

Avaliação comparativa do desempenho mecânico e da sustentabilidade de polímeros para manufatura aditiva

Comparative evaluation of the mechanical performance and sustainability of polymers for additive manufacturing

Rafael Reche Tavares

Tayná Steiger Mai

Bruno Thomazi Zanette

Jocelise Jacques de Jacques

Luis Henrique Alves Cândido

Resumo: Este artigo apresenta uma avaliação comparativa do desempenho mecânico e do perfil de sustentabilidade de quatro polímeros para manufatura aditiva: dois para extrusão de filamento (PLA e ABS) e dois para fotopolimerização em cuba (resina plant-based e ABS-like). O objetivo foi analisar o balanço entre as propriedades mecânicas, que influenciam o desempenho de um produto, e os critérios de sustentabilidade, como origem da matéria-prima e reciclagem. Para atender ao objetivo, foram realizados ensaios de tração e de impacto IZOD. Os resultados indicam que a resina plant-based alcançou a maior resistência à tração, enquanto o filamento de ABS demonstrou resistência ao impacto expressivamente superior à dos demais materiais. Conclui-se que o ABS apresentou o desempenho mecânico geral mais balanceado, entretanto, a seleção do material ideal não é universal, pois depende do alinhamento entre os requisitos técnicos e os objetivos de sustentabilidade de cada projeto.

Palavras-chaves: seleção de materiais; impressão 3D; filamento; resina; design e tecnologia.

Abstract: This article presents a comparative evaluation of the mechanical performance and sustainability profile of four polymers for additive manufacturing: two for material extrusion (PLA and ABS) and two for vat photopolymerization (plant-based resin and ABS-like resin). The objective was to analyze the balance between mechanical properties, which influence product performance, and sustainability criteria, such as raw material origin and recyclability. To achieve this goal, tensile and IZOD impact tests were conducted. The results indicate that the plant-based resin achieved the highest tensile strength, while the ABS filament demonstrated significantly superior impact resistance compared to the other materials. It is concluded that ABS presented the most balanced overall mechanical performance; however, the selection of the ideal material is not universal, as it depends on the alignment between technical requirements and the sustainability objectives of each specific Project.

Keywords: material selection; 3D printing; filament; resin; design and technology.

Introdução

A Quarta Revolução Industrial, por meio da convergência entre tecnologias digitais, biológicas e físicas, tem permitido que pessoas fora das grandes indústrias projetem e produzam artefatos sob demanda. Esse cenário é viabilizado pelo acesso generalizado a arquivos *online* e tecnologias de fabricação digital, como a Manufatura Aditiva (MA), que se caracteriza pela adição de material, camada por camada, até a construção completa de um modelo definido, no qual são aplicáveis diferentes processos e matérias-primas (Facca *et al.*, 2022).

O conceito abrangente de MA, segundo a norma ISO/ASTM52900:2021, engloba diversas tecnologias, entre as quais se destacam a impressão por extrusão de material polimérico (*Material Extrusion*) e a tecnologia da fotopolimerização de resina líquida (*Vat Photopolymerization*), ambas amplamente aplicadas. Cada tecnologia possui suas características e parâmetros a serem definidos, os quais impactam diretamente o resultado final da impressão (Facca *et al.*, 2022). Com o atual desenvolvimento tecnológico há uma vasta gama de materiais disponíveis para as tecnologias de MA. A seleção de materiais, portanto, é normalmente feita com base em diferentes critérios, considerando suas características físicas e intangíveis, como os aspectos de sustentabilidade. Conforme Callister e Rethwisch (2020) são raros os materiais que atendem por completo os critérios de um projeto, o que torna comum a necessidade de um balanço entre características, como selecionar uma matéria-prima de menor desempenho mecânico, mas biodegradável.

No binômio design e sustentabilidade a escolha de materiais e processos produtivos é vista como etapa essencial para mitigação dos impactos ambientais, seja pela redução do descarte, pelo menor consumo de energia ou até mesmo o replanejamento do ciclo de vida dos produtos (Manzini; Vezzoli, 2016). No âmbito da sustentabilidade ambiental, MA é apontada como vantajosa em relação à manufatura tradicional, visto que a construção do artefato ocorre pela deposição do material somente nas áreas necessárias, minimizando desperdícios (Sallenave *et al.*, 2021). Entretanto, existem questionamentos sobre a viabilidade da produção pela tecnologia e tais críticas destacam a utilização de materiais de difícil reciclagem ou reciclados nos modelos desenvolvidos, além da geração de resíduos por peças falhas.

A partir do exposto, no presente artigo, tem-se como objetivo analisar e comparar os materiais mais populares da impressão por filamento e seus paralelos em resina. Para comparação das propriedades mecânicas realizou-se ensaios de tração, ensaios de impacto IZOD e levantamentos bibliográficos acerca dos materiais estudados. A discussão dos resultados visa contribuir para a seleção de materiais na MA ao ponderar o balanço necessário entre as propriedades mecânicas e o impacto ambiental.

Manufatura aditiva

O desenvolvimento da MA foi iniciado no final do século XX como resultado de pesquisas sobre topografia e fotoescultura (Volpato; Carvalho, 2025). A tecnologia consiste na produção de artefatos a partir da adição sucessiva de camadas em um processo que pode empregar diferentes materiais e tecnologias. Inicialmente, as máquinas de MA, comumente conhecidas como impressoras 3D, possuíam alto custo de aquisição quando começaram a ser desenvolvidas (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Com a expiração das patentes surgiram novos equipamentos com menor custo, o que proporcionou a popularização da tecnologia (Gibson; Rosen; Stucker, 2015; Volpato, 2025).

A impressão 3D viabiliza a fabricação de produtos de forma automatizada e relativamente rápida, possibilitando a produção de geometrias complexas sem necessidade de cola ou elementos de fixação adicionais (Volpato; Carvalho, 2025). Embora a MA tenha sido inicialmente utilizada para prototipagem, seus usuários logo perceberam o potencial tecnológico para a fabricação de produtos finais com diferentes aplicações (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

Entre os tipos de MA, a extrusão de material é o método mais difundido (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). A tecnologia de extrusão de material polimérico, popularmente conhecida como *Fused Deposition Modeling* (FDM), consiste em alimentar um bico extrusor aquecido com um filamento termoplástico, o qual amolece o polímero para a deposição. Com o material fundido a impressora deposita o material no eixo cartesiano, sobre a mesa de impressão, construindo assim as camadas de impressão e, consequentemente, o objeto (Volpato, 2025). Nesse processo, destaca-se a necessidade de haver pressão no bico, aplicada sobre o material a ser extrudado, pois assim se garante a precisão no diâmetro de saída do filamento. Outro ponto importante para garantir a qualidade da impressão é que o material depositado não se solidifique tão rapidamente para a garantir a adesão entre camadas (Volpato, 2025; Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Nesse sentido, observa-se que a definição de parâmetros, principalmente relacionados à temperatura, é de grande relevância para o sucesso da impressão FDM.

A fotopolimerização em cuba, por outro lado, compreende um processo relativamente diferente, pois opera de forma distinta, partindo de resinas líquidas que são seletivamente solidificadas para formar as camadas. Existem alguns métodos para executar a fotopolimerização, sendo um deles a estereolitografia mascarada (MSLA), em que a resina é colocada em uma cuba de fundo transparente e a silhueta da camada é projetada por uma tela LCD. Esse processo apresenta como vantagem uma maior velocidade de impressão, já que toda a camada é formada simultaneamente (Gibson; Rosen; Stucker, 2015), e com acabamento superficial superior (Ahrens, 2017).

Os materiais empregados na impressão 3D são majoritariamente polímeros. Nesse contexto, a extrusão de material fundido utiliza termoplásticos, já a fotopolimerização em cuba é realizada com resinas líquidas fotopolimerizáveis, que se solidificam e tornam-se polímeros termofixos. Os autores Gibson, Rosen e Stucker (2015) apontam a existência de materiais elaborados especificamente para os processos de manufatura aditiva, mas ponderam que “[...] as capacidades de desempenho dos materiais e máquinas ficam atrás da tecnologia de fabricação convencional (por exemplo, máquinas de moldagem por injeção)”.

No design, a impressão 3D é explorada em diversas finalidades, inclusive como ferramenta para o desenvolvimento de produtos como, por exemplo, na execução de peças matrizas para moldes em joalheria (Volpato, 2025). Além de ter relevância como recurso de prototipagem, que foi sua aplicação primordial, tem ganhado destaque na execução de produtos finais (Ford; Despeisse, 2016). A escolha do processo de MA e dos respectivos materiais depende da finalidade do modelo, o que repercute no tempo, gasto de energia para aquecimento e funcionamento da máquina, além do custo final e qualidade do acabamento superficial (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A partir desse cenário, é relevante que projetistas tenham domínio da operação e dos materiais disponíveis na execução dos projetos por MA. Apesar do potencial sustentável da impressão 3D, o uso equivocado dessa tecnologia pode acarretar um cenário alternativo menos ecoeficiente, devido ao desperdício de material e geração de resíduos (Sallenave *et al.*, 2020).

Propriedades mecânicas na seleção de materiais e tecnologias

A seleção de materiais é uma etapa importante do desenvolvimento de produtos (Lesko, 2012), no qual se procura equilibrar decisões referentes aos aspectos tangíveis e intangíveis, necessidades mercadológicas e de produção, desejos do usuário e a sustentabilidade dentro do ciclo de vida (Lima, 2006; Baraúna; Razera; Heemann, 2015). Ademais, a escolha dos materiais não só define a funcionalidade técnica do produto, como também influencia sua personalidade (Ashby; Johnson, 2014). Conforme Ashton e colaboradores (2016), a relação entre designers e o processo de seleção de materiais evoluiu, principalmente, devido ao desenvolvimento de novas tecnologias e processos que permitiram a liberdade criativa dos profissionais, como é o caso do surgimento dos polímeros e, posteriormente, o processo de impressão 3D.

Contudo, a sustentabilidade ambiental do produto não depende apenas do material escolhido, mas ainda é um fator de grande relevância. A avaliação do impacto da escolha de um material pode ser observada pela extração da matéria prima, pelo método de manufatura e pelo nível de complexidade de degradação ou de recuperação do material após o uso (Manzini; Vezzoli, 2016). As propriedades mecânicas dos materiais são outro ponto que pode influenciar diretamente a durabilidade de um produto e, de acordo com Groover (2007):

[...] são importantes no design porque a função e o desempenho de um produto dependem de sua capacidade de resistir à deformação sob as tensões encontradas no uso. No projeto, o objetivo comum é que o produto e seus componentes resistam a essas tensões sem alterações significativas na geometria (Groover, 2007, p. 38, tradução nossa).

Presentes em uma ampla gama de produtos e em parte do cotidiano de todos, os polímeros são materiais leves e de baixo custo, que proporcionam inovações em possibilidades de manufatura e aplicações (Callister; Rethwisch, 2020). Devido à sua versatilidade estética, os polímeros são capazes de mimetizar outros materiais como madeiras, metais e vidros (Ashby; Johnson, 2014). Por outro lado, geralmente apresentam menor resistência mecânica e térmica (Lima, 2006). Paralelamente, apresentam alta estabilidade química (Ferrante; Walter, 2010; Callister; Rethwisch, 2020), o que levanta preocupações acerca das implicações ambientais que causam no momento do descarte, tornando-se uma desvantagem ambiental.

Os polímeros são, majoritariamente, produzidos a partir de matérias-primas provenientes do petróleo, uma fonte não renovável e de extração bastante poluente. Quanto à origem, podem ser classificados como naturais ou sintéticos e, segundo Ashby e Johnson (2014), dividem-se em termoplásticos, termofixos e elastômeros. Os termoplásticos podem ser mecanicamente reciclados múltiplas vezes por meio da aplicação de calor e pressão, enquanto os demais se degradam nessas mesmas condições (Canevarolo; Sebastião, 2006).

Tanto termoplásticos quanto termofixos são empregados na impressão 3D. A tecnologia de FDM utiliza filamentos de termoplásticos, através de um canal de aquecimento para construir as camadas, enquanto MSLA utiliza resinas termofixas líquidas, curadas através da fotopolimerização das camadas. Para as duas tecnologias, é possível utilizar polímeros chamados *plant-based* ou *bio-based* que, diferente daqueles de origem petroquímica, se originam de fontes renováveis. Isso, entretanto, não significa, necessariamente, que esses materiais sejam biodegradáveis (EEA, 2020).

Termoplásticos *Plant based*

Uma parcela dos polímeros termoplásticos é proveniente de fontes renováveis como o milho, cana-de-açúcar, celulose, quitina, amidos, açúcares e óleos vegetais (Brito; Araujo; Mélo, 2011; Enders; Siebert-Raths, 2011). A vantagem desses materiais em termos de sustentabilidade ambiental, em relação aos de origem petroquímica, depende, no entanto, das condições de extração, aplicação e ciclo de vida do material (EEA, 2020). É importante, entretanto, ressaltar a distinção entre os polímeros provenientes de fontes renováveis e os biodegradáveis. Mesmo nos derivados do petróleo, uma pequena parcela pode ser passível de biodegradação (Enders; Siebert-Raths, 2011; EEA, 2020), como a policaprolactona (PCL) (Lefteri, 2017).

Como exemplos de polímeros *bio-based* os autores Enders e Siebert-Raths (2011) salientam que os primeiros materiais desse tipo foram a parkesina e o látex natural. Entre os exemplos contemporâneos destacam-se os polihidroxialcanoatos (PHA) e o poli(ácido láctico) (PLA) (Brito; Araujo; Mélo, 2011), dos quais o último é o mais relevante em termos de volume de aplicações.

Resinas termofixas *Plant-based*

Os polímeros termofixos são definidos como materiais que não se deformam com o calor após sua cura irreversível. Em sua maioria, costumam ser provenientes do petróleo e são polimerizados por meio de aquecimento em uma única vez (Callister; Rethwisch, 2020). Em um subgrupo importante estão as resinas de impressão 3D, que enrijecem através da incidência de luz UV, como as de poliuretano, poliésteres, resinas fenólicas, epóxides e silícios (Ashby; Johnson, 2014). Para Silveira (2021), em termos de recuperação do material após o uso, a cura irreversível dos termofixos impede a reciclagem mecânica desse material, ao contrário dos termoplásticos.

Os termofixos plant-based também são derivados de fontes renováveis, contudo, seu volume de utilização geral ainda é baixo (Enders; Siebert-Raths, 2011). Na impressão 3D a disponibilidade de resinas plant-based é igualmente escassa. Entre as opções mais populares destacam-se: *eSun eResin-PLA*, que utiliza monômeros de PLA; *Elegoo Plant-based Photopolymer Resin*, feita principalmente de óleo de soja; e *AnyCubic Plant-based UV Eco-Resin*, também proveniente do óleo de soja (O'Neill, 2024).

A partir do exposto, a presente pesquisa tem como objetivo discutir as propriedades mecânicas (resistência à tração e impacto) como elementos para a sustentabilidade. Para atingir esse objetivo a análise parte de resultados de ensaios de tração e impacto IZOD, com corpos de prova feitos em impressão 3D FDM (filamento) e MSLA (resina), a fim de comparar os materiais poliméricos comumente empregados nas tecnologias de MA.

Materiais e métodos

Para a avaliação da resistência mecânica dos materiais, foram produzidos corpos de prova (CP) a partir dos filamentos mais populares aplicados à impressão 3D em filamento: Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e poli(ácido láctico) (PLA), bem como seus paralelos em resina. Os CP para os ensaios foram produzidos seguindo os parâmetros de cada tecnologia, conforme detalhado no Quadro 1. A impressão por extrusão de material polimérico exige parâmetros voltados principalmente a temperaturas, que são responsáveis pela fusão (amolecimento) e estabilidade

do material durante o processo. Já na impressão por fotopolimerização, é necessário configurar parâmetros focados na exposição à luz, responsável pela cura da resina.

Quadro 1: Parâmetros de impressão dos corpos de prova.
Fonte: Autores, 2025

	Filamento ABS	Resina ABS-like	Filamento PLA	Resina Plant Based
Temperatura do bico	235°C	-	205°C	-
Temperatura da mesa	90°C	-	60°C	-
Preenchimento	100%	100%	100%	100%
Tipo de preenchimento	Cubic	-	Cubic	-
Velocidade do bico	0,07m/s	-	0,07m/s	-
Altura da camada	0,28mm	0,05mm	0,28mm	0,05mm
Tempo de exposição	-	2,7s	-	2,7s
Intensidade da luz	-	100%	-	100%

Para ambas as tecnologias é necessário informar a porcentagem de preenchimento, definida aqui em 100%, a fim de aproximar as amostras de peças injetadas. A definição do preenchimento é de grande relevância, visto que maiores percentuais de preenchimento conferem maior resistência mecânica às peças (Volpato, 2017; Meri *et al.*, 2018).

Filamentos

Para os CP com filamentos foram utilizados os filamentos PLA e ABS. A escolha desses materiais se justifica por serem amplamente aplicados na impressão 3D (Besko *et al.*, 2017) e, ao mesmo tempo, por apresentarem propriedades mecânicas e origens distintas, o que viabiliza a análise comparativa proposta. Esses materiais são polímeros termoplásticos, ou seja, deformam-se sob aplicação de temperatura, característica fundamental para o processo de impressão 3D por filamento fundido (Upadhyay *et al.*, 2020; Sallenave, 2022).

O PLA é obtido a partir da polimerização do ácido lático, presente em diversas fontes renováveis de amido como milho e cana-de-açúcar (Callister; Rethwisch, 2020; Lefteri, 2017). O material é amplamente aplicado devido a fatores como a sua facilidade de impressão, baixo ponto de fusão (180°C), boa adesão à mesa e compatibilidade com equipamentos de entrada (Barbosa, 2023; Volpato, 2025).

Em contrapartida ao PLA, o ABS é um polímero obtido a partir do petróleo, reconhecido pelo seu baixo custo, boas propriedades mecânicas e estabilidade térmica, o que resulta em peças de vida útil potencialmente mais longa (Zur *et al.*, 2020). Todavia, quando comparado a outros filamentos, o material apresenta algumas desvantagens de processamento, como a necessidade de impressoras com mesa aquecida e isolamento térmico (máquinas fechadas), pois o material

é mais suscetível a empenamentos durante a impressão, o que causa irregularidades que podem condenar a peça ao descarte (Besko *et al.*, 2017).

Resinas

Outra tecnologia de MA abordada neste estudo é aquela por fotopolimerização em cuba, que faz uso de resinas fotopolimerizáveis. Para este estudo foram utilizadas as resinas *Plant-based UV Eco-Resin* e Resina ABS-*like*, pois são alternativas aos materiais PLA (pela origem vegetal) e ABS (por conta das propriedades mecânicas), respectivamente. Ambas as resinas foram disponibilizadas pelo Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM).

Conforme a Anycubic (2024) a resina à base de plantas utiliza extrato de grãos de soja como matéria-prima, sendo considerada segura para o meio ambiente. A resina em questão é sensível a ondas de 355nm a 405nm e livre de odores químicos que possam causar desconforto ou irritação à pele. Devido a essas características, conforme as recomendações do fabricante, a impressão 3D com essa resina pode ser realizada em qualquer espaço, inclusive em ambientes fechados e sem ventilação.

A resina ABS-*like* foi desenvolvida para apresentar propriedades mecânicas semelhantes às do plástico ABS, tais como alta resistência ao impacto e maior tenacidade com menos fraturas ou deformações. A resina em questão é sensível a ondas de comprimentos entre 385 e 410nm e possui odor mais leve quando comparada a outras resinas (Elegoo, 2025). Embora o fabricante informe que a resina é aplicável em diversos tipos e modelos de máquina, não são informados, na página de venda, os aditivos que lhe conferem as propriedades semelhantes ao ABS.

Ensaios mecânicos

Para o estudo das propriedades mecânicas dos materiais foram realizados ensaios de tração e impacto. Para cada material foram ensaiadas cinco amostras em cada teste, assim, foi possível obter uma média dos valores e compreender o comportamento de cada material durante os ensaios. Os ensaios foram conduzidos utilizando-se os equipamentos do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) disponíveis na maquetaria da Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração em um CP tendendo a esticá-lo até sua ruptura (Garcia; Spim; Santos, 2012). Seguiu-se como procedimento a ASTM D638, normativa que rege os ensaios de tração em polímeros e resinas, com CP Tipo 5 (*Type V*). Foi utilizada a Máquina de Ensaio Universal, modelo EZ-LX da marca Shimadzu (Figura 1), com análise de dados realizada no *software* de Trapezium X.

*Figura 1 - Máquina utilizada no ensaio de tração.
Fonte: Shimadzu, 2025.*



A resistência ao impacto dos materiais foi determinada pelo método Izod, segundo a norma ASTM D256. Os CP foram confeccionados com um entalhe em “V”, conforme especificado pela norma, a fim de atuar como concentrador de tensão. O ensaio consiste na liberação de um martelo pendular, a partir de uma altura específica, que atinge a região do entalhe e mede a resistência ao impacto do material (Garcia; Spim; Santos, 2012). Foi utilizado a Máquina de Ensaio de Impacto, modelo CEAST 9050 da empresa Instron, como pode ser observado na Figura 2.

*Figura 2 - Máquina utilizada no ensaio de impacto.
Fonte: Autores, 2025.*



Resultados e discussão

Os resultados dos ensaios de tração e impacto permitiram a comparação do desempenho mecânico dos filamentos PLA e ABS e seus paralelos em resina *Plant-based UV Eco-Resin* e *ABS-like*, respectivamente. Referente ao ensaio de tração observou-se principalmente a tensão máxima suportada pelo material antes de perder resistência ou romper-se, enquanto nos ensaios de impacto, atentou-se à resistência ao impacto dos materiais.

Nos ensaios de tração a resina *Plant-based* apresentou melhor desempenho, com média de tensão máxima de $34,435 \pm 1,011$ MPa. Em ordem decrescente de desempenho seguiram-se a resina *ABS-like* ($27,970 \pm 1,011$ MPa), o filamento ABS ($27,936 \pm 2,813$ MPa) e o filamento PLA ($18,405 \pm 0,803$ MPa), em sequência, como exposto no Quadro 2. A notável proximidade da resistência da resina *ABS-like* e do filamento ABS no ensaio de tração, a resina apresenta propriedades semelhantes às do filamento, o que corrobora a alegação do fabricante em relação às suas características.

Quadro 2: Média da tensão máxima conforme os materiais,
Fonte: Autores, 2025

Material	Tensão Máxima (MPa)	Desvio Padrão
Resina Plant Based	34,435	$\pm 1,011$
Resina ABS-like	27,970	$\pm 1,011$
Filamento ABS	27,936	$\pm 2,813$
Filamento PLA	18,405	$\pm 0,803$

Biomaterial  Petroquímico 

Na análise da deformação observaram-se diferenças significativas no deslocamento até a ruptura dos materiais. As resinas *ABS-like* e *Plant based* apresentaram maior deslocamento até a sua ruptura, sendo $1,628 \pm 0,371$ mm e $1,597 \pm 0,349$ mm, respectivamente. Para os filamentos ABS e PLA os deslocamentos foram de $0,797 \pm 0,055$ mm e $1,030 \pm 0,087$ mm, respectivamente. Esses resultados indicam que as resinas testadas, de modo geral, apresentam um comportamento mais dúctil (maior capacidade de deformação) do que os filamentos.

A análise das superfícies de fratura, com base nos princípios de Callister e Rethwisch (2020), revelou que as amostras de resina apresentaram comportamento característico de materiais frágeis, sem deformação plástica, como observa-se nas Figuras 3 (a) (b) e (c). Entretanto, para os materiais em filamento, observou-se o rompimento e o descolamento das camadas da impressão 3D, o que resultou em uma fratura com aspecto similar à de materiais fibrosos (Figuras 3 (d), (e) e (f)), aspecto consequente da deposição de filamento camada sobre camada.

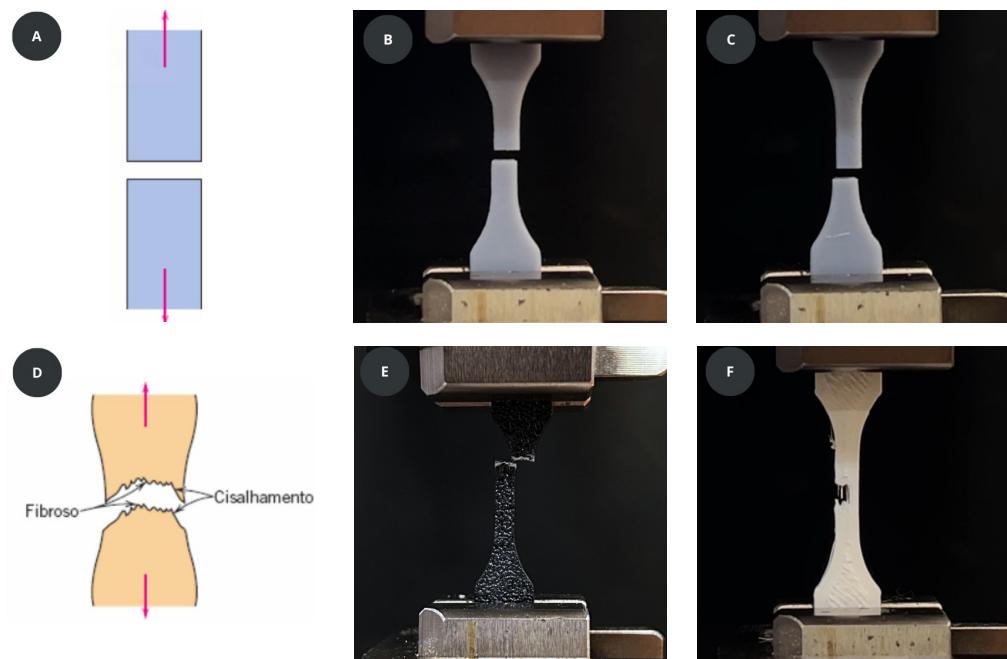


Figura 3 - a)
Ilustração de ruptura frágil; b) Ruptura da resina ABS-like; c) Ruptura da resina Plant-Based; d) Ilustração de ruptura de material fibroso; e) Ruptura do filamento ABS; f) Ruptura do filamento PLA.
Fonte: Adaptado de Callister, 2020 pelos autores, 2025.

Nos ensaios de impacto o filamento de ABS demonstrou uma resistência notavelmente superior à dos demais materiais, com média de $15,642 \pm 1,161 \text{ kJ/m}^2$. Os demais materiais apresentaram resistência notavelmente menor, em ordem decrescente: o PLA ($1,718 \pm 0,082 \text{ kJ/m}^2$), a resina *Plant Based* ($1,434 \pm 0,442 \text{ kJ/m}^2$) e a resina ABS-*like* ($1,1178 \pm 0,031 \text{ kJ/m}^2$). Diferentemente do observado no ensaio de tração, aqui houve uma grande diferença entre o filamento de ABS e sua resina análoga (ABS-*like*), como demonstrado no Quadro 3.

Quadro 3: Média da tensão máxima conforme os materiais
Fonte: Autores, 2025

Material	Resistência (kJ/m ²)	Desvio Padrão	
Filamento ABS	15,642	$\pm 1,161$	
Filamento PLA	1,718	$\pm 0,082$	
Resina Plant Based	1,434	$\pm 0,442$	Biomaterial
Resina ABS- <i>like</i>	1,178	$\pm 0,031$	Petroquímico

A análise conjunta dos resultados indica que o filamento ABS é a alternativa com melhor desempenho mecânico entre os materiais estudados. O material apresentou desempenho balanceado, combinando uma resistência à tração satisfatória com uma resistência ao impacto muito superior à dos outros materiais. Apesar do bom desempenho neste estudo, é importante ressaltar que as configurações dos parâmetros exercem influência direta sobre as propriedades mecânicas de peças impressas em filamento, tendo como fatores de maior influência a orientação das camadas, a altura de camada e o preenchimento (Volpato, 2017; Meri *et al.*, 2018).

Considerações finais

Este estudo demonstrou que a sustentabilidade desempenha um papel relevante na escolha de materiais, considerando o impacto da extração da matéria-prima, a biodegradabilidade e o potencial de reciclagem. Esses critérios de sustentabilidade devem ser integrados ao processo projetual com a mesma importância dos requisitos técnicos, exigindo um balanço criterioso com a resistência mecânica necessária. Portanto, a seleção criteriosa de materiais e processos é um pilar para a eficiência do produto final, enquanto uma seleção equivocada de materiais e/ou processos pode resultar na geração de resíduos desnecessários ou desempenho mecânico inadequado.

Este estudo, portanto, reitera que frente aos avanços nas diferentes tecnologias de manufatura aditiva e insumos disponíveis, a seleção de materiais é uma etapa fundamental para decisões mais sustentáveis. Essa mesma lógica se estende aos parâmetros de impressão: peças com preenchimento total apresentam melhor resistência mecânica em comparação com aquelas de menor preenchimento, mas, consequentemente, elevam o consumo de material e o tempo de impressão. A partir dessas discussões é crucial ressaltar que nem toda aplicação exige máxima performance mecânica. A otimização de recursos está justamente em alinhar as especificações do material e do processo às necessidades de cada projeto.

Conforme demonstrado nessa pesquisa, a seleção de materiais é multifatorial e deve ser adequada à finalidade do projeto. O Quadro 4 compila os principais aspectos de sustentabilidade encontrados durante o estudo. A partir dele, elencam-se os materiais PLA e *Plant-based UV Eco-Resin* como os de menor impacto na extração de matéria prima. Adicionalmente, destaca-se o filamento PLA como o único biodegradável dentre os materiais estudados. As resinas, de modo geral, não são passíveis de reciclagem mecânica, somente energética para geração de energia, o que pode acarretar a geração de gases tóxicos durante a queima.

Quadro 4: Aspectos de sustentabilidade dos materiais estudados.
Fonte: Autores, 2025.

	Resina ABS-like	Filamento ABS	Filamento PLA	Resina Plant Based
Base	Petróleo	Petróleo	Vegetal	Vegetal
Tensão máxima (MPa)	27,970	27,936	18,405	34,435
Deslocamento (mm)	1,628	0,055	1,03	1,597
Reciclagem mecânica	Não (termofixo)	Sim (termoplástico)	Sim (termoplástico)	Não (termofixo)
Biodegradabilidade	Não	Não	Sim	Não

No que tange ao desempenho mecânico, a análise comparativa identificou o filamento de ABS como o material de performance geral mais robusto. Essa conclusão se deve ao seu desempenho balanceado, que combinou sua resistência à tração significativa com sua resistência ao impacto superior à dos demais materiais. O estudo também desmistifica a ideia de que materiais de fontes renováveis são mecanicamente inferiores. Prova disso foi o desempenho da resina *plant-based*, que alcançou o maior valor de resistência à tração entre todos os materiais analisados.

A análise indica que, para projetos onde a eficiência mecânica é o critério prioritário, o filamento de ABS representa a escolha de melhor performance entre as opções avaliadas. Entretanto, em projetos com viés sustentável, nos quais a extração da matéria-prima e biodegradabilidade têm maior valor que as propriedades mecânicas, o filamento PLA e a resina *Plant-based UV Eco-Resin* mostram-se alternativas mais coerentes. Reforça-se então a conclusão de que não existe um material ou processo que atenda a todos os requisitos projetuais, mas sim o balanço entre as propriedades do material, a tecnologia de fabricação e os objetivos específicos de cada projeto.

Referências

- AHRENS, C. H. Processos de AM por fotopolimerização em cuba. In: VOLPATO, N. (org.). **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. E-book. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/>. Acesso em: 28 set. 2024.
- ANYCUBIC. **Plant-Based UV Resin**. Disponível em: <https://store.anycubic.com/collections/materials/products/plant-based-uv-resi>. Acesso em: 1 out. 2024.
- ASHTON, E. G.; KINDLEIN JR. W.; CÂNDIDO, L. H.; DEMORI, R.; ROBINSON, L. C.; MULER, R. Design, materiais e sustentabilidade: micronização de produto multi-material visando sua reciclagem. **DAPesquisa**, v. 10, n. 14, p. 145–162, 2016.
- ASHBY, M; JOHNSON, K. **Materials and design: the art and science of material selection in product design**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- BARAUNA, D.; RAZERA, D. L.; HEEMANN, A. Seleção de materiais no design: informações necessárias ao designer na tomada de decisão para a conceituação do produto. **Design e Tecnologia**, v. 5, n. 10, p. 1-9, 2015.
- BRITO, G. F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO, T. J.; MÉLO, T. J. A. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, n. 2, p. 127-139, 2011. Disponível em: remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/view/222/204. Acesso em 13 ago. 2024.
- CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais - uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. E-book. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637325/>. Acesso em: 12 fev. 2025.
- CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber, 2006.
- EEA - European Environment Agency. **Biodegradable and compostable plastics - challenges and opportunities**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/biodegradable-and-compostable-plastics#additional-files>. Acesso em: 15 set. 2024.
- ELEGOO. **ABS-like Resin Colored 1 KG & 2 KG**. Disponível em: <https://us.elegoo.com/products/elegoo-abs-like-resin>. Acesso em: 10 set. 2025.
- ENDRES, H-J; SIEBERT-RATHS, A. **Engineering biopolymers: markets, manufacturing, properties and application**. Munique: Carl Hanser Publishers, 2011. E-book. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9783446424036/engineering-biopolymers>. Acesso em 13 ago. 2024.
- FACCA, C. A.; FERNANDES, A.; ALVES, J. L.; RANGEL, B.; BARBOSA, A. M. A Impressão 3D e as tecnologias emergentes de fabricação digital: a (r)evolução nos processos de ensino de design, engenharia e manufatura. In: ARRUDA, A. e ARAUJO, G. **Design & narrativas criativas nos processos de prototipagem**. São Paulo: Blucher, 2022. p. 275-306.
- FERRANTE, M.; WALTER, Y. **A materialização da idéia: noções de materiais para design de produto**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1573-1587, 2016.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. 2 ed. Nova York: Springer, 2015. E-book. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-2113-3#back-to-top>. Acesso em: 04 nov. 2024.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A.. **Ensaios dos materiais**, 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. E-book. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2114-0/>. Acesso em: 04 set. 2025.
- GROOVER, M. P. **Fundamentos de manufatura moderna: materiales, procesos y sistemas**. v.3. Ciudad de México: The McGraw-Hill, 2007.

- ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). **ISO/ASTM 52900:2021**. Additive manufacturing—General principles—Fundamentals and vocabulary. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization, 2021. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>. Acesso em: 13 out. 2024.
- LESKO, J. **Design industrial** – guia de materiais e fabricação. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- LIMA, M. A. **Introdução aos materiais e processos para designers**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2006.
- MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**: os requisitos ambientais dos produtos industriais. São Paulo: Edusp, 2016.
- MERI, B. **Manufatura aditiva**: uma revisão da influência dos parâmetros de impressão 3D de material ASA na resistência à tração. In: SIMPÓSITO GAÚCHO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL E MECÂNICA, I., 2022, Santa Maria. *Anais* [...]. Santa Maria: UFSM, 2022. p. 1-3. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/30964>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- O'NEILL, B. **Is UV resin toxic?** Risks and Safety Measures Explained. 2024. Disponível em: <https://www.wevolver.com/article/is-uv-resin-toxic>. Acesso em 02 out 2024.
- UPADHYAY, R. K.; MISHRA, A. K.; KUMAR, A. Mechanical degradation of 3D printed PLA in a simulated marine environment. *Surfaces and Interfaces*, v. 21, n. 1 dez. 2020.
- VOLPATO, N.; CARVALHO, J. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: VOLPATO, N. (org.). **Manufatura aditiva**: tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/>. Acesso em: 28 set. 2024.
- VOLPATO, N. Processos de AM por extrusão de material. In: VOLPATO, N. (org.). **Manufatura aditiva**: tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017.
- SALLENAVE G. **Análise da degradação do PLA em ambiente marinho simulado**. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/255164/001163294.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- SALLENAVE, G. C.; CALDVINO, G. C.; SILVA, F. P.; CÂNDIDO, L. H. A.; JACQUES, J. J. Contribuições para a discussão dos resíduos gerados pelo processo de fabricação por filamento fundido (FFF). In: OLIVEIRA, G. G. de; NÚÑEZ, G. J. Z. **Design em pesquisa**. Porto Alegre: Marcavvisual, 2020. cap. 13, p. 244-258. E-book. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iicd/publicacoes/livros>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- Shimadzu Corporation. **EZ-SX Universal testing machine**. Disponível em: <https://shimadzu-testing.com/en/products/universal-testing-machines/ez-sx/>. Acesso em: 10 set. 2025.
- SILVEIRA, A. L. **De volta ao ciclo**: tecnologias para a reciclagem de resíduos. Curitiba: Intersaber, 2021. *E-book*. Disponível em: <https://www.bvirtual.com.br/NossoAcervo/Publicacao/187013>. Acesso em: 21 nov. 2024.

Sobre os autores

Rafael Reche Tavares, Graduado em Design pela Universidade Feevale (2023). Mestrando em Design e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e membro do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM). Desenvolve pesquisa principal sobre a degradação de polímeros em mesocosmo marinho (tanque simulador de ambiente marinho) e, paralelamente, atua em projetos de seleção e percepção de materiais, ecodesign, impressão 3D e reciclagem.

E-mail: reche.tavares@ufrgs.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6854117237157157>

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-1019-7451>

Tayná Steiger Mai, Mestranda em Design e Tecnologia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e integrante do Laboratório de Seleção de Materiais (LDSM). Desenhista Industrial pela Universidade Federal de Santa Maria (2023). Mobilidade Acadêmica no concluída em fevereiro de 2023 no curso de Arte e Design do Instituto Politécnico de Bragança - IPPB, Portugal. Realiza pesquisas sobre Impressão 3D, moldes de injeção de termoplásticos, design circular e reciclagem de materiais.

E-mail: tayna.mai@ufrgs.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5232695525267230>

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-3950-8918>

Bruno Thomazi Zanette, Graduação em Engenharia Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2023). Mestrando em Design e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atua principalmente nos seguintes temas: Tecnologia, ecodesign.

E-mail: brunozanette99@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0969204233039125>

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-0481-0089>

Jocelise Jacques de Jacques, Graduada em Arquitetura e Urbanismo (1996), mestrado em Engenharia Civil (2000) e doutorado em Engenharia de Produção (2011) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), tendo desenvolvido parte de sua pesquisa na Universidade da Califórnia - Berkeley. Professora associada da UFRGS, no Departamento de Design e Expressão Gráfica e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Design (UFRGS). Como orientadora de mestrado e doutorado trabalha com Design Socioambiental, buscando estudar tecnologias sociais para reduzir o impacto ambiental e promover a equidade social.

E-mail: jocelisej@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0338978144201051>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2109-0677>

Luis Henrique Alves Cândido, Graduado em Desenho Industrial, Mestrado e Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor Associado da UFRGS, no Departamento de Design e Expressão Gráfica e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Design (UFRGS). Pesquisador no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM/UFRGS). Coordenador do Laboratório de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura (ARQ/UFRGS). Realiza pesquisas nos temas: ecodesign, micro geração de energia, ciclo de reciclagem dos materiais (CRM), processos tecnológicos para identificação (via IA) e reciclagem de produtos eletroeletrônicos, ferramentas para inovação e transferência tecnológica.

E-mail: candido@ufrgs.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5480346734351382>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9870-1515>