



ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA ENVELHECIDOS POR AMBIENTE NATURAL

CAMPOS, E.S.¹ estherdscampos@gmail.com

TINOCO, G.O.¹ gust4v0livera9@gmail.com

CARVALHO, J.V.M.¹ mendesvictor99@hotmail.com

REZENDE, V.A.¹ Vinicius-andrade7@hotmail.com

NETO, J.S.S.^{1,2} Jorge.neto@iff.edu.br

SANTOS, W. A.^{1,3*} wallan.santos@iff.edu.br

¹ - Instituto Federal Fluminense (IFF), Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Cabo Frio, Estr. dos Búzios, Cabo Frio - RJ, 28293-660

² - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET RJ), PPEMM, Rio de Janeiro, Av. Maracanã, 229 – Maracanã, Rio de Janeiro

³ - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

*autor correspondente: wallan.santos@iff.edu.br

RESUMO

O presente estudo investigou a degradação de materiais impressos em 3D com filamentos de ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e PLA (Ácido Polilático) devido à exposição à radiação UV e fatores ambientais. Ensaios de tração e flexão foram realizados em corpos de prova em três etapas: análise inicial, após 504h horas e após 1008 horas de exposição ambiental. Os resultados indicaram que tanto o ABS quanto o PLA sofrem degradação significativa, porém em diferentes graus. O PLA apresentou maior resistência mecânica inicial, mas maior sensibilidade à radiação UV, enquanto o ABS, embora com menor resistência inicial, teve uma degradação menos acentuada. As conclusões são importantes para a indústria de impressão 3D, sugerindo a necessidade de considerar a durabilidade dos materiais em condições ambientais reais. Pesquisas futuras podem explorar tratamentos de superfície ou aditivos que aumentem a resistência desses materiais à radiação UV e outros fatores ambientais.

Palavras-chave: Degradação, Impressão 3D, Propriedades Mecânicas, Radiação UV.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (AM), conhecida como impressão 3D iniciou na década de 70, e as primeiras patentes surgiram na década de 80 (1). Ao longo do tempo, diversos processos de manufatura aditiva foram criados, como por exemplo, FDM (Modelagem de Deposição Fundida); SLA (Estereolitografia); DLP (Processo de luz digital); SLS(Sinterização seletiva a laser); DMLS (Sinterização a laser de metal direto); SLM (derretimento seletivo a laser); EBM (Derretimento de feixe de elétrons); MJF (Multi Jet Fusion); PolyJet (Injeção de resina em gota), assim cada um desses processos apresentam características próprias de impressão (2).

Além disso, cada processo de manufatura aditiva possibilita a fabricação de objetos tridimensionais por meio da construção gradual camada por camada, um método facilitado pela modelagem computacional avançada. Entre esses processos, a Modelagem por Deposição Fundida (FDM) é o mais amplamente utilizado. Este método se destaca por sua acessibilidade e versatilidade, sendo a escolha preferida para uma variedade de aplicações.

Uma vantagem essencial desta técnica é a capacidade de fabricar itens com geometrias complexas e características distintivas que não são possíveis por técnicas convencionais de fabricação (usinagem, fundição e soldagem). As informações para a modelagem da peça são obtidas a partir de um modelo geométrico 3D produzido em um sistema CAD (Computer-Aided Design - Desenho Assistido por Computador) (3).

As aplicações deste processo tem um impacto significativo em diversos setores, como automotivo, aeroespacial, medicina e customização. No setor automotivo, ela permite a criação de peças complexas e protótipos rápidos, enquanto no setor aeroespacial, é utilizada para fabricar componentes leves e resistentes. Na medicina, a impressão 3D facilita a produção de próteses personalizadas e modelos anatômicos para planejamento cirúrgico. Além disso, na customização, ela possibilita a criação de acessórios únicos, joias e objetos de decoração com alta precisão e detalhamento (4-6). As peças podem ser fabricadas por metais, cerâmicos e materiais poliméricos. A seleção do processo de impressão 3D requer uma compreensão das vantagens e desvantagens para cada tipo de processo (7). Entre as principais vantagens da manufatura aditiva, destacam-se a facilidade de personalização e customização, oferecendo aos usuários a capacidade de criar

produtos sob medida para atender às necessidades específicas. Além disso, a tecnologia proporciona uma maior liberdade no design. Outro benefício importante é a produção de peças únicas, o que é particularmente vantajoso para prototipagem e itens personalizados. Por fim, a manufatura aditiva contribui para a redução do desperdício de materiais, utilizando apenas a quantidade de material necessária para cada objeto. Por outro lado, as principais desvantagens são: tamanho de impressão limitado em algumas máquinas, acabamento superficial e problemas de adesão entre camadas para produção de multimateriais (8).

Em qualquer área de aplicação dos materiais 3D é fundamental compreender as propriedades mecânicas do mesmo, tendo em vista que fatores como a resistência a tração e compressão, ductilidade e a tenacidade por exemplo, influenciam diretamente na estrutura final do material. Além disso, os parâmetros de impressão são importantes para atingir determinada propriedade, como por exemplo, infil, velocidade de impressão, raster entre outros (9).

Outro ponto importante a se observar quanto à estrutura e formação de materiais 3D, é a degradação do mesmo. Segundo Maria et al. (10) esse fator diz respeito à deterioração ou alteração da propriedade física, química ou mecânica do material com o passar do tempo, podendo ser ocasionado por fatores ambientais, umidade, temperatura, fadiga e etc. Além disso, o envelhecimento em materiais impressos ocorre de diferentes formas, variando pela composição da peça. Esse tipo de fenômeno pode gerar falhas estruturais prematuras, comprometer o uso e diminuir a vida útil do componente. Santana, et al. (11) afirma que o domínio a respeito de tais processos de degradação em materiais 3D é fundamental para que se faça a seleção correta dos elementos no momento da produção e que se usem estratégias de proteção e conservação correta, visando preservar ao máximo a estrutura do material e prolongar o seu tempo de uso.

Diversos pesquisadores tem estudado diversos tipos de envelhecimento em AM. Sedlak et al. (12), investigou os fatores de degradação nas propriedades mecânicas dos materiais fabricados por tecnologia FDM. Os materiais estudados foram PLA (Polylactic Acid), ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) e ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate). As amostras sofreram quatro tipos de efeitos de degradação: umidade, temperatura, radiação por ultravioleta (UV) e água gelada. Para o processo de degradação por

radiação por UV, os materiais ficaram 20h e 100h expostos por lâmpada de mercúrio. Os autores relataram que o efeito da degradação apresenta mudança nas propriedades e característica após o processo de exposição. Já Amza et al.(13), estudou o efeito da aceleração da radiação ultravioleta em materiais impressos por FDM. Os materiais estudados foram o PLA e PETG, e os corpos de prova ficaram expostos por 24h utilizando lâmpadas UV-B. Os autores mostraram que o processo de degradação por UV não alterou a rigidez dos materiais impressos, entretanto a resistência mecânica e o alongamento apresentaram diminuição significativa para o PETG quando comparado com o PLA. Por outro lado, Lee et al.(14), investigaram a influência da reciclagem sucessiva de filamentos de ácido polilático (PLA) utilizados em processo de impressão 3D, sobre suas propriedades mecânicas e dos objetos impressos. As resistências mecânicas do PLA impresso e as resistências de adesão entre as camadas impressas em 3D foram avaliadas por meio de testes de tração. Os autores identificaram que a reciclagem mecânica desse filamento induz uma degradação ativada termicamente, reduzindo assim o peso molecular do polímero a cada ciclo sucessivo, causando a diminuição da resistência mecânica do filamento, resultando na cisão das cadeias do PLA e na degradação das propriedades mecânicas do produto fabricado.

Dessa forma, o objetivo deste artigo é investigar a degradação causada pela exposição à radiação ultravioleta (UV) e a fatores ambientais em materiais produzidos através da tecnologia de impressão 3D. Sendo assim, no presente trabalho será analisado como o envelhecimento em ambiente natural afeta as propriedades físicas e mecânicas dos materiais ABS e PLA.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e Parâmetros de impressão

Os materiais utilizados na pesquisa foram os filamentos de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e políácido láctico (PLA) fabricados pela empresa GTMAX3D.

Para impressão dos corpos de prova utilizou os seguintes parâmetros de impressão para cada tipo de material:

- ABS, os parâmetros foram: i) Altura de camada: 0,2mm; ii) velocidade de impressão: 90mm/s; iii) Temperatura de mesa: 105°C; iv) Temperatura de impressão: 235°C; v) infil: 100% e vi) preenchimento retilíneo;
- PLA, os parâmetros foram: i) Altura de camada: 0,2mm; ii) Velocidade de impressão: 90mm/s; iii) Temperatura de mesa: 80°C; iv) Temperatura de impressão: 215°C; v) infil: 100% e v) preenchimento retilíneo;.

Os corpos de prova foram impressos em uma impressora 3D PRO da marca GTMAX3D modelo CORE A1V2, localizado no laboratório IFFMAKER (Instituto Federal Fluminense) do campus Cabo Frio, Rio de Janeiro como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Impressora 3D- GTMAX.



Os corpos de prova foram separados de acordo com as normas dos ensaios mecânicos e pesados para cada tipo de material, conforme a Tabela 1 e 2:

Tabela 1 - Massa (g) dos corpos de prova de tamanho ASTM D790:

ABS	PLA
7,12 ± 0,5	7,41 ± 0,38

Tabela 2 – Massa (g) dos corpos de prova de tamanho ASTM D3039:

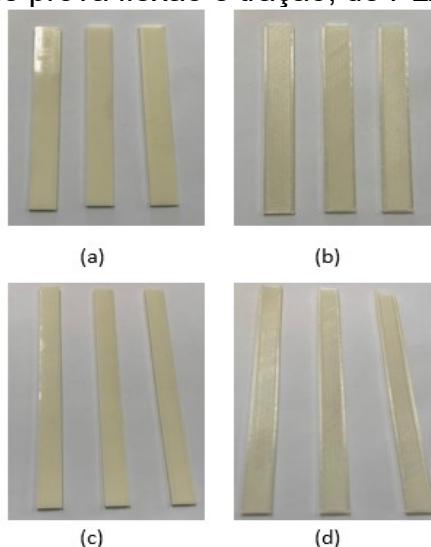
ABS	PLA
9,55±0,34	9,73±0,51

2.2 Produção de corpos de provas

Para cada ensaio foram separados 4 corpos de prova seguindo as dimensões dos ensaios de tração (ASTM D3039) – 3mm x 12,7mm x 229mm e flexão (ASTM D790) – 3mm x 15 mm x 144mm. A Figura 2 (a,b) mostram os cps impressos dos ensaio de flexão e a figura 2(c,d) mostram os cp's impressos de tração, conforme a

norma. Por fim, os casos estudados foram: Controle (ABS e PLA), ENV-3 (Envelhecido por 504h) e ENV-6 (Envelhecido por 1008h).

Figura 2- Corpo de prova flexão e tração, de PLA (a,c) PLA (b, d).



2.3. Envelhecimento

O processo de envelhecimento das amostras foi segmentado em 3 etapas: a primeira etapa os corpos de prova foram ensaiados antes de serem expostos ao tempo. Já os corpos de prova expostos ao ambiente foram divididos em dois grupos, um grupo ficou exposto ao tempo por 504h e outro por 1008 horas. Essas materiais ficaram expostos na localidade do Instituto Federal Fluminense –Campus Cabo Frio, e ao longo de todo o período de exposição, foi monitorado as condições climáticas durante esse tempo (Temperatura, tempo e umidade) . A Figura 3 mostra o local onde os cps foram expostos ao tempo.

Figura 3 - Corpos de provas expostos ao tempo.



2.4. Testes

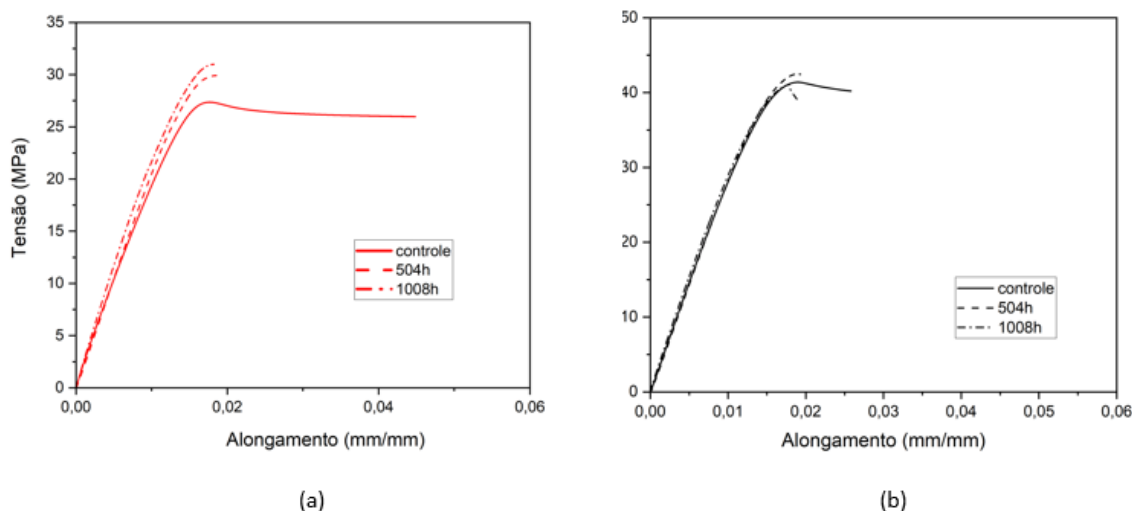
Os testes de tração e flexão foram ensaiados no equipamento universal Instron 5966 (Norwood, Massachusetts, USA), localizado no laboratório de adesão e compósitos (Lades) no Cefet-rj, Rio de Janeiro, Brasil. O teste de tração seguiu a norma ASTM D 3039 com velocidade de 1mm/min usando uma célula de carga de 10kN. Para o ensaio de flexão do tipo três pontos foi utilizado um span de 120mm, e velocidade de 1 mm/min utilizando uma célula de carga de 1kN seguindo a norma ASTM D790.

3. RESULTADOS

3.1 Teste de Tração

Os gráficos de tração apresentam o comportamento mecânico dos materiais ABS e PLA quando submetidos a uma carga de tração. A Figura 4 a) e b) mostra o gráfico representativo de tensão-deformação em função da exposição do tempo de exposição. A partir dessas curvas foram calculadas as propriedades de tração (resistência à tração e módulo de Young) dos materiais expostos e controle.

Figura 4 -Curvas representativa do ensaio de tração do a) ABS e b) PLA

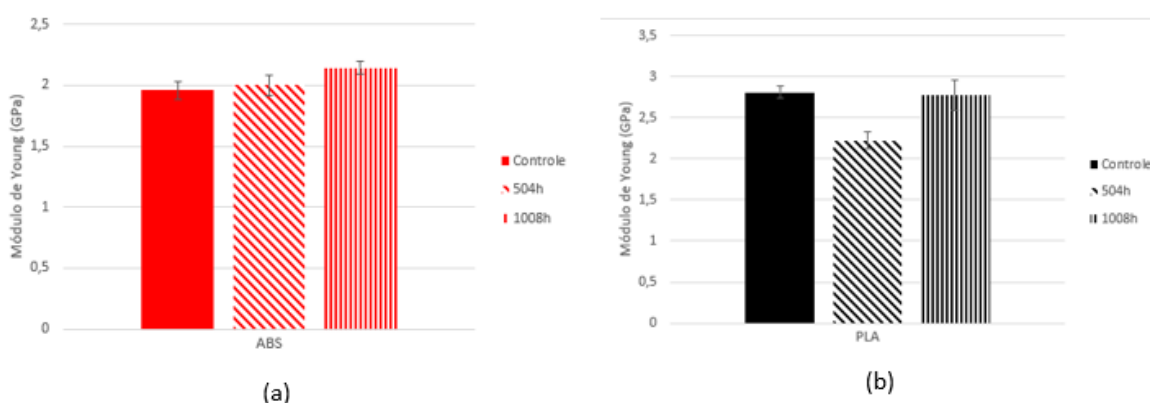


Para o material ABS controle apresentou uma pequena variação na resistência à tração ao longo do envelhecimento do material. O valor encontrado foi de $27,73 \pm 0,35$ MPa para o caso de controle enquanto para o caso de envelhecimento 1008h apresentou valor de $28,82 \pm 2,40$ MPa. Já para o módulo de young o material ABS controle não apresentou mudança significativa em sua rigidez quando comparado com

o material ABS envelhecido por 1008h mostrando valores de $1,95 \pm 0,072$ GPa e $2,14 \pm 0,053$ GPa, como pode ser visto na Figura 5 a).

Sedlak et al.(12), relata que essa o tempo de exposição é importante para averiguar a influência do envelhecimento nos materiais impressos. Já para o material PLA controle apresentou uma estabilidade na resistencia à tração quando comparado com o material PLA envelhecido por 1008h, $41,16 \pm 1,88$ MPa e $40,38 \pm 2,63$ MPa, respectivamente. Além disso, o módulo de young mostrou apresentou uma leve diminuição quando comparamos o PLA controle com o PLA envelhecido por 504h, $2,81 \pm 0,065$ GPa e $2,77 \pm 0,19$ GPa, respectivamente conforme a Figura 5 b). Valerga et al.(15) mostrou que os materiais impressos podem sofrer uma queda na rigidez após à primeira semana de exposição, entretanto os autores mencionam que após a segunda semana pode aumentar a rigidez do material, como visto neste estudo.

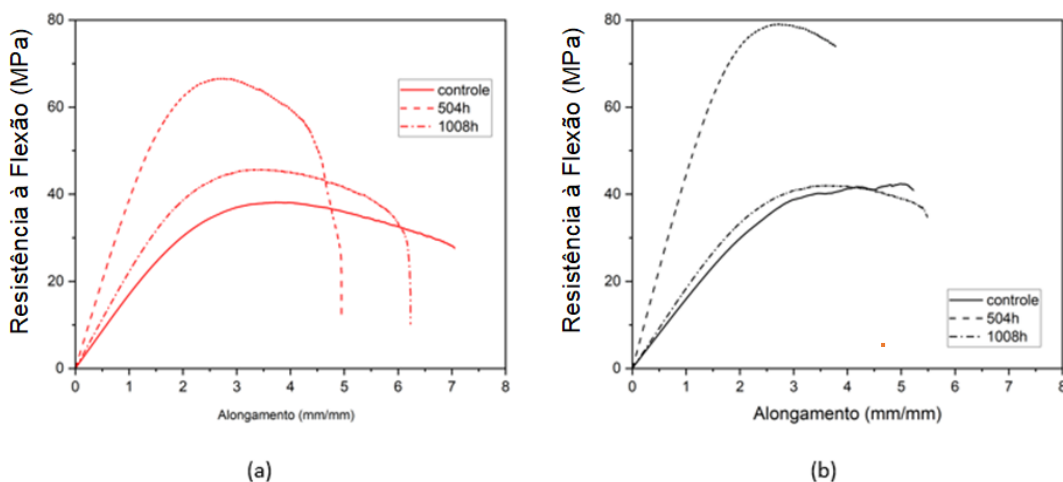
Figura 5 -Gráfico do módulo de young dos materiais a)ABS e b) PLA.



3.2 Teste de Flexão

A Figura 6 a) e b) mostra o gráfico representativo da tensão em função da exposição do tempo de exposição. A partir dessas curvas foram calculadas as propriedades de flexão (resistencia à flexão e módulo de Young) dos materiais expostos e controle.

Figura 6: Curvas representativa do ensaio de flexão do a) ABS e b) PLA.



Para o material ABS envelhecido por 540h e 1008h apresentou um aumento da resistência à Flexão de aproximadamente de 70% e 25% comparado com o ABS controle, respectivamente. Além disso, o módulo de young para o material ABS envelhecido por 540h mostrou um aumento na rigidez de 40% em relação ao ABS controle. Entretanto, o ABS envelhecido por 1008h indicou uma estabilidade na rigidez quando comparado com o ABS controle. Varlega et al.(15), mostrou em seu estudo uma variação ao longo do tempo de exposição para o material ABS não envelhecido.

Já o PLA envelhecido por 540h mostrou um aumento da resistência à Flexão de aproximadamente de 43% comparado com o PLA controle. Além disso, o PLA envelhecido por 1008h indicou uma estabilidade na resistência à Flexão quando comparado com o PLA controle. Mitrovic et al.(16), relatou que após duas semanas de exposição o PLA apresenta um incremento nas propriedades mecânicas de flexão. O módulo de young para o caso PLA envelhecido por 540h apresentou um incremento de 43% na rigidez quando comparado com o PLA controle. Entretanto, o PLA envelhecido por 1008h demonstrou um decaimento de aproximadamente de 15% quando comparado com o PLA controle.

4.CONCLUSÃO

A compreensão da degradação causada pela exposição ambiental é crucial para a seleção adequada dos materiais em aplicações na área de manufatura aditiva, permitindo o desenvolvimento de soluções mais duráveis e eficientes para diferentes setores industriais. O presente estudo investigou a degradação causada pela exposição à radiação ultravioleta (UV) e a fatores ambientais em materiais produzidos por impressão 3D, especificamente utilizando filamentos de ABS e PLA.

Os resultados dos ensaios mecânicos das amostras indicaram que ambos os materiais sofrem considerável degradação quando expostos a radiação UV e condições ambientais adversas, porém em graus diferentes. O PLA demonstrou maior resistência mecânica inicial, mas apresentou maior sensibilidade à degradação por UV em comparação ao ABS, que por sua vez, exibiu menor resistência mecânica inicial, mas uma degradação menos acentuada ao longo do tempo.

Os dados revelados nesse trabalho são relevantes para a indústria e outras áreas que utilizam impressão 3D, como a manufatura aditiva, indicando a necessidade de considerar a durabilidade dos materiais frente à exposição ambiental em aplicações práticas, sendo um fator crítico a ser considerado no desenvolvimento e aplicação de peças impressas em 3D que serão expostas a ambientes externos. Futuras pesquisas podem explorar tratamentos de superfície ou aditivos que melhorem a resistência dos filamentos de ABS e PLA à radiação UV e outros fatores ambientais, contribuindo para o aumento da vida útil e desempenho dos materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RONG, L., et al., The application of 3D printing technology on starch-based product: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 2023. 134: p. 149-161.
2. VOLPATO, N., *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. 2021: Editora Blucher.
3. MALAFAYA, B.A., et al. Additive manufacturing from a biomedical perspective. in *2019 IEEE 6th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG)*. 2019. IEEE.
4. FAN, D., et al., Progressive 3D printing technology and its application in medical materials. *Frontiers in pharmacology*, 2020. 11: p. 122.
5. VANDERPLOEG, A., S.-E. LEE, and M. MAMP, The application of 3D printing technology in the fashion industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 2017. 10(2): p. 170-179.
6. FENG, Y., et al., Application of 3D printing technology in bone tissue engineering: a review. *Current Drug Delivery*, 2021. 18(7): p. 847-861.
7. JOHN RYAN C. DIZON, ALEJANDRO H. ESPERA, QIYI CHEN, RIGOBERTO C. ADVINCULA, Mechanical characterization of 3D-printed polymers, *Additive Manufacturing*, Vol. 20, 2018, P 44-67, ISSN 2214-8604,
8. MIRANDA MORANDINI, M.; DEL VECHIO, G. H. *Impressão 3d, Tipos e*

Possibilidades. Revista Interface Tecnológica, v. 17, n. 2, p. 67–77, 18 dez. 2020. Acesso em 29 de abril. 2024.

9. MORAIS, A.; OLIVEIRA, D. caraúbas -rn 2021 Universidade Federal Rural do Semi-árido -UFERSA Pró- reitoria de Graduação Departamento de Engenharias Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3d nas Propriedades Mecânicas de Materiais Usuais: Uma Revisão de Literatura. [2021].

10. MARIA, P. et al. Propriedades mecânicas de resinas de impressão 3D para base de prótese removível submetidas a envelhecimento físico e químico.

11. SANTANA, L. et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 4, 6 dez. 2018.

12. AMZA, C. G., ZAPCIU, A., BACIU, F., VASILE, M. I., & NICOARA, A. I. (2021). Accelerated aging effect on mechanical properties of common 3D-printing polymers. *Polymers*, 13(23), 4132.

13. SEDLAK, J.; JOSKA, Z.; JANSKY, J.; ZOUHAR, J.; KOLOMY, S.; SLANY, M.; SVASTA, A.; JIROUSEK, J. Analysis of the Mechanical Properties of 3D-Printed Plastic Samples Subjected to Selected Degradation Effects. *Materials* 2023, 16, 3268.

14. LEE D, LEE Y, KIM I, HWANG K, KIM N. Thermal and Mechanical Degradation of Recycled Polylactic Acid Filaments for Three-Dimensional Printing Applications. *Polymers* (Basel). 2022 Dec 9;14(24):5385.

15. VALERGA PUERTA AP, FERNANDEZ-SANZ G, BAÑON F, FERNANDEZ-VIDAL SR. Biodegradable materials with FDM technology under the aging effect of solar and saltwater exposure. *Advances in Mechanical Engineering*. 2023;15(11).

16. MITROVIĆ, N.; GOLUBOVIĆ, Z.; MITROVIĆ, A.; TRAVICA, M.; TRAJKOVIĆ, I.; MILOŠEVIĆ, M.; PETROVIĆ, A. Influence of Aging on the Flexural Strength of PLA and PLA-X 3D-Printed Materials. *Micromachines* 2024, 15, 395.

ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING AGED BY THE NATURAL ENVIRONMENT

ABSTRACT

This study aimed to investigate the degradation caused by ultraviolet (UV) radiation exposure and environmental factors on materials produced by 3D printing with ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) and PLA (Polylactic Acid) filaments. To assess the behavior of these materials, tensile, flexural, and thermogravimetric analysis (TGA) tests were conducted on several specimens, divided into three stages: 1) initial analysis; 2) after 504 hours of exposure to real environmental conditions; 3) after 1008 hours. The results showed that both ABS and PLA underwent significant degradation when exposed to UV radiation and adverse environmental conditions, but to different extents. ABS exhibited higher initial mechanical strength but was more sensitive to UV degradation compared to PLA, which showed lower mechanical strength but less pronounced degradation over time. The conclusions of this study are relevant for industries and other sectors using 3D printing, highlighting the need to consider material durability against environmental exposure in practical applications. Future research could explore surface treatments or additives that enhance the UV and environmental resistance of ABS and PLA filaments.

Keywords: Degradation, 3D Printing, Mechanical Properties, UV Radiation.