Além disso, a análise de Tensão Específica demonstrou que a redução de preenchimento para 50% penalizou a eficiência estrutural. O PETG virgem sofreu uma queda acentuada de 33,1% em seu índice de eficiência estrutural ao perder o núcleo maciço, enquanto o PETG reciclado demonstrou maior estabilidade e robustez ao apresentar uma redução mais branda de 25,7%.

A análise estatística por ANOVA reforçou parte das tendências observadas experimentalmente, evidenciando que a Condição de Impressão (Horizontal 50%, Horizontal 100% ou Vertical) foi o único fator com efeito estatisticamente significativo sobre a resistência à tração, enquanto o Tipo de Material (PLA ou PETG) foi o único fator significativo para o Módulo de Young. Por outro lado, não foram encontradas evidências estatísticas suficientes para afirmar que o Estado do Material (virgem ou reciclado), isoladamente, tenha influenciado significativamente essas propriedades nas condições avaliadas. Esses resultados indicam que o desempenho mecânico de peças produzidas por FDM é predominantemente governado pelos parâmetros de fabricação e pelas características intrínsecas do polímero, dentro das condições experimentais investigadas.

Considerando que os filamentos reprocessados possuem origens de marcas e fabricantes distintos em relação aos grupos de controle, torna-se imperativo destacar que as propriedades mecânicas exibidas pelos materiais reciclados comerciais ainda se mostram extremamente interessantes e competitivas quando comparadas às dos polímeros virgens. Mesmo diante das limitações de padronização impostas pelo mercado atual, o PLA reciclado preservou níveis de resistência perfeitamente aceitáveis para solicitações mecânicas moderadas no plano horizontal, enquanto o PETG reciclado apresentou desempenho superior ao material virgem nas condições experimentais avaliadas. Entretanto, considerando as diferenças entre fabricantes, composição e densidade dos filamentos, bem como a ausência de significância estatística para o fator Estado (virgem ou reciclado) na ANOVA, não é possível atribuir o desempenho observado exclusivamente ao processo de reciclagem mecânica, mas sim a um conjunto de fatores materiais e processuais.

Os resultados deste estudo indicam que a substituição de filamentos virgens por reciclados na manufatura aditiva pode representar uma estratégia tecnicamente viável, promissora e alinhada com os preceitos da Economia Circular e da manufatura sustentável.

Embora o projetista deva manter atenção à variabilidade comercial e às características específicas de cada lote, a utilização de termoplásticos reprocessados demonstrou potencial de mitigação do impacto ambiental gerado pelos resíduos de impressão 3D. Dessa forma, a adoção desses materiais pode reduzir custos operacionais e o consumo de matéria-prima, desde que sejam consideradas as particularidades de seleção e aplicação em função das exigências mecânicas do componente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando o aprofundamento das questões levantadas nesta pesquisa, são sugeridos os seguintes estudos:

- Realizar análises físico-químicas nos filamentos reciclados comerciais para identificar a presença de cargas minerais ou contaminantes que justifiquem a maior densidade linear encontrada no PETG.
- Estudar o efeito da calibração de fluxo (*flow rate*) compensada: imprimir o PETG reciclado reduzindo o fluxo em 10% para isolar a variável da sobre-extrusão e comparar as propriedades intrínsecas do material.
- Realizar ensaios de fadiga para determinar a vida útil das peças recicladas sob carregamento cíclico.
- Produzir o próprio filamento em laboratório a partir de resíduos com rastreabilidade conhecida (ex: garrafas PET pós-consumo ou refugo industrial), controlando rigorosamente as etapas de lavagem, secagem e o número de ciclos de extrusão. Isso permitirá isolar o efeito da degradação térmica do efeito de contaminantes externos.
- Expandir o escopo experimental para incluir filamentos reciclados de diferentes marcas comerciais. O objetivo é verificar se o fenômeno de "sobre-extrusão por densificação" observado no PETG é um padrão da indústria de reciclagem ou uma particularidade da formulação do fabricante testado.
- Conduzir ensaios de flexão para avaliar o comportamento dos materiais sob esforços combinados de tração e compressão. Este ensaio é crucial para verificar se o aumento de rigidez do PETG reciclado resultou em uma fragilização excessiva quando submetido a deformações angulares.

8. REFERÊNCIAS

ALL3DP. **PLA vs ABS vs PETG: The Differences Compared**. 2023. Disponível em: <https://all3dp.com/2/pla-vs-abs-vs-petg-differences-compared/>. Acesso em: 16 maio 2025.

ANDRADE, S. B. **Metodologia para design e fabricação de protótipos por fusão e deposição de material**. 2019. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing (ASTM F2971-13)**. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/F2971-13>. Acesso em: 16 maio 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D638-14)**. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D0638-14>. Acesso em: 16 maio 2025.

BOLELLI, S. R. **Caracterização mecânica de materiais processados por manufatura aditiva: influência dos parâmetros de impressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

FERREIRA, M. C.; NIRO, L. **Análise das propriedades mecânicas em corpos de provas obtidos por meio de impressão 3D, baseado na variação de parâmetros de impressão**. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, Edição Especial, set. 2022.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **3D Printing Market Size, Share, Growth and Analysis [2023 to 2030]**. 2024.

Disponível em:

<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/3d-printing-market-101902>. Acesso em: 16 maio 2025.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. Nova Iorque: Springer, 2009.

ISO/ASTM. **Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies (ISO/ASTM 52921:2013)**. 2013. Disponível em: <https://www.astm.org>. Acesso em: 17 maio 2025.

REGAZZI, A. *et al.* **Reversible and irreversible changes in physical and mechanical properties of biocomposites during hydrothermal aging**. Industrial Crops and Products, Amsterdam, jan. 2016.

REIS, A. C. *et al.* **Avaliação da influência dos parâmetros de impressão 3D na resistência mecânica de peças em ABS**. Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, PONTA Grossa, 2018.

ROSA, M. E. R. C.; SILVA, V. F.; SOARES, E. P. **Análise da resistência de resíduos de ácido polilático (PLA) proveniente de impressão 3D**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, 2022.

SANCHEZ, E. M. S. *et al.* **Avaliação da degradação térmica e fotooxidativa do ABS para fins de reciclagem**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos, set. 2003.

SANTANA, L. *et al.* **Thermal and mechanical properties of PLA/PETG blends via fused deposition modeling**. Materials Research, São Carlos, 2018.

SHANMUGAM, V. *et al.* **Polymer recycling in additive manufacturing:** an opportunity for the circular economy. *Materials Circular Economy*, 2021.

TAVARES, I. G. **Estudo de corpos de prova fabricados via impressão 3D em PLA.** 2023. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

WISHBOX. **Impressora 3D: História da impressão 3D.** 2023.

Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/impressora-3d-historia/>. Acesso em: 16 maio 2025.