**Análise comparativa da resistência à tração de materiais para a impressão 3D com diferentes características ambientais**

***Comparative analysis of the tensile strength of 3D printing materials with different environmental characteristics***

**Rafael Reche Tavares, Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Design e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul .**

Reche.tavares@ufrgs.br

**Tayná Steiger Mai, Mestranda no Programa de Pós-graduação em Design e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**

Tayna.mai@ufrgs.br

**Bruno Zanette, Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Design e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul .**

Brunozanette99@gmail.com

**Jocelise Jacques de Jacques, Doutora em Engenharia de Produção - PPGE/ UFRGS. Professora de Design No DEG/FA/UFRGS.**

Jocelisej@gmail.com

**Luis Henrique Alves Cândido, Doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais - PPGE3M/UFRGS. Professor de Design no DEG/FA/UFRGS. Pesquisador no Laboratório de Design e Seleção de Materiais - LDSM/UFRGS.**

Candido@ufrgs.br

Número da sessão temática da submissão – 2

**Resumo**

No atual cenário de popularização dos métodos de manufatura aditiva, o presente artigo busca compreender aspectos da sustentabilidade ambiental de polímeros comumente utilizados nos processos de impressão 3D de filamento e resina. Foram pesquisados dois materiais poliméricos derivados do petróleo e dois com origem vegetal, que foram submetidos a ensaios de tração, a fim de comparar o desempenho no quesito resistência mecânica, que impacta diretamente na vida útil do produto, e como este aspecto contribui para a sustentabilidade na impressão 3D. Como resultados, observou-se que o filamento de ABS teve melhor desempenho nos ensaios. Por fim, sugere-se que a impressão em filamento apresenta mais possibilidades para a melhoria de resistência mecânica, pois possui variedade de parâmetros de deposição de material, que podem influenciar neste aspecto.

**Palavras-chave:** Resistência mecânica; Impressão 3D; Sustentabilidade; Design e Tecnologia.

***Abstract***

*In the current scenario of the popularization of additive manufacturing methods, this article seeks to understand aspects of the environmental sustainability of polymers commonly used in filament and resin 3D printing processes. Two polymeric materials derived from petroleum and two of plant origin were researched and subjected to tensile tests in order to compare their performance in terms of mechanical strength, which has a direct impact on the useful life of the product, and how this aspect contributes to sustainability in 3D printing. The results showed that the ABS filament performed better in the tests. Finally, it is suggested that filament printing offers more possibilities for improving mechanical strength, as it has a variety of material deposition parameters that can influence this aspect.*

***Keywords:*** *Mechanical resistance; 3D printing; Sustainability; Design and Technology.*

1. **Introdução**

A quarta revolução industrial, por meio da convergência de tecnologias digitais, biológicas e físicas, permite que pessoas fora das grandes indústrias projetem e produzam artefatos sob demanda e necessidade. Esse cenário ocorre a partir do acesso generalizado a arquivos online e tecnologias de fabricação digital, como é a Manufatura Aditiva - MA, que caracteriza-se pela adição de material, camada por camada, até a construção completa do modelo definido, oportunizando o uso de diferentes processos e matérias-primas (Facca et al., 2022).

O termo guarda-chuva Manufatura Aditiva, pela ISO/ASTM52900:2021, engloba sete tecnologias, incluindo a impressão por extrusão de material polimérico (Material Extrusion) e a por fotopolimerização de resina líquida (Vat Photopolymerization). Cada tecnologia possui suas características e parâmetros a serem definidos, que impactam diretamente no 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, e a seleção final é normalmente feita com base em diferentes critérios, considerando suas características físicas e intangíveis, como os aspectos voltados à sustentabilidade. Conforme Callister (2020), são raros os materiais que atendem por completo os critérios de um projeto, sendo comum abdicar de uma característica por outra, como selecionar uma matéria prima de menor desempenho mecânico, mas biodegradável.

No binômio design e sustentabilidade, a escolha de materiais e processos produtivos são vistos como etapas essenciais para mitigar impactos ambientais, seja pela redução do descarte, menor uso energético ou replanejamento do ciclo de vida de produtos (Manzini e Vezzoli, 2016). No âmbito da sustentabilidade ambiental, a MA é apontada como vantajosa sob a manufatura tradicional, visto que a construção do artefato se dá deposição do material somente nas áreas necessárias, sem desperdício. Entretanto, existem questionamentos sobre a viabilidade da produção pela tecnologia, ressaltando-se a utilização de materiais dificilmente recicláveis ou reciclados nos modelos desenvolvidos, além das peças com falhas, que acarretam resíduos não planejados.

A partir da compreensão dos processos de manufatura por extrusão de material e fotopolimerização de resina, no presente artigo tem-se a intenção de discorrer sobre alguns materiais empregados nos dois processos, comparando-os entre si através da realização de ensaios de tração e levantamentos bibliográficos. A partir dos resultados, tem-se como objetivo observar aspectos de resistência mecânica, propriedade que é um fator importante para a longevidade e ciclo de vida de produtos.

1. **Impressão 3D**

A Manufatura Aditiva começou a ser desenvolvida a partir do final do século XX, como resultado de pesquisas sobre topografia e fotoescultura (Volpato; Carvalho, 2017). A tecnologia consiste na produção de artefatos a partir da adição de camadas, que podem ser executadas por diferentes métodos e materiais. As máquinas de manufatura aditiva, comumente conhecidas como impressoras 3D, possuíam alto custo de aquisição quando começaram a ser desenvolvidas, o que fez com que a popularização da tecnologia ocorresse majoritariamente a partir do momento em que as patentes expiraram, ocasionando, consequentemente, a comercialização por preços mais baixos (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

Este método produtivo permite a fabricação de produtos de forma automatizada e relativamente rápida, amplamente utilizada no desenvolvimento de protótipos, com possibilidades de produção de geometrias complexas sem necessidade de cola ou elementos extras (Volpato; Carvalho, 2017). Dentre os sete tipos de Manufatura Aditiva, a extrusão de material é o método mais popularmente utilizado (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A tecnologia de extrusão de material (FDM) consiste em um filamento termoplástico inserido em um bico extrusor que aquece, derretendo o polímero, e constrói camadas pela deposição do material, em estado pastoso, no eixo cartesiano, sob uma plataforma (Volpato, 2017). Nesse processo, destaca-se a necessidade de haver pressão no bico, aplicada sob o material sendo extrudado, a fim de garantir precisão no diâmetro de saída do filamento. Outro ponto importante para garantir a assertividade da impressão é que o material depositado não se solidifique tão rapidamente, de forma que consiga aderir à camada anterior e superior (Volpato, 2017; Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

A fotopolimerização em cuba compreende um processo relativamente diferente, porque utiliza resinas líquidas e constrói as camadas a partir da solidificação do material. Existem alguns métodos de se 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 possui a vantagem de ser mais rápido, já que toda a camada é formada ao mesmo tempo (Gibson, Rosen, Stucker; 2015), e possui melhor acabamento superficial (Ahrens, 2017).

Os materiais empregados na impressão 3D são majoritariamente polímeros, sendo que, enquanto a extrusão de material fundido utiliza termoplásticos, a fotopolimerização em cuba é realizada com resinas que são polimerizadas com a incidência da luz e se tornam materiais termofixos. Os autores Gibson, Rosen e Stucker (2015) destacam a existência de materiais elaborados especificamente para os processos de manufatura aditiva, ressaltam, contudo, 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 diversos usos, podendo ser aplicada como uma ferramenta para o desenvolvimento de produtos, como por exemplo na execução de peças matrizes para moldes em joalheria. Além de ter relevância como recurso de prototipagem, que foi sua aplicação primordial, vem se, destacando na execução de produtos finais (Ford, Despeisse; 2016). A escolha do processo de manufatura aditiva 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 e acabamento superficial da impressão (Gibson, Rosen, Stucker; 2015). É relevante que o indivíduo que trabalha com esses equipamentos conheça as variáveis que configuram a operação e os materiais disponíveis na execução dos projetos, visto que, apesar do potencial sustentável da impressão 3D, o uso equivocado dessa tecnologia pode acarretar um cenário alternativo, menos ecoeficiente (Sallenave et al., 2020), devido ao desperdício de material e geração de resíduo.

1. **Propriedades mecânicas na seleção de materiais e tecnologias**

A seleção de materiais é uma etapa importante do desenvolvimento de produtos, em que 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; Barauna; Razera; Heemann, 2015). Sendo assim, a escolha dos materiais não só possibilita a funcionalidade técnica do produto, como também sua personalidade (Ashby; Johnson, 2014). Conforme Ashton et al. (2016), a relação entre designers e o processo de seleção de materiais evoluiu, principalmente, devido ao desenvolvimento de novas tecnologias e processos que asseguraram a liberdade criativa dos profissionais, como é o caso dos polímeros e o processo de Impressão 3D.

Contudo, a sustentabilidade ambiental do produto não depende apenas do material escolhido, mas ainda é um fator bastante relevante. A avaliação do impacto da escolha de um material pode ser observada pela extração da matéria prima, método de manufatura e no nível de complexidade de degradação ou de recuperação do material após o uso (Manzini; Vezzoli, 2016). A resistência mecânica dos materiais é outro ponto, que pode ditar a durabilidade de um produto e, de acordo com Groover

[...] 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, 2017, tradução nossa).

Presentes em uma ampla gama de produtos, os polímeros são materiais leves e de baixo custo, que se popularizaram no século passado, inovando em possibilidades de manufatura e aplicações, e hoje fazem parte do cotidiano de todos. Com aparência versátil, são capazes de mimetizar outros materiais, como madeiras, metais e vidros (Ashby; Johnson, 2014). Por outro lado, os polímeros não são tão resistentes mecânica e termicamente (Lima, 2006), além de apresentarem, em geral, difícil degradabilidade, o que tem levantado preocupações acerca das implicações ambientais que causam.

Os polímeros costumam ser produzidos a partir de matérias-primas provenientes do petróleo, uma fonte não renovável e de extração bastante poluente. Eles podem ser naturais ou sintéticos e, segundo Ashby e Johnson (2014), podem ser divididos em termoplásticos, termofixos e elastômeros. Os termoplásticos podem ser mecanicamente reciclados subsequentes vezes através da aplicação de calor e pressão, enquanto os demais se degradam e queimam nessas mesmas condições (Canevarolo; Sebastião, 2006).

Ambos os materiais, termoplásticos e 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 as impressoras MSLA utilizam resinas termofixas líquidas, que se enrijecem através da fotopolimerização das camadas. Para as duas tecnologias, existe a possibilidade de utilização de polímeros chamados *plant-based* ou bio-*based*, que, diferente daqueles provenientes da extração do petróleo, se originam de fontes renováveis. Isso, entretanto, não significa necessariamente que esses materiais sejam biodegradáveis (EEA, 2020).

* 1. Termoplásticos *Plant-based*

A impressão de filamento, ao utilizar polímeros termoplásticos, apresenta a possibilidade de reciclagem de rebarbas da impressão, impressão com falhas e até mesmo do artefato produzido. Apesar disso, não necessariamente a reciclagem será efetivamente realizada, já que depende de fatores logísticos como o descarte em local adequado (Silveira, 2021).

Existe uma parcela de polímeros termoplásticos provenientes de fontes renováveis, como o milho, cana-de-açúcar, celulose, quitina, amido, açúcar e óleos vegetais (Brito; Araujo; Mélo, 2011; Enders; Siebert-Raths, 2011). O melhor desempenho no quesito sustentabilidade ambiental desses materiais com relação àqueles obtidos através do petróleo depende ainda das condições de extração, aplicação e ciclo de vida do material (EEA, 2020; apud EEA, 2018). É importante, entretanto, atentar-se que existe uma diferença entre polímeros provenientes de fontes renováveis e os biodegradáveis, sendo que, mesmo nos derivados do petróleo, uma pequena parcela pode ser passível de biodegradação (Enders; Siebert-Raths, 2011; EEA, 2020), como por exemplo a policaprolactona – PCL (Lefteri, 2017).

Como exemplos de polímeros bio-based, os autores Enders e Siebert-Raths (2011) salientam a Parkesina e o látex natural, primeiros materiais poliméricos que surgiram e eram provenientes de fontes renováveis. Atualmente é possível destacar os polihidroxialcanoatos - PHA e o poli(ácido láctico) - PLA (Brito; Araujo; Mélo, 2011), sendo o último o mais importante em termos de volume de aplicações.

* 1. Resinas termofixas *Plant-based*

Polímeros termofixos são materiais que não derretem sobre a influência de calor, em sua maioria também costumam ser provenientes do petróleo e são polimerizados através de aquecimento uma única vez, ou, como é o caso das resinas de impressão 3D, enrijecem através da incidência de luz UV. Sendo exemplos as resinas de poliuretano, poliésteres, fenóis, epóxis e silicones (Ashby; Johnson, 2014). Conforme Silveira (2021), em termos de recuperação do material após o uso, termofixos não tem possibilidade de serem reciclados da mesma forma que os termoplásticos.

Os termofixos *plant-based* também são derivados de fontes renováveis, os autores Enders e Siebert-Raths (2011), em contrapartida, ressaltam seu baixo volume de utilização, mas trazem como exemplos a queratina, seda e caseínas. Na impressão 3D a disponibilidade de resinas plant-based é também bastante escassa, sendo as mais populares: eSun eResin-PLA, que utiliza monômeros de PLA, Elegoo *Plant-based Photopolymer Resin*, feita principalmente de óleo de soja e a AnyCubic *Plant-based* UV *Eco-Resin*, que também é proveniente do óleo de soja (O'Neill, 2024).

A partir do exposto, na presente pesquisa o objetivo é discutir propriedades de tração como um elemento para a sustentabilidade, por meio do ensaio de tração com corpos de prova feitos em impressão 3D, a fim de comparar os materiais poliméricos corriqueiramente utilizados nas impressões em filamento e seus paralelos em resina.

1. **Materiais e Métodos**

Para as discussões acerca da resistência mecânica dos materiais, foram produzidos corpos de prova - CP a partir dos filamentos mais populares aplicados à impressão 3D e seus paralelos em resina, que foram posteriormente submetidos ao ensaio de tração para compreender seu ponto de tensão máxima e comportamento até a ruptura.

Quadro 1: Parâmetros de impressão dos corpos de prova.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Parâmetros de impressão** | | | | |
|  | **PLA** | ***Plant-Based*** | **ABS** | **ABS *Like+*** |
| Tipo de material | Filamento | Resina | Filamento | Resina |
| Temperatura do bico | 205ºC | - | 235ºC | - |
| Tempreatura da mesa | 60ºC | - | 90ºC | - |
| Preenchimento | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Tipo de preenchimento | Cubic | - | Cubic | - |
| Velocidade do bico | 0,07m/s | - | 0,08m/s | - |
| Altura da camada | 0,28mm | 0,05mm | 0,28mm | 0,05 |
| Tempo de exposição | - | 2,7s | - | 2,7s |
| Intensidade da luz | - | 100% | - | 100% |

Fonte: Autores.

Os corpos de prova para os ensaios foram produzidos a partir dos parâmetros de cada tecnologia, conforme informa o **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, enquanto a impressão por fotopolimerização de resina líquida exige parâmetros focados na exposição à luz, que é responsável pela polimerização (endurecimento) da matéria. Para ambas as tecnologias, é necessário informar a altura de camada desejada, que para esse estudo, foram configuradas na menor altura possível, que acarreta numa melhor definição da forma, além do preenchimento em 100%, que desempenha melhor resistência mecânica do que peças com menor preenchimento (Volpato, 2017; Meri et al., 2018).

* 1. **Filamento de Poli(ácido láctico) – PLA**

O filamento de poli(ácido láctico) - PLA é obtido pela síntese do ácido láctico presente em diversas fontes renováveis de amido, como milho e cana-de-açúcar, sendo amplamente aplicado por conta de sua facilidade de impressão, baixas temperaturas para processamento e boa adesão à mesa de base da impressora. Esse material é um polímero termoplástico, ou seja, deforma-se sob aplicação de temperatura, sendo essa uma característica fundamental para o processo de impressão 3D por filamento fundido (Upadhyay et al., 2020 e Sallenave, 2022).

* 1. **Filamento de Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS**

O filamento de ABS, polímero obtido a partir do petróleo, é reconhecido pelo seu baixo custo e boas propriedades mecânicas, como resistência ao impacto e a altas temperaturas, resultando em peças de vida útil mais longa (Zur et al, 2020). Todavia, quando comparado a outros filamentos, notam-se algumas desvantagens em sua utilização, como a necessidade de impressoras com mesa aquecida e isolamento térmico (máquinas fechadas), pois o material é mais suscetível a empenamentos durante a impressão, causando irregularidade que podem condenar a peça ao descarte (Besko et al, 2017).

* 1. **Resina *AnyCubic Plant-Based UV Eco-Resin***

Conforme a Anycubic (2024), fabricante da *Plant-based UV* *Eco-Resin*, a resina a base de plantas utiliza extrato de grãos de soja como matéria-prima, considerando essas seguras para o meio ambiente. A resina em questão é sensível a ondas de 355nm a 405nm, sendo o material livre de odores químicos que possam causar desconforto ou irritação à pele, aplicável a qualquer espaço, inclusive ambientes fechados e sem ventilação. Na plataforma online do fabricante, não há menções acerca da resistência mecânica das peças finalizadas.

* 1. **Resina *ABS-Like Resin+***

A resina ABS-*Like Resin*+, conforme a descrição do fabricante, possui excelente resistência à tração, com equilíbrio entre resistência e dureza, propriedades obtidas pela adição de poliuretano acrilato - PUA. Com longo prazo de validade e sensibilidade a ondas de comprimentos entre 365 e 405nm, a resina em questão possui odor mais leve quando comparada a outras resinas. Conforme as indicações do fabricante, após a impressão, as peças devem ser limpas com Etanol, Ácido Láctico ou Álcool Isopropílico (Anycubic, 2024).

* 1. **Ensaio de tração**

O ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração em um corpo de prova, tendendo a esticá-lo, até sua ruptura. Neste ensaio, mede-se o limite de resistência à tração (Garcia, Spim e Santos, 2012), sendo essa uma informação pertinente no processo de seleção de materiais. Para o ensaio, utilizou-se a ASTM D638, normativa que rege os ensaios de tração em polímeros e resinas.

1. **Resultados e discussões**

A partir dos ensaios de tração, foi possível comparar os resultados dos filamentos em PLA e ABS e seus paralelos em resina *Plant-based UV Eco-Resin* e *ABS-Like Resin+*, respectivamente. No filamento PLA (**figura 1**), o corpo de prova teve ruptura muito próxima a sua tensão máxima (~42N/mm2), enquanto a resina *Plant-based UV Eco-Resin* (**figura 2**) apresentou ruptura junto ao ponto de tensão máxima (~40N/mm2), mostrando-se uma alternativa menos resistente.

Interface gráfica do usuário, Aplicativo, Tabela, Excel

O conteúdo gerado por IA pode estar incorreto.

**Figura 1: a) Ensaio de tração do PLA em filamento; b) Ruptura do corpo de prova do material. Fonte: elaborado pelos autores.**

Interface gráfica do usuário, Aplicativo, Tabela, Excel

O conteúdo gerado por IA pode estar incorreto.

**Figura 2 - a) Ensaio de tração da *Plant-based* UV *Eco-Resin*; b) Ruptura do corpo de prova do material. Fonte: elaborado pelos autores.**

Para o filamento ABS e resina ABS *Like+*, ambos materiais tiveram sua tensão máxima em aproximadamente 42N/mm2, mas com comportamentos de rupturas distintos. Enquanto o corpo de prova impresso em resina apresentou desempenho frágil, sem deformação plástica (**figura 3**), o filamento ABS deformou-se a partir do descolamento das camadas, sem ruptura clara, como observa-se na **figura 4**.

Gráfico

O conteúdo gerado por IA pode estar incorreto.

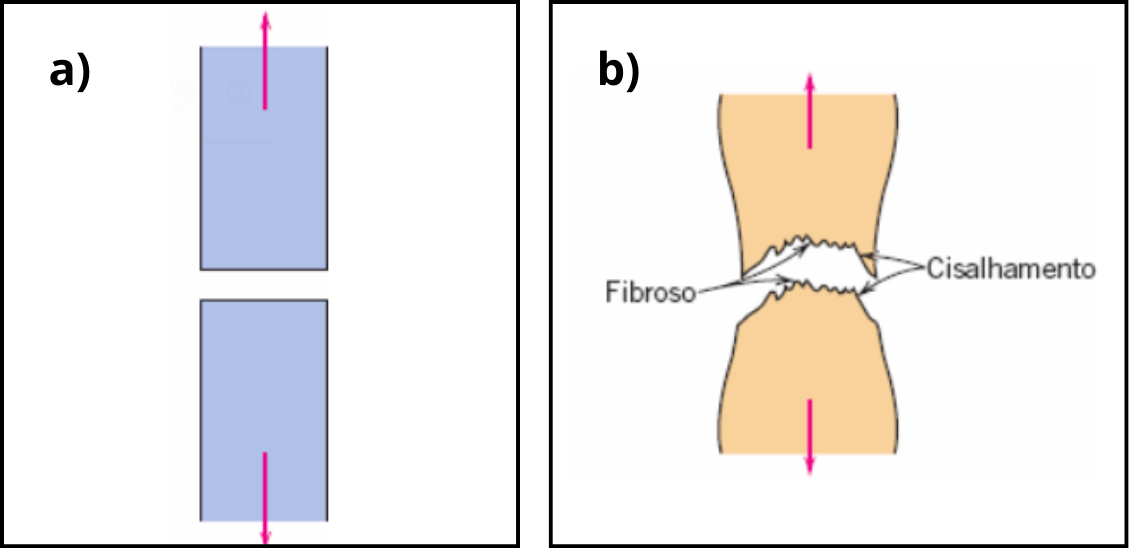
**Figura 3 - a) Ensaio de tração da resina ABS-*Like Resin*+ ; b) Ruptura do corpo de prova do material. Fonte: elaborado pelos autores.**

Aplicativo

O conteúdo gerado por IA pode estar incorreto.

**Figura 4 - a) Ensaio de tração do filamento ABS ; b) Ruptura do corpo de prova do material. Fonte: elaborado pelos autores.**

A partir dos testes de tração, percebeu-se que a tensão máxima de todas as amostras ficou próxima a 42 N/mm², independente do material. A partir das contribuições de Callister (2020) para análise de fraturas, observa-se que as amostras de resina apresentaram comportamento característico de materiais frágeis, sem deformação plástica. O mesmo ocorre nos corpos de prova produzidos por impressão 3D em filamento, mas com características fibrosas (Figura 5), onde observa-se o rompimento das camadas, aspecto consequente do tipo de impressão.



**Figura 5 - a) Ilustração de ruptura frágil; b) Ilustração de ruptura fibrosa. Fonte: Adaptado de Callister (2020).**

Julga-se então que, para a impressão em resina, as propriedades mecânicas das peças produzidas são inerentes ao material escolhido, enquanto na impressão por extrusão de material as configurações exercem influência direta sobre as propriedades mecânicas, principalmente a resistência à tração, sendo a orientação das camadas, altura de camada e preenchimento do artefato os fatores de maior influência (Volpato, 2017; Meri et al., 2018).

1. **Considerações finais**

Diante deste estudo, compreendeu-se que a sustentabilidade pode desempenhar um papel central na escolha de materiais, considerando o impacto da extração da matéria-prima, biodegradabilidade e possibilidade de recuperação. Esses critérios devem ser tratados com o mesmo grau de importância no processo projetual, equilibrando-os com a necessidade de resistência mecânica dos materiais. Uma escolha adequada contribui para a otimização de recursos, enquanto uma seleção equivocada de materiais e/ou processos pode resultar na geração de resíduos desnecessários.

Sob essa perspectiva, observou-se que, frente aos avanços nas diferentes tecnologias de manufatura aditiva e insumos disponíveis, a seleção de materiais constitui uma etapa essencial para decisões mais sustentáveis. O mesmo se aplica às configurações dos parâmetros de impressão: peças com preenchimento total apresentam melhor resistência mecânica em comparação com aquelas de menor preenchimento. No entanto, é importante destacar que nem todos os projetos demandam essas propriedades.

Como constatado, a seleção de materiais é multifatorial e deve ser adequada conforme a finalidade do projeto. A partir do **Quadro 2**, que compila os principais aspectos de sustentabilidade encontrados durante o estudo, elenca-se os materiais PLA e *Plant-based UV Eco-Resin* como os de menor impacto na extração de matéria prima, destacando 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, mas que acarreta a geração de gases tóxicos durante a queima.

Quadro 2: Aspectos de sustentabilidade dos materiais estudados.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Aspectos de sustentabilidade dos materiais estudados** | | | | |
|  | **PLA** | ***Plant-Based*** | **ABS** | **ABS *Like*+** |
| Origem | Vegetal | Vegetal | Petróleo | Petróleo |
| Tensão máxima | 42N/mm² | ~38 N/mm² | 42N/mm² | ~42N/mm² |
| Tensão de ruptura | ~38 N/mm² | ~38 N/mm² | - | ~36 N/mm² |
| Reciclabilidade mecânica | Sim (termoplástico) | Não (termofixo) | Sim (termoplástico) | Não (termofixo) |
| Biodegrabilidade | Sim | Não | Não | Não |

Fonte: Autores.

Com base nos resultados dos ensaios de tração realizados com filamentos de PLA e ABS, bem como com resinas *Plant-based UV Eco-Resin* e *ABS-Like Resin+*, verificou-se que a resistência à tração dos materiais é bastante semelhante. Contudo, nos dois cenários analisados, os materiais de base vegetal apresentaram desempenho inferior, rompendo logo após atingir sua tensão máxima. Nos materiais de base petróleo a resina *ABS-Like Resin+* apresentou desempenho superior, com leve deformação depois da tensão máxima. Já no filamento ABS, não foi possível observar uma ruptura clara, apenas descolamento de camadas, o que sugere que essa seja uma alternativa mais viável diante os aspectos de resistência mecânica.

Para peças sujeitas a esforço mecânico, entre os materiais estudados, o filamento ABS e resina ABS-Like Resin+ destacam-se como alternativas de melhor desempenho. Entretanto, em projetos de viés sustentável, nos quais a extração matéria prima e biodegradabilidade têm maior valor que as propriedades mecânicas, o filamento PLA e a resina Plant-based UC Eco-Resin mostram-se alternativas mais adequadas, reforçando que a seleção dos materiais e tecnologias de impressão devem estar alinhadas com os objetivos projetuais.

1. **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil.

**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: Editora Blucher, 2017. *E-book.* (401 p.) ISBN 9788521211518. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/. Acesso em: 28 set. 2024.

ANYCUBIC. **Anycubic ABS-Like Resin.** Disponível em: https://store.anycubic.com/collections/abs-like-resin/products/anycubic-abs-like-resin. Acesso em: 1 out. 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. et al. DESIGN, MATERIAIS E SUSTENTABILIDADE: MICRONIZAÇÃO DE PRODUTO MULTI-MATERIAL VISANDO SUA RECICLAGEM. **DAPesquisa**, v. 10, n. 14, p. 145–162, 19 fev. 2016.

ASHBY, M; JOHNSON, K. **Materials and Design:** The Art and Science of Material Selection in Product Design. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 2014. 389 p. ISBN: 978-0-08-098205-2.

**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.

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, 30 dez. 2015.

BRITO, G, F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.6.2. 2011. p. 127-139. ISSN 1809‐8797. Disponível em: [remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/view/222/204](http://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/view/222/204). Acesso em 13 ago 2024.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. *E-book.* p.456. ISBN 9788521637325. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637325/. Acesso em: 08 nov. 2024.

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.

ENDRES, H-J; SIEBERT-RATHS, A. **Engineering Bio-polymers** – Markets, Manufacturing, Properties and Application. Munique: Carl Hanser Publishers, 2011. Ebook (675 p.) ISBN: 978-3 446-42403-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9783446424036/engineering-biopolymers>. Acesso em 13 ago 2024.

FACCA, C. A. et al. 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. Editora Blucher, 2022. p. 275–306.

FORD, S; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal of Cleaner Production**, 2016, v. *137*, p. 1573–1587.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies:** 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2 ed. Nova York: Springer, 2015. Ebook (498 p.). Disponível em: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-2113-3#back-to-top. Acesso em: 04 nov. 2024.

GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura**. v.2. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

LIMA, M. A. **Introdução aos Materiais e Processos Para Designers**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2006. v. 1.

MANZINI, E; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis:** os requisitos ambientais dos produtos industriais. São Paulo: Edusp, 2016.

MERI, B. et al. **MANUFATURA ADITIVA:** UMA REVISÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D DE MATERIAL ASA NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO. I Simpósio Gaúcho de Engenharia Aeroespacial e Mecânica. **Anais**...2022.

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 Simulated Marine Environment. **Surfaces and Interfaces**, v. 21, 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: Editora Blucher, 2017. *E-book.* (401 p.) ISBN 9788521211518. 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: Editora Blucher, 2017. *E-book.* (401 p.) ISBN 9788521211518. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/. Acesso em: 28 set. 2024.

SALLENAVE G. **Análise da degradação do PLA em ambiente marinho simulado.** Orientador: Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido. 2022. Dissertação (Mestrado) - PGDESIGN, 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. et al. 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 – Volume 3*. Porto Alegre: Marcavisual, 2020. cap. 13, p. 244-258. E-book. Disponível em: https://www.ufrgs.br/iicd/publicacoes/livros. Acesso em: 15 nov. 2024

SILVEIRA, Augusto Lima da. **De volta ao ciclo:** tecnologias para a reciclagem de resíduos. 1. ed. Curitiba: Intersaberes, 2021. *E-book*. Disponível em: https://plataforma.bvirtual.com.br. Acesso em: 21 nov. 2024.