



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de São José dos Campos  
Instituto de Ciência e Tecnologia

**JUAN ANTONIO PUMAR DE BRITO**

**RECICLAGEM DE POLIPOPRILENO PÓS-CONSUMO PARA MANUFATURA  
ADITIVA: impactos da qualidade da matéria-prima nas propriedades mecânicas e de  
superfície**

**São José dos Campos**

**2025**

**JUAN ANTONIO PUMAR DE BRITO**

**RECICLAGEM DE POLIPOPRILENO PÓS-CONSUMO PARA MANUFATURA  
ADITIVA: impactos da qualidade da matéria-prima nas propriedades mecânicas e de  
superfície.**

Trabalho de graduação apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

Orientador: Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino

**São José dos Campos**

**2025**

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2025]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Brito, Juan Antonio Pumar de      Reciclagem de polipropileno pós-consumo para manufatura aditiva: impactos da qualidade da matéria-prima nas propriedades mecânicas e de superfície / Juan Antonio Pumar de Brito. - São José dos Campos : [s.n.], 2025.  
30 f. : il.

Projeto Final de Curso (bacharelado - engenharia ambiental) -  
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2025.  
Orientador: Marcos Yutaka Shiino.

1. Economia circular. 2. Impressão tridimensional. 3. Fabricação por filamento fundido. 4. Polipropileno reciclado. 5. Propriedades mecânicas. I. Shiino, Marcos Yutaka, orient. II. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP). V. Título.

**RECICLAGEM DE POLIPOPRILENO PÓS-CONSUMO PARA MANUFATURA  
ADITIVA: impactos da qualidade da matéria-prima nas propriedades mecânicas e de  
superfície.**

Trabalho de graduação apresentado como requisito  
parcial para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual  
Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

São José dos Campos, 21 de 10 de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino (orientador)

Departamento de Engenharia Ambiental, Instituto de Ciência e Tecnologia, UNESP

---

Prof. Dr. Antonio Carlos Saraiva

Departamento de Engenharia Ambiental, Instituto de Ciência e Tecnologia, UNESP

---

Prof. Luiz Gustavo Godoy

Departamento de Engenharia Ambiental, Instituto de Ciência e Tecnologia, UNESP

**São José dos Campos**

**2025**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta jornada. Aos meus pais, ao meu irmão e aos amigos mais próximos, que estiveram ao meu lado em cada etapa, oferecendo apoio incondicional e incentivo nos momentos de desafio. Minha gratidão especial ao meu avô, seu Pepe, e à minha avó, dona Cida, por todo amor, cuidado e dedicação que sempre tiveram comigo, sendo exemplos de generosidade e perseverança.

Estendo meus agradecimentos aos colegas e professores que, de alguma forma, contribuíram para minha trajetória acadêmica, acreditando no meu esforço e compartilhando conhecimentos valiosos. De modo especial, ao meu professor orientador, Prof. Dr. Marcos Shiino, por me apresentar o tema desta pesquisa, pela orientação atenta, pela paciência e pela confiança depositada em meu trabalho, sobretudo neste momento decisivo da graduação.

À UNESP, minha sincera gratidão pelos ensinamentos acadêmicos e pessoais, pelas oportunidades de crescimento e pelo ambiente que contribuiu de maneira significativa para minha formação como profissional e como ser humano.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2023/08798-3”.

## RESUMO

BRITO, Juan Antonio Pumar. **Reciclagem de polipropileno pós-consumo para manufatura aditiva**: impactos da qualidade da matéria-prima nas propriedades mecânicas e de superfície. 2025. Trabalho de graduação (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de ciência e tecnologia, São José dos Campos, 2025.

A reintegração de resíduos plásticos em aplicações de alto valor é um pilar da economia circular; contudo, a heterogeneidade da matéria-prima pós-consumo representa uma barreira técnica significativa. Este estudo avalia o impacto da variabilidade do polipropileno pós-consumo (rPP), proveniente de embalagens alimentícias, sobre as características dos filamentos nas propriedades mecânicas de peças obtidas por Fabricação por Filamento Fundido (FFF). Filamentos de rPP foram produzidos através de um processo controlado de triagem, lavagem, trituração e extrusão, e comparados a um filamento comercial de PP virgem. Corpos de prova foram impressos em 3D e submetidos a ensaios de tração para avaliação da resistência à tração, módulo elástico, alongamento e características de fratura. Os resultados revelam um paradoxo: enquanto a resistência à tração média do rPP (26,79 MPa) mostrou-se estatisticamente equivalente à do PP virgem (26,45 MPa), o material reciclado apresentou um Módulo de Elasticidade médio 16,4% superior, indicando um aumento de rigidez do material. O resultado mais crítico, no entanto, foi a relativa falta de consistência do material reciclado; a variabilidade, medida pelo desvio padrão, foi 2,5 a 3 vezes maior tanto para a resistência quanto para a rigidez em comparação ao polímero virgem. Propõe-se que o aumento da rigidez é consequência de um maior grau de cristalinidade, induzido por ciclos térmicos e pela presença de aditivos nucleantes no resíduo. Contudo, a natureza heterogênea desses mecanismos é a causa direta da alta dispersão mecânica. Conclui-se que o principal obstáculo para a adoção do rPP em aplicações de engenharia via manufatura aditiva não é seu desempenho médio, mas sua relativa imprevisibilidade. A pesquisa evidencia que a padronização e o controle de qualidade dos fluxos de resíduos são pré-requisitos fundamentais para transformar o rPP em um insumo confiável e viabilizar seu papel na produção sustentável.

Palavras-chave: economia circular; impressão 3D; fabricação por filamento fundido; polipropileno reciclado; propriedades mecânicas; variabilidade de material.

## ***ABSTRACT***

BRITO, Juan Antonio Pumar. **Post-Consumer Polypropylene Recycling for 3D Printing:** influence of feedstock quality on filament Performance. 2025. Undergraduate thesis (Environmental Engineering Degree) – São Paulo State University (Unesp), Institute of science and technology, São José dos Campos, 2025.

*The reintegration of plastic waste into high-value applications is a pillar of the circular economy; however, the heterogeneity of post-consumer feedstock represents a significant technical barrier. This study evaluates the impact of post-consumer polypropylene (rPP) variability, sourced from food packaging, on the mechanical properties of filaments for Fused Filament Fabrication (FFF). Filaments of rPP were produced through a controlled process of sorting, washing, shredding, and extrusion, and were compared to a commercial virgin PP filament. Test specimens were 3D printed and subjected to tensile tests. The results reveal a paradox: while the average tensile strength of rPP (26.79 MPa) was statistically equivalent to that of virgin PP (26.45 MPa), the recycled material exhibited a 16.4% higher average Young's Modulus, indicating increased stiffness. The most critical finding, however, was the recycled material's lack of consistency; the variability, measured by standard deviation, was 2.5 to 3 times greater for both strength and stiffness compared to the virgin control. It is proposed that the increased stiffness is a consequence of a higher degree of crystallinity, induced by thermal cycles and the presence of nucleating additives in the waste. However, the heterogeneous nature of these mechanisms is the direct cause of the high mechanical dispersion. It is concluded that the main obstacle to the adoption of rPP in engineering applications via additive manufacturing is not its average performance, but its unpredictability. The research highlights that the standardization and quality control of waste streams are fundamental prerequisites to transform rPP into a reliable feedstock and enable its role in sustainable production.*

**Keywords:** *circular economy; 3D printing; fused filament fabrication; recycled polypropylene; mechanical properties; material variability.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - *Methodological flowchart of the complete feedstock processing procedure.*

Figura 2 - *Test specimen model for 3D printing.*

Figura 3 - *Test specimens printed with rPP: different magnification.*

Figura 4 - *Representative stress-strain curves for 3D printed specimens.*

Figura 5 - *Box plot comparison of Ultimate Tensile Strength and Young's Modulus for virgin and recycled PP specimens, highlighting the significantly larger data dispersion for the rPP.*

Figura 6 - *Failure mode of the specimens after tensile testing*

## **LISTA DE QUADROS**

QUADRO 1- *Printing parameters used for specimen manufacturing.*

QUADRO 2- *Summary of mechanical properties obtained from tensile tests*

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|            |                            |
|------------|----------------------------|
| <b>PP</b>  | Polipropileno              |
| <b>rPP</b> | Polipropileno reciclado    |
| <b>FFF</b> | Fused Filament Fabrication |
| <b>3D</b>  | 3 “Três” Dimensões         |
| <b>AM</b>  | Additive Manufacturing     |

## SUMÁRIO

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                        | <b>6</b>  |
| <b>2 ARTIGO SUBMETIDO E/OU APROVADOS.....</b>   | <b>11</b> |
| <b>3 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....</b>              | <b>26</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                         | <b>28</b> |
| <b>ANEXO A - Comprovante de submissão .....</b> | <b>32</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A trajetória do desenvolvimento humano está intrinsecamente ligada à sua capacidade de dominar e transformar materiais. Desde a Idade da Pedra até a Revolução Industrial, cada avanço tecnológico significativo foi sustentado pela descoberta ou aprimoramento de um novo material, que redefiniu os limites da inovação em setores como transporte, saúde, comunicação e habitação. No século XX, o advento dos polímeros sintéticos inaugurou uma nova era material, marcada por uma velocidade de transformação sem precedentes (Birkner et al., 2019).

Impulsionados por uma combinação única de versatilidade, baixo custo, leveza e durabilidade, os plásticos rapidamente se difundiram por todos os setores da economia. A produção global, que em 1950 era de modestos 1,7 milhão de toneladas anuais, chegou ao valor de 390 milhões de toneladas em 2021, consolidando os polímeros como a matéria-prima base da sociedade de consumo moderna (Geyer; Jambeck; Law, 2017). Essa onipresença, no entanto, deu origem a um paradoxo central: as mesmas propriedades que tornaram os plásticos tão desejáveis — em especial sua alta durabilidade e resistência à degradação — são a causa de um dos maiores desafios ambientais da atualidade (Ragaert; Delva; Van Geem, 2017; Mwanza; Mbohwa, 2017).

O modelo de produção e consumo que predominou ao longo do século XX, conhecido como economia linear, baseia-se em um fluxo de "extrair, produzir, usar e descartar". Este modelo, intensivo no consumo de recursos naturais finitos, como o petróleo (matéria-prima majoritária dos plásticos), resultou em uma geração exponencial de resíduos. Um estudo seminal estima que, de todo o plástico já produzido, apenas uma fração mínima de 9% foi efetivamente reciclada (Geyer; Jambeck; Law, 2017). O restante, cerca de 79%, acumulou-se em aterros sanitários ou foi descartado de forma inadequada no meio ambiente, com o restante sendo incinerado. Este legado de poluição plástica evidencia a insustentabilidade do modelo linear e impõe à engenharia a responsabilidade de desenvolver soluções para mitigar seus impactos e promover uma transição para modelos mais sustentáveis.

A gestão inadequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma das faces mais visíveis da crise ambiental contemporânea. A deposição de resíduos em aterros sanitários, embora seja uma solução de engenharia controlada para o descarte, apresenta limitações significativas, como a impermeabilização de vastas áreas de solo, a geração de chorume (um lixiviado de alta carga poluidora) e a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o metano, resultante da decomposição anaeróbia da matéria orgânica (Abubakar et al., 2022).

Neste contexto, os resíduos plásticos representam um desafio particular. Devido à sua baixa densidade e alta durabilidade, eles ocupam um volume desproporcional nos aterros, reduzindo drasticamente sua vida útil. No Brasil, o cenário é particularmente preocupante. Uma grande parcela desses resíduos é composta por embalagens de uso único, que possuem um ciclo de vida extremamente curto, servindo ao seu propósito por dias ou semanas, mas persistindo no ambiente por séculos (Aurpa et al., 2022; Pincelli et al., 2021; Wojnowska-Baryła et al., 2022).

Com o objetivo de endereçar essa problemática, foi instituída no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), através da Lei nº 12.305/2010. A PNRS representa um marco regulatório ao estabelecer princípios e diretrizes para a gestão integrada de resíduos, com destaque para a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e o poder público. Um dos pilares da PNRS é a hierarquia no gerenciamento de resíduos, que estabelece a seguinte ordem de prioridade: não

geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos e, por último, a disposição final ambientalmente adequada (Meireles et al., 2022; Neto, 2011).

Apesar dos avanços legais, a implementação efetiva da PNRS ainda enfrenta enormes desafios estruturais. Como resultado, uma fração significativa dos plásticos recicláveis ainda é destinada a aterros ou, em cenários piores, a lixões a céu aberto, que representam um grave risco à saúde pública e ao meio ambiente pela contaminação do solo, da água e do ar. Este cenário de gestão deficiente não apenas desperdiça recursos valiosos, mas também impulsiona a busca por novos paradigmas de produção e consumo que possam romper com o ciclo vicioso do descarte (Nascimento et al., 2015).

Em resposta à insustentabilidade do modelo linear, surge o conceito de economia circular. Diferentemente do fluxo unidirecional de "extrair-produzir-descartar", a economia circular propõe um modelo industrial regenerativo e restaurador, no qual os materiais são mantidos em ciclos de alto valor pelo maior tempo possível. O objetivo fundamental é dissociar o crescimento econômico do consumo de recursos finitos, eliminando o conceito de "lixo" ao enxergar os resíduos como matérias-primas secundárias que podem ser reinseridas na cadeia produtiva (Shiferaw; Gebremedhen, 2021).

A reciclagem é uma das estratégias centrais para viabilizar a circularidade dos materiais. No entanto, para que o ciclo seja verdadeiramente sustentável, é crucial diferenciar os conceitos de upcycling e downcycling. O upcycling ocorre quando o material reciclado mantém ou até aumenta algumas de suas propriedades mais importantes, sendo utilizado em aplicações de igual ou maior exigência técnica que a original. Por outro lado, o downcycling, prática mais comum na reciclagem de plásticos, acontece quando o material perde propriedades a cada ciclo de reprocessamento, sendo destinado a aplicações de menor valor agregado até se tornar um resíduo final. A superação do downcycling é um dos principais desafios da engenharia para a consolidação de uma economia circular eficaz para os polímeros (Ragaert; Delva; Van Geem, 2017).

Dentro do universo dos polímeros, o polipropileno (PP) emerge como um estudo de caso emblemático dos desafios e oportunidades da reciclagem. Sendo um dos plásticos mais consumidos no mundo, com vasta aplicação em embalagens, componentes automóveis e bens de consumo, o PP é um componente volumoso e persistente nos resíduos sólidos urbanos (Abdurakhimov; Omonov, 2025).

Apesar de ser tecnicamente reciclável, a sua reinserção qualificada na cadeia produtiva é dificultada por dois fatores técnicos principais. O primeiro é a degradação termomecânica: durante os ciclos de fusão e extrusão, as longas cadeias moleculares do PP sofrem cisão, o que resulta na perda de propriedades mecânicas importantes, como a tenacidade e a resistência ao impacto (Gijnsman; Fiorio, 2023; Saikrishnan et al., 2020). O segundo fator, e talvez o mais complexo, é a heterogeneidade da matéria-prima pós-consumo. Os fluxos de resíduos de PP são compostos por uma mistura de produtos com diferentes cores, aditivos, cargas e históricos de uso, o que resulta num material reciclado com propriedades inconsistentes e imprevisíveis (Paiva et al., 2022; Kuhn et al., 2025). Estes desafios frequentemente resultam no downcycling do PP, tornando-o um candidato ideal para a investigação de novas rotas de valorização que possam quebrar este ciclo.

Em paralelo aos desafios da gestão de resíduos, a manufatura aditiva (MA), ou impressão 3D, consolidou-se como uma tecnologia disruptiva alinhada aos princípios da Indústria 4.0. Ao construir objetos camada por camada a partir de um modelo digital, a MA permite a fabricação de peças complexas e personalizadas com alta eficiência de material (Malik et al., 2022).

O potencial da MA para a economia circular é imenso, pois ela viabiliza a transformação de resíduos plásticos, antes considerados de baixo valor, em produtos de alto valor agregado de forma descentralizada (Shiferaw; Gebremedhen, 2021; Ibrahim et al., 2024). Contudo, a impressão com PP virgem já é desafiadora, devido à sua alta contração térmica, que causa empenamento (warping), e à sua baixa energia superficial, que prejudica a adesão entre camadas. Estes problemas são agravados ao se utilizar PP reciclado (rPP), cuja inconsistência na composição e nas propriedades reológicas compromete a qualidade do filamento e, consequentemente, o desempenho da peça final (Brooks; Dunne, 2019; Iunolainen, 2017; Vidakis et al., 2021).

A viabilização do polipropileno reciclado (rPP) na manufatura aditiva representa uma oportunidade única para alinhar a gestão de resíduos com a inovação tecnológica. No entanto, para que o rPP deixe de ser um material de baixo valor e se torne um insumo de engenharia confiável, é crucial entender e quantificar o impacto da variabilidade da matéria-prima pós-consumo nas propriedades do produto final. Esta pesquisa justifica-se pela necessidade de preencher essa lacuna, fornecendo dados quantitativos sobre a consistência e a fiabilidade do rPP processado para impressão 3D.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto da matéria-prima de polipropileno pós-consumo nas propriedades mecânicas de filamentos reciclados e de corpos de prova manufaturados por impressão 3D.

Para atingir este propósito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a coleta, separação e o processamento de resíduos de PP pós-consumo através de etapas de moagem, lavagem e secagem.
- Produzir filamentos de rPP por meio de extrusão de rosca única.
- Manufaturar corpos de prova de rPP e de PP virgem por meio de impressão 3D (FFF) sob os mesmos parâmetros de fabricação.
- Realizar ensaios de tração para determinar e comparar as propriedades mecânicas (Módulo de Elasticidade e Resistência à Tração) dos dois materiais.
- Analisar e discutir os resultados, com foco na comparação do desempenho médio e, principalmente, na variabilidade estatística das propriedades.

## 2 ARTIGO SUBMETIDO E/OU APROVADOS

# Post-Consumer Polypropylene Recycling for 3D Printing: Influence of Feedstock Quality on Filament Performance

Juan Antonio Pumar de Brito<sup>a</sup>, Marcos Yutaka Shiino<sup>b\*</sup>

<sup>b</sup>*Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, Departamento de Engenharia Ambiental*

<sup>b\*</sup>[marcos.shiino@ict.unesp.br](mailto:marcos.shiino@ict.unesp.br)

### Abstract

The reintegration of plastic waste into high-value applications is a pillar of the circular economy; however, the heterogeneity of post-consumer feedstock represents a significant technical barrier. This study evaluates the impact of post-consumer polypropylene (rPP) variability, sourced from food packaging, on the mechanical properties of filaments for Fused Filament Fabrication (FFF). Filaments of rPP were produced through a controlled process and were compared to a commercial virgin PP filament. Test specimens were 3D printed and subjected to tensile tests. The results reveal a paradox: while the average tensile strength of rPP (26.79 MPa) was statistically equivalent to that of virgin PP (26.45 MPa), the recycled material exhibited a 16.4% higher average Young's Modulus, indicating increased stiffness which is a consequence of a higher degree of crystallinity. It is concluded that the main obstacle to the adoption of rPP in engineering applications via additive manufacturing is not its average performance, but its unpredictability. The research highlights that the standardization and quality control of waste streams are fundamental prerequisites to transform rPP into a reliable feedstock and enable its role in sustainable production.

**Keywords:** circular economy, 3D printing, fused filament fabrication, recycled polypropylene, mechanical properties, material variability.

## 1. Introduction

The production and consumption of polymers have grown exponentially since the mid-20th century, driven by their versatile properties and low production cost [6]. It is estimated that more than 390 million tons of plastics are produced annually worldwide, yet only a limited fraction re-enters the production cycle through recycling processes [17]. This scenario highlights the paradox of polymers: while they are essential for packaging, transportation, construction, and healthcare sectors, they also represent one of the greatest environmental challenges of our time due to their persistence in the environment and the low recycling rate [22].

Among the various polymers consumed globally, polypropylene (PP) stands out. It accounts for approximately 20–30% of the total plastic production and is widely used in rigid packaging, films, fibers, automotive components, and household products. Its popularity derives from advantageous properties such as low density, high chemical resistance, and thermal stability. However, its recycling still faces significant technical challenges, including thermo-mechanical degradation after multiple processing cycles [7, 18] and the heterogeneity of post-consumer feedstock, often composed of different colors, additives, and usage histories [12, 19].

The increasing attention given to additive manufacturing (AM), also known as 3D printing, provides a promising route for adding value to plastic waste [9, 10]. This technology enables the transformation of recycled polymers into filaments for fused deposition modeling (FDM), allowing the production of customized parts, rapid prototyping, and even small-scale manufacturing [15]. However, polypropylene is considered challenging for 3D printing due to issues such as shrinkage, poor interlayer adhesion, and warpage during cooling. These difficulties are further exacerbated when using recycled PP (rPP), whose variability in feedstock quality can compromise dimensional stability, mechanical performance, and, crucially, surface properties of the filaments [4, 8].

Recent studies have attempted to explore the potential and limitations of rPP in additive manufacturing. Research shows that repeated recycling reduces the viscosity and tensile properties of the material and intensifies thermal oxidation [20]. Other investigations demonstrated that contamination and inadequate cleaning directly affect the mechanical performance of recycled filaments [16]. Conversely, some works have shown that, under controlled processing and with compatibilization strategies [13], recycled polymer blends can achieve competitive performance in 3D printing applications [4, 5].

Despite these advances, a relevant gap remains in the literature: few studies systematically analyze the correlation between post-consumer rPP feedstock quality (considering variables such as color, brand, and usage history) and the final properties of the produced filament—especially surface characteristics, which directly govern interlayer adhesion and, consequently, are a primary determinant of the final mechanical

integrity of printed parts. Understanding this relationship is essential to enable the large-scale application of recycled PP in additive manufacturing, contributing to circular economy goals and reducing reliance on virgin polymers [7, 10, 11].

In this context, the present study aims to investigate the impact of post-consumer polypropylene feedstock quality on the mechanical [1] and surface properties [3] of recycled filaments for additive manufacturing. To achieve this, an experimental procedure involving collection, manual sorting, shredding, washing, extrusion, and 3D printing of test specimens from rPP was carried out. This research directly addresses this gap by quantifying how feedstock variability translates into mechanical inconsistency, aiming to establish the baseline criteria for determining the reliability of rPP as an engineering-grade feedstock for additive manufacturing.

## **2. Materials and Methods**

This section details the procedures for the preparation of post-consumer polypropylene, the production of recycled filament, the additive manufacturing of test specimens, and the subsequent mechanical characterization.

### **2.1 Materials**

Two distinct materials were used in this study:

**Post-Consumer Recycled Polypropylene (rPP):** The feedstock was sourced from discarded post-consumer yogurt pots. To minimize the variability inherent in post-consumer waste streams, the collected material was manually sorted by brand and color, and a single batch was selected for the entirety of the experimental procedure.

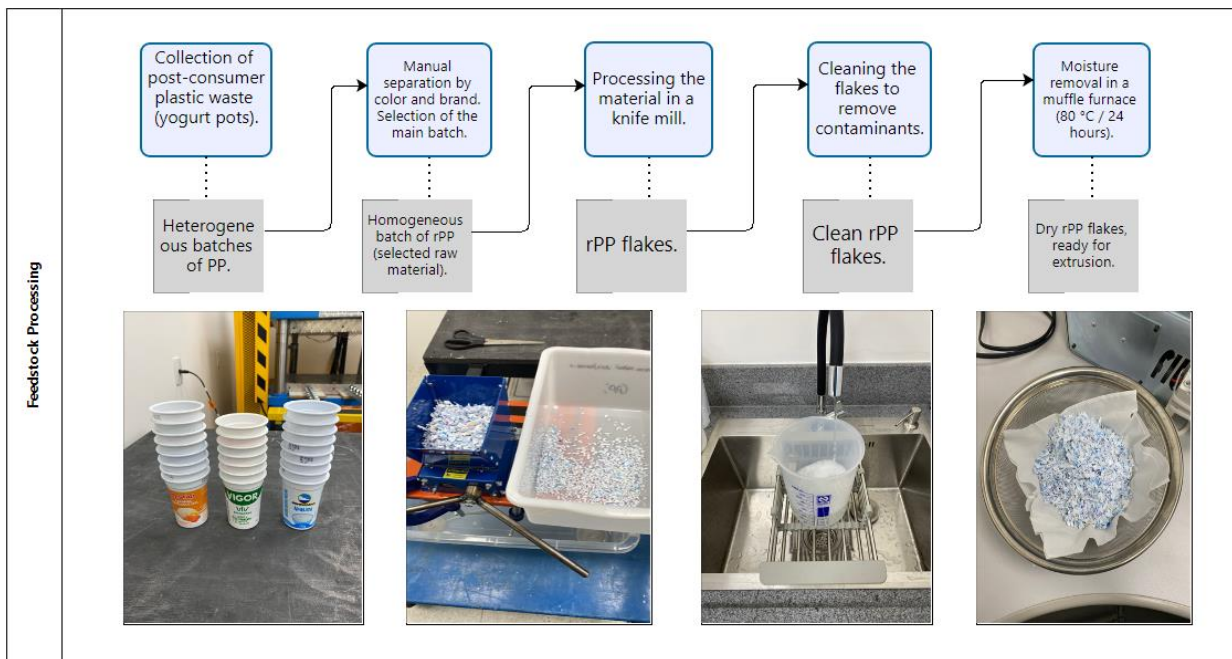
**Virgin Polypropylene (PP):** A commercial filament, transparent in color, manufactured by Printalot, was used as a control material for comparative analysis. According to its technical data sheet (TDS), this filament is produced from a food-grade resin with a density of  $0.91 \text{ g/cm}^3$ .

### **2.2 Feedstock Processing and Filament Production**

The rPP feedstock was processed through a multi-stage protocol to ensure purity and prepare it for extrusion:

1. **Shredding and Washing:** The sorted yogurt pots were first shredded into uniform flakes using a knife mill. Subsequently, the flakes underwent a rigorous washing process following the guidelines of the ASTM D6288-23 standard (*Standard Practice for Separation and Washing of Recycled Plastics*).
2. **Drying:** To prevent hydrolytic degradation during melt processing, the washed flakes were dried in muffle furnace at 80 °C for 24 hours with vacuum pump activated in regular intervals of 2 hours.
3. **Extrusion:** The dried rPP flakes were extruded into a filament using a Filmaq 3D CV single-screw extruder (Filmaq 3D, Curitiba, Brazil). The temperature profile along the barrel was set between 245 °C to ensure proper melting and flow. The produced filament's diameter was continuously monitored to maintain the target of 1.75 mm  $\pm$  0.05 mm, following the principles of ISO/ASTM 52910:2018(E) and ASTM F3529-21.

All those processes are shown in Fig.1.



**Figure 1. Methodological flowchart of the complete feedstock processing procedure.**

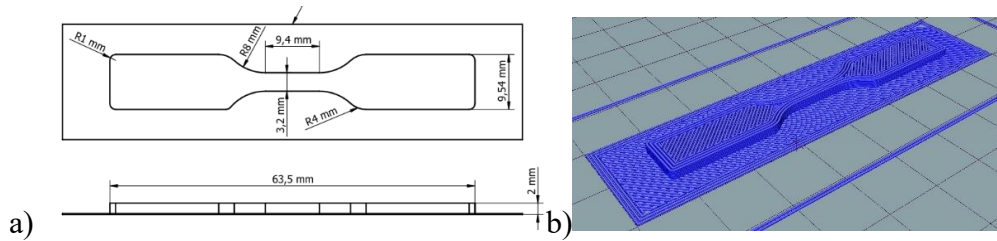
### 2.3 Specimen Manufacturing via FFF

A total of twelve test specimens—six from the rPP filament and six from the virgin PP filament—were manufactured on a Sethi3D S3X Fused Filament Fabrication (FFF) printer (Sethi3D, Valinhos, Brazil). The printing parameters, detailed in Table 1, were kept identical for both materials. The specimen's model was sliced in the software Repetier-Host V2.3.2 with Slic3r which included the aforementioned parameters.

**Table 1. Printing parameters used for specimen manufacturing.**

| Parameter          | Value            |
|--------------------|------------------|
| Nozzle Temperature | 245 °C           |
| Bed Temperature    | 78 °C            |
| Layer Height       | 0.20 mm          |
| Perimeters         | 2                |
| Infill             | 100% (+45°/-45°) |

The specimen geometry followed the Type I standard as specified in ASTM D638-22, with nominal dimensions including a total length of 63.5 mm and a width of the narrow section of 3.2 mm, as seen in Fig. 2. The total thickness (height) of all specimens was set to 2.0 mm.



**Figure 2. Test specimen model for 3D printing: a-) Specimen geometry; b-) 3D model**

## 2.4 Mechanical Characterization and Data Analysis

### 2.4.1. Tensile Testing

Tensile tests were performed on a Shimadzu Autograph AGS-X series universal testing machine (Kyoto, Japan) equipped with a 50 kN load cell. The tests were conducted at a constant crosshead speed of 5 mm/min, in strict accordance with the ASTM D638-22 standard.

### 2.4.2. Data Analysis

The engineering stress ( $\sigma$ ) and engineering strain ( $\epsilon$ ) were calculated from the raw force ( $F$ ) and displacement ( $\Delta L$ ) data using Eqs. (1) and (2), respectively.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

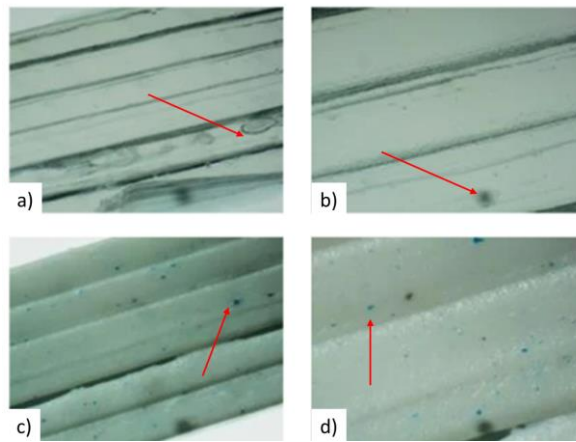
Where  $A_0$  is the initial cross-sectional area of the specimen's narrow section and  $L_0$  is the initial gage length. The tensile strength was determined as the maximum stress value achieved before fracture. The Young's Modulus (E) was calculated according to Eq. (3), which represents the slope of the stress-strain curve in the elastic region.

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad (3)$$

where  $\Delta \sigma$  is the change in stress and  $\Delta \epsilon$  is the change in strain within the linear elastic region.

#### 2.4.2. Morphological Analysis

The fracture surfaces of the specimens resulting from the tensile tests, as well as the surfaces of the filaments, was analyzed by microscopy techniques to identify possible manufacturing defects (e.g., voids, poor layer adhesion) or feedstock-related issues (e.g., contaminant particles, pigment agglomerates), as shown in Fig. 3 detailed by arrows.



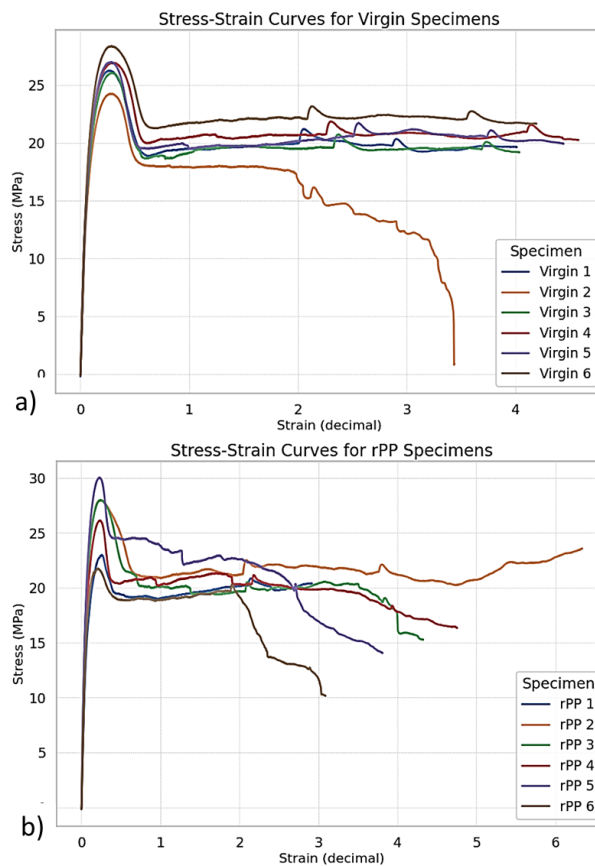
**Figure 3. Test specimens printed with rPP: different magnification.**

### 3. Results and discussion

The mechanical performance of the 3D printed specimens was evaluated through tensile tests to compare the properties of post-consumer recycled polypropylene (rPP) with the virgin PP control. The analysis focused on the tensile behavior, the resulting mechanical properties, and the failure modes observed.

#### 3.1. Tensile Behavior

The representative stress-strain curves for all tested specimens are presented in Figure 4. A clear distinction in behavior between the two material groups can be observed. The curves for the virgin PP (Fig. 4a) are tightly clustered, indicating high consistency and predictable mechanical response, with all specimens following a similar path of elastic and plastic deformation until fracture. In contrast, the curves for the rPP (Fig. 4b) exhibit significant dispersion. While the initial slope (indicating stiffness) is generally steeper for the rPP, the ultimate tensile strength and the strain at break vary considerably among the specimens, highlighting the material's inconsistent and unpredictable nature.



**Figure 4. Representative stress-strain curves for 3D printed specimens: (a) Virgin PP; (b) Recycled PP (rPP).**

### 3.2. Mechanical Properties

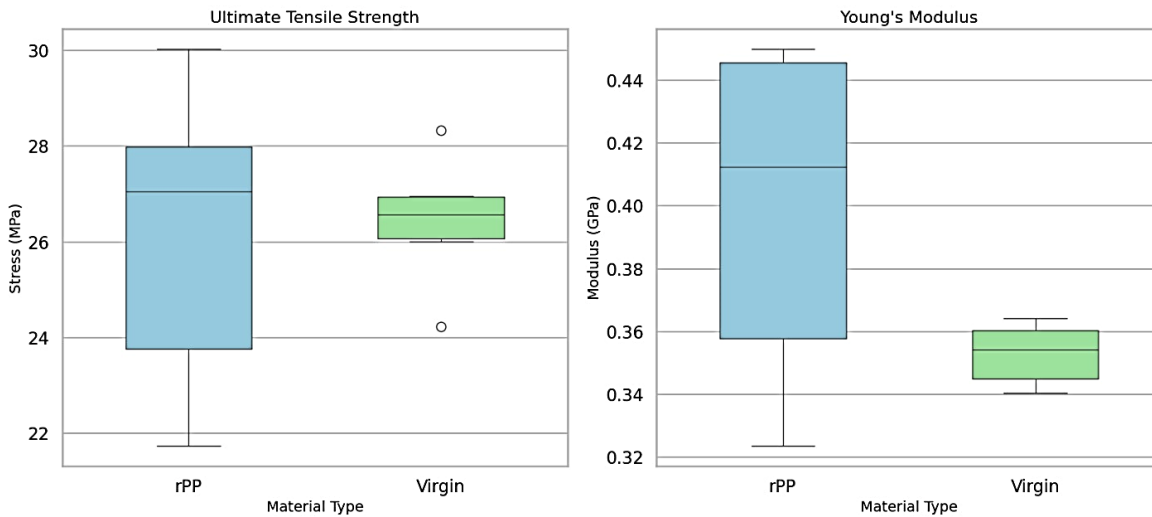
The key mechanical properties—Young's Modulus and Ultimate Tensile Strength (UTS)—were calculated from the stress-strain curves, and the statistical summary is presented in Table 2. The data reveals a counter-intuitive paradox: the average UTS of the rPP (26.79 MPa) is statistically equivalent to that of the virgin PP (26.45 MPa). However, the rPP specimens exhibited a 16.4% higher average Young's Modulus, indicating a significantly stiffer material.

The most critical finding, however, lies in the variability. The standard deviation for both UTS and Young's Modulus was approximately 2.5 to 3 times greater for the rPP compared to the virgin PP. This high dispersion confirms the unpredictable nature suggested by the stress-strain curves.

**Table 2. Summary of mechanical properties obtained from tensile tests.**

| <b>Material</b>          | <b>Young's Modulus<br/>(GPa)</b> | <b>Ultimate Tensile Strength<br/>(MPa)</b> |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Virgin PP</b>         | 0.385±0.016                      | 26.45±1.12                                 |
| <b>Recycled PP (rPP)</b> | 0.448±0.047                      | 26.79±2.78                                 |

To better visualize this variability, Figure 5. presents the data from Table 2 in a box plot format. The plot illustrates that while the median values for UTS are similar, the interquartile range and the overall data spread for the rPP are substantially larger, confirming its lower reliability as an engineering material.



**Figure 5. Box plot comparison of Ultimate Tensile Strength and Young's Modulus for virgin and recycled PP specimens, highlighting the significantly larger data dispersion for the rPP.**

### 3.3. Morphological and Failure Analysis

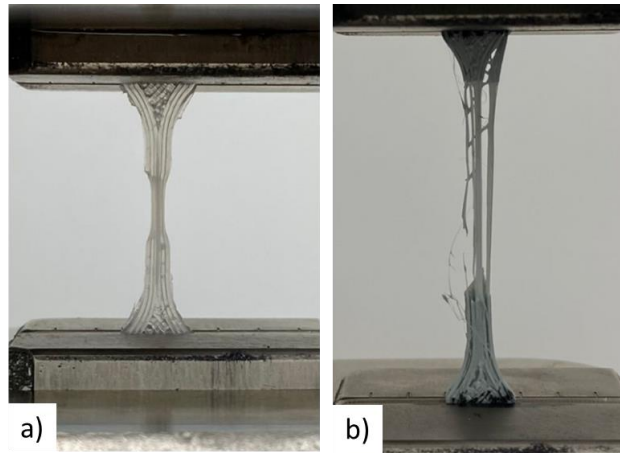
Analysis of the fractured specimens provided insight into the mechanisms behind the mechanical results. As shown in Figure 6, the virgin PP specimens failed consistently through ductile fracture after significant plastic deformation. The rPP specimens, however, displayed mixed failure modes. Some specimens exhibited ductile behavior, while others, particularly those with lower UTS values, failed in a more brittle manner with little warning.

### 3.4 Fracture analysis

The analysis of the failure modes was performed through visual inspection of the specimens after the tensile test to investigate the fracture behavior of each material. It is observed that the Virgin PP specimens presented a consistent and ductile failure mode, as seen in Figure 6a. The material exhibited pronounced necking in the gage region, indicating that it underwent significant plastic strain and released a large amount of energy before the final rupture, which is characteristic of a tough material.

The Recycled PP (rPP) specimens tended towards a less pronounced ductile fracture nature, as illustrated in Figure 6b. The rupture occurred relative short time compared to virgin PP, with localized plastic deformation and less evident necking. This distinction in the failure mode is revealing; the ductile behavior of Virgin PP is often desirable in engineering applications as it provides a visual warning before catastrophic failure [14]. The tendency of rPP towards a less ductile fracture is consistent with the increase in stiffness

(Young's Modulus) observed in the tests and suggests that the degradation and microstructural changes during the material's life cycle have not only made it stiffer but have also reduced its overall toughness.



**Figure 6. Failure mode of the specimens after tensile testing: (a) Virgin PP; and (b) Recycled PP.**

#### 4. Discussion

The results obtained in this research present a complex profile for post-consumer recycled polypropylene (rPP) as a feedstock for additive manufacturing. The average ultimate tensile strength of 26.79 ( $\pm 2.78$ ) MPa is consistent with values reported in the literature for 3D printed rPP. For instance, some studies have explored the mechanical response of recycled PP over multiple cycles, reporting similar ranges of tensile strength values for the initial recycling stages [20]. The proximity of our average results to these studies suggests that the developed recycling protocol, including washing and controlled extrusion, was effective in producing a material with competitive mean performance.

However, the most significant finding of this study is the paradox between average performance and material reliability. While the tensile strength was comparable to the virgin material, the rPP exhibited a 16.4% higher Young's Modulus. This increase in stiffness can be attributed to changes in the polymer's microstructure during its life cycle. Repeated thermo-mechanical processing is known to cause chain scission in polypropylene, a form of degradation that, counter-intuitively, can lead to increased crystallinity as the shorter, more mobile polymer chains reorganize more easily into crystalline lamellae during cooling [7, 18, 21]. Furthermore, as discussed in studies on long-term thermo-oxidative degradation, these pathways can significantly alter the crystalline structure [7]. The presence of pigments and additives in the post-consumer

material, which are absent in the virgin PP, can also act as nucleating agents, further promoting crystallization and leading to a stiffer, but often more brittle, material [16].

This increased stiffness is coupled with the central challenge identified in this work: the extreme variability in mechanical properties. The 2.5 to 3-fold increase in the standard deviation for both strength and modulus is a direct quantitative measure of the material's unpredictability. This finding strongly corroborates the well-known challenges in recycling post-consumer plastic waste, where performance variability is a critical issue [12, 19]. The heterogeneity of the feedstock—stemming from different original manufacturers, additive packages, and thermal histories—persists through the recycling process and manifests as inconsistent mechanical behavior [21]. Even minor levels of residual contaminants can act as stress concentrators, leading to premature failure and contributing to the wide dispersion of results [16].

The failure mode analysis provides further insight into this behavior. The consistent ductile failure of the virgin PP, characterized by significant necking, is desirable as it indicates high toughness. The less ductile failure observed in the rPP specimens is symptomatic of materials with reduced toughness, which is a common consequence of recycling cycles that increase crystallinity at the expense of the amorphous phase's ability to absorb energy. This reduction in performance after multiple recycling loops has been extensively documented for PP and its blends [7, 18, 20].

Ultimately, the results affirm that for rPP to be a viable engineering-grade feedstock, the focus must shift from achieving a high average performance to ensuring high consistency. The literature suggests that strategies such as blending different rPP sources to homogenize the feedstock or employing compatibilization strategies could mitigate this issue [5, 11, 13]. However, as this study demonstrates, even carefully sorted and cleaned waste streams can yield a product of low reliability. Therefore, the successful integration of rPP into high-value applications like additive manufacturing is less a question of printing parameters and more a fundamental challenge of materials science, requiring robust standardization and methods to increase the quality of waste streams [12, 19]. While the present work did not include microstructural analysis, the mechanical variability strongly suggests that future research conducting a comprehensive investigation into feedstock variations [21] is essential to directly link these variations to filament surface properties [3] and internal defects, which govern the final part's integrity.

## 5. Conclusions

This work investigated the technical feasibility of utilizing post-consumer polypropylene (PP), sourced from food packaging, as a feedstock for producing filaments for additive manufacturing. The comparative analysis between specimens printed with the recycled material (rPP) and a virgin PP control has allowed for significant conclusions to be drawn regarding the potential and challenges of this circular economy-aligned valorization route.

The results demonstrated a fundamental paradox: while the average tensile strength of the rPP was found to be statistically equivalent to that of virgin PP, the recycled material exhibited a mechanical performance marked by profound inconsistency. This lack of reliability, evidenced by a variability 2.5 to 3 times greater in both mechanical strength and stiffness, constitutes the main obstacle to its application in engineering components that require predictable performance. The study also revealed that rPP is, on average, a 16.4% stiffer material, a phenomenon attributed to a likely increase in the degree of crystallinity, induced by the successive thermal cycles of its life cycle and the potential action of additives and pigments as nucleating agents.

It is concluded, therefore, that the primary challenge for the adoption of rPP in high-value additive manufacturing applications is not its average performance, which proved promising, but its unpredictability. The inherent heterogeneity of the post-consumer feedstock translates directly into a dispersion of mechanical properties that is unacceptable for functional applications. The premature failure of some samples suggests that microstructural defects, such as variations in interlayer adhesion and the presence of local heterogeneities, are the probable cause of this inconsistency, although confirmation would require future morphological analyses.

For recycled polypropylene to become a truly viable and reliable feedstock for Industry 4.0, this research highlights the critical need to develop and implement more robust systems for sorting, characterization, and standardization of plastic waste streams. Future work should focus on microstructural analysis to directly correlate defects with mechanical performance, as well as on investigating compatibilization strategies and blend development to mitigate variability and enhance the reliability of this valuable and abundant resource.

## ACKNOWLEDGMENTS

This study was financed, in part, by the São Paulo Research Foundation (FAPESP), Brazil (Process Numbers#2017/16160-8 and #2023/08798-3).

Institute of Advanced Sea Studies (IEAMAR), São Paulo State University (UNESP), São José dos Campos, SP, Brazil.

## References

1. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2022.
2. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM D7028-08: Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA T<sub>g</sub>) of Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). West Conshohocken: ASTM International, 2008.
3. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM D7334-08: Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement. West Conshohocken: ASTM International, 2008.
4. **BROOKS, H.; DUNNE, R.** *Recycled polypropylene blends as novel 3D printing materials. Additive Manufacturing*, Amsterdam, v. 25, p. 122–130, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.009>
5. **TABARY, S. A. A. B.; BRESSE, J. P.; FAYAZFAR, H. (R.).** *From Waste to Function: Compatibilized r-PET/r-HDPE Blends for Pellet Extrusion 3D Printing. Polymers*, Basel, v. 17, n. 12, p. 1638, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17121638>.
6. **GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L.** Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, Washington, v. 3, n. 7, e1700782, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
7. **GIJSMAN, P.; FIORIO, R.** Long-term thermo-oxidative degradation and stabilization of polypropylene (PP) and the implications for its recyclability. *Polymer Degradation and Stability*, Oxford, v. 214, p. 110260, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110260>.
8. **IUNOLAINEN, E.** *Suitability of recycled PP for 3D printing filament*. 2017. Disponível em: <https://www.theseus.fi/handle/10024/136082>. Acesso em: 13 out. 2025.
9. **SHIFERAW, M. Z.; GEBREMEDHEN, H. S.** *Recycled polymer for FDM 3D printing filament material: circular economy for sustainability of additive manufacturing*. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**, 2021, Cham. Proceedings [...]. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 243–261.
10. **IBRAHIM, I.; NORAZMAN, S.; AZIZ, M. A.; et al.** A systematic review on the technical performance and sustainability of 3D printing filaments using recycled plastic. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 18, p. 8247, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16188247>.

11. **JONES, H.; McCLEMENTS, J.; RAY, D.; HINDLE, C. S.; KOUTSOS, V.** Thermomechanical properties of virgin and recycled polypropylene–high-density polyethylene blends. *Polymers*, Basel, v. 15, art. 4200, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15214200>.
12. **ABDURAKHIMOV, F. F.; OMONOV, B. M.** *Sustainable approaches for polypropylene recycling: challenges and future perspectives*. In: INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY RESEARCH IN ACADEMIC SCIENCE (IMRAS), v. 7, n. 10, p. 163–166, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15098029>.
13. **KONING, C.; VAN DUIN, M.; PAGNOULLE, C.; JEROME, R.** *Strategies for compatibilization of polymer blends*. Progress in Polymer Science, v. 23, n. 4, p. 707–757, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(97\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(97)00054-3).
14. **CHATZIPANAGIOTOU, K.-R.; ANTYPAS, D.; PETRAKLI, F.; KARATZA, A.; PIKOŃ, K.; BOGACKA, M.; et al.** Life Cycle Assessment of Composites Additive Manufacturing Using Recycled Materials. *Sustainability*, Basel, v. 15, n. 17, art. 12843, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151712843>
15. **SPINA, R.; GURRADO, N.** Green Recycling for Polypropylene Components by Material Extrusion. *Polymers*, Basel, v. 16, n. 24, art. 3502, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16243502>.
16. **PAIVA, R.; VERONEZE, I. B.; WRONA, M.; et al.** The Role of Residual Contaminants and Recycling Steps on Rheological Properties of Recycled Polypropylene. *Journal of Polymers and the Environment*, New York, v. 30, p. 494-503, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02214-2>.
17. **RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K.** Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, Oxford, v. 69, p. 24-58, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.
18. **SAIKRISHNAN, S.; JUBINVILLE, D.; TZOGANAKIS, T.; MEKONNEN, T.** Thermo-mechanical degradation of polypropylene and polyethylene blends during simulated recycling. *Polymer Degradation and Stability*, Oxford, v. 181, p. 109390, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109390>.
19. **KUHN, N.; MAGER, M.; FISCHER, J.; et al.** Increasing the PP-Recyclate Quality by Enhanced Mechanical Processing of Post-Consumer Packaging Waste. *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, v. 223, art. 108494, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108494>.
20. **VIDAKIS, N.; PETOUSIS, M.; VADIS, D.; et al.** Sustainable additive manufacturing: Mechanical response of polypropylene over multiple recycling processes. *Sustainability*, Basel, v. 13, p. 159, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010159>.
21. **ZHANG, W.; et al.** Comprehensive Investigation into the Impact of Degradation of Recycled Polyethylene and Recycled Polypropylene on the Thermo-Mechanical Characteristics and Thermal Stability of Blends. *Molecules*, Basel, v. 29, n. 18, art. 4499, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29184499>.
22. **MWANZA, B. G.; MBOHWA, C.** Drivers to Sustainable Plastic Solid Waste Recycling: A Review. *Procedia Manufacturing*, v. 8, p. 649-656, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.08>.

**Declarations****Funding**

Not applicable

**Conflicts of interest/Competing interests**

Not applicable

**Availability of data and material (data transparency)**

Not applicable

**Code availability (software application or custom code)**

Not applicable

### 3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente trabalho investigou os desafios e as potencialidades do uso de polipropileno (PP) pós-consumo reciclado como matéria-prima para a manufatura aditiva, que é uma tecnologia-chave para a transição rumo a uma economia circular. Partindo do cenário alarmante da poluição plástica e da insustentabilidade do modelo econômico linear, esta pesquisa buscou avaliar se a impressão 3D poderia, de fato, representar uma rota de *upcycling* para um dos polímeros mais onipresentes e problemáticos em nossos resíduos sólidos.

Os resultados obtidos revelaram um panorama complexo e de fundamental importância para a engenharia ambiental e dos materiais. Demonstrou-se que o protocolo de reciclagem desenvolvido é capaz de produzir um filamento com desempenho mecânico médio comparável a outros estudos da área e, em certos aspectos, próximo ao do material virgem. Contudo, a principal contribuição deste estudo reside na identificação de um paradoxo crucial: enquanto o desempenho médio é viável, a variabilidade e a consequente diminuição da confiabilidade do material reciclado emergem como um dos obstáculos para sua aplicação em contextos de engenharia. A inconsistência, quantificada por um desvio padrão de duas a três vezes superior ao do PP virgem, foi diretamente associada à heterogeneidade inerente da matéria-prima pós-consumo, um legado de diferentes aditivos, históricos de uso e degradação termomecânica acumulada.

Dessa forma, este trabalho conclui que o sucesso da integração do PP reciclado em aplicações de alto valor, como a manufatura aditiva, depende menos da otimização de parâmetros de impressão e mais da superação de um desafio fundamental da ciência dos materiais: a padronização e homogeneização do fluxo de resíduos. A pesquisa evidencia que, sem custos adicionais com aditivos para mitigar a variabilidade da matéria-prima, o PP reciclado poderá ser aplicado com algumas restrições que exigem maior confiabilidade, o que confere um limiar para o *upcycling* que a economia circular visa desenvolver. A contribuição deste trabalho é, portanto, fornecer dados quantitativos que deslocam o foco da discussão da "possibilidade" para a "confiabilidade" do material.

É importante reconhecer as limitações deste estudo. A análise se concentrou nas propriedades mecânicas e não incluiu uma caracterização microestrutural aprofundada, como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) ou Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), que poderiam correlacionar diretamente a variabilidade mecânica com defeitos internos, morfologia cristalina e grau de degradação do polímero. Além disso, o fluxo de resíduos, embora controlado, representa uma amostra limitada do universo de PP pós-consumo.

Diante do exposto, sugerem-se como trabalhos futuros: 1) a investigação de estratégias de pré-processamento para homogeneização do material, como a criação de *blendas* com diferentes fontes de PP reciclado ou a incorporação de compatibilizantes e aditivos estabilizantes; 2) a realização de análises microestruturais e reológicas para estabelecer uma correlação direta entre a composição do resíduo, a microestrutura do filamento e o desempenho final da peça impressa; e 3) o desenvolvimento de protótipos funcionais para avaliar o comportamento do material em condições de uso real, transcendendo os ensaios de tração. A continuidade desta linha de pesquisa é essencial para transformar o potencial teórico da reciclagem via manufatura aditiva em uma realidade tecnológica, confiável e verdadeiramente sustentável.

## REFERÊNCIAS

ABDURAKHIMOV, F. F.; OMONOV, B. M. Sustainable approaches for polypropylene recycling: challenges and future perspectives. In: **International Multidisciplinary Research In Academic Science (IMRAS)**, v. 7, n. 10, p. 163–166, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15098029>.

ABUBAKAR, I. R.; MANIRUZZAMAN, K. M.; DANO, U. L.; ALSHIHRI, F.; ALSHAMMARI, M. S.; AHMED, S. M.; et al. Environmental sustainability impacts of solid waste management practices in the global south. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, v. 19, n. 19, p. 12717, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph191912717>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-22**: standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7028-08**: standard test method for glass transition temperature (dma tg) of composites by dynamic mechanical analysis (dma). West Conshohocken: ASTM International, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7334-08**: standard practice for surface wettability of coatings, substrates and pigments by advancing contact angle measurement. West Conshohocken: ASTM International, 2008.

AURPA, S.; HOSSAIN, S. T.; ISLAM, M. S. Effect of plastic waste on volume consumption of landfill during the **COVID-19** pandemic. **Sustainability**, v. 14, n. 23, p. 15974, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142315974>.

BIRKNER, J.; PRINT, G.; CONTACT, G.; TROMP, M.; ROELFES, G. Advanced materials. In: **Springer Proceedings In Physics**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1515/ci.2006.28.1.39a>.

BROOKS, H.; DUNNE, R. Recycled polypropylene blends as novel **3D** printing materials. **Additive Manufacturing**, Amsterdam, v. 25, p. 122–130, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.009>.

CHATZIPANAGIOTOU, K.-R.; ANTYPAS, D.; PETRAKLI, F.; KARATZA, A.; PIKON, K.; BOGACKA, M.; et al. Life cycle assessment of composites additive manufacturing using recycled materials. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 17, art. 12843, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151712843>.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, Washington, v. 3, n. 7, e1700782, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

GIJSMAN, P.; FIORIO, R. Long-term thermo-oxidative degradation and stabilization of polypropylene (PP) and the implications for its recyclability. **Polymer Degradation And Stability**, Oxford, v. 214, p. 110260, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110260>.

IBRAHIM, I.; NORAZMAN, S.; AZIZ, M. A.; et al. A systematic review on the technical performance and sustainability of 3D printing filaments using recycled plastic. **Sustainability**, Basel, v. 16, n. 18, p. 8247, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16188247>.

IUNOLAINEN, E. Suitability of recycled PP for 3D printing filament. 2017. Disponível em: <https://www.theseus.fi/handle/10024/136082>. Acesso em: 13 out. 2025.

JONES, H.; McCLEMENTS, J.; RAY, D.; HINDLE, C. S.; KOUTSOS, V. Thermomechanical properties of virgin and recycled polypropylene–high-density polyethylene blends. **Polymers**, Basel, v. 15, art. 4200, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15214200>.

KONING, C.; VAN DUIN, M.; PAGNOULLE, C.; JEROME, R. Strategies for compatibilization of polymer blends. **Progress In Polymer Science**, v. 23, n. 4, p. 707–757, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(97\)00054-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(97)00054-3).

KUHN, N.; MAGER, M.; FISCHER, J.; et al. Increasing the PP-recyclate quality by enhanced mechanical processing of post-consumer packaging waste. **Resources, Conservation And Recycling**, Amsterdam, v. 223, art. 108494, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108494>.

MALIK, A. A.; HAQ, M. I. U.; RAINA, A.; GUPTA, K. 3D printing towards implementing industry 4.0: sustainability aspects, barriers and challenges. **Industrial Robot**, v. 49, n. 4, p. 491-511, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/ir-10-2021-0247>.

MEIRELES, R. P. S.; MORALES, G. P.; PEREIRA, F. C. S.; NASCIMENTO, M. F. N.; DUARTE, J. C.; DA SILVA, D. A. R. L.; et al. Avaliação de impactos ambientais dos resíduos sólidos na Universidade do Estado do Pará, Campus V - CCNT. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 15, n. 3, p. 1336-1351, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.3.p1336-1351>.

MWANZA, B. G.; MBOHWA, C. Drivers to sustainable plastic solid waste recycling: a review. **Procedia Manufacturing**, v. 8, p. 649-656, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.08>.

NASCIMENTO, V. F.; SOBRAL, A. C.; ANDRADE, P. R.; OMETTO, J. P. H. B. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 4, p. 889-902, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4136/AMBI-AGUA.1635>.

NETO, T. L. A política nacional de resíduos sólidos: os reflexos nas cooperativas de catadores e a logística reversa. **Dialogo**, n. 19, p. 77-96, 2011. DOI: <https://doi.org/10.18316/104>.

PAIVA, R.; VERONEZE, I. B.; WRONA, M.; et al. The role of residual contaminants and recycling steps on rheological properties of recycled polypropylene. **Journal Of Polymers And The Environment**, New York, v. 30, p. 494-503, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02214-2>.

PINCELLI, I. N.; DE CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; MATIAS, M. A. S.; RUTKOWSKI, E. W. Post-consumer plastic packaging waste flow analysis for **Brazil**: the challenges moving towards a circular economy. **Waste Management**, v. 126, p. 781-790, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.005>.

RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. **Waste Management**, Oxford, v. 69, p. 24-58, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.

SAIKRISHNAN, S.; JUBINVILLE, D.; TZOGANAKIS, T.; MEKONNEN, T. Thermo-mechanical degradation of polypropylene and polyethylene blends during simulated recycling. **Polymer Degradation And Stability**, Oxford, v. 181, p. 109390, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109390>.

SHIFERAW, M. Z.; GEBREMEDHEN, H. S. Recycled polymer for **FDM 3D** printing filament material: circular economy for sustainability of additive manufacturing. In: **International Conference On Advances Of Science And Technology**, 2021, Cham. *Proceedings* [...]. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 243–261.

SPINA, R.; GURRADO, N. Green recycling for polypropylene components by material extrusion. **Polymers**, Basel, v. 16, n. 24, art. 3502, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16243502>.

TABARY, S. A. A. B.; BRESSE, J. P.; FAYAZFAR, H. (R.). From waste to function: compatibilized r-PET/r-HDPE blends for pellet extrusion **3D** printing. **Polymers**, Basel, v. 17, n. 12, p. 1638, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17121638>.

VIDAKIS, N.; PETOUSIS, M.; VADIS, D.; et al. Sustainable additive manufacturing: mechanical response of polypropylene over multiple recycling processes. **Sustainability**, Basel, v. 13, p. 159, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010159>.

WOJNOWSKA-BARYŁA, I.; BERNAT, K.; ZABOROWSKA, M. Plastic waste degradation in landfill conditions: the problem with microplastics, and their direct and indirect environmental effects. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, v. 19, n. 20, p. 13223, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192013223>.

ZHANG, W.; et al. Comprehensive investigation into the impact of degradation of recycled polyethylene and recycled polypropylene on the thermo-mechanical characteristics and thermal stability of blends. **Molecules**, Basel, v. 29, n. 18, art. 4499, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29184499>.

## ANEXO B – Comprovante de submissão

14/10/2025, 14:04

ScholarOne Manuscripts



Materials Research

[Home](#)[Author](#)[Review](#)

## Submission Confirmation

[Print](#)

Thank you for your submission

**Submitted to**

Materials Research

**Manuscript ID**

MR-2025-0684

**Title**

Post-Consumer Polypropylene Recycling for 3D Printing: Influence of Feedstock Quality on Filament Performance

**Authors**

De Brito, Juan

Shiino, Marcos

**Date Submitted**

14-Oct-2025

[Author Dashboard](#)