

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS DE PLA IMPRESSOS POR MEIO DE MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA

Andrea Del Pilar Fabra Rivera, Universidade Federal de Minas Gerais, pilar1147@ufmg.br

Frederico de Castro Magalhães, Universidade Federal de Minas Gerais, fredmag@demec.ufmg.br

Juan Carlos Campos Rubio, Universidade Federal de Minas Gerais, juan@ufmg.br

Resumo. Neste trabalho, estudou-se a influência do reforço e da orientação de impressão no comportamento mecânico dos corpos de prova feitos com materiais compósitos de PLA-20% Al (micropartículas esféricas de alumínio) e PLA-20% FC (fibra curta de carbono). As amostras foram fabricadas usando a tecnologia de modelagem de deposição fundida (FDM). Foram realizados ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão em três pontos para analisar o comportamento mecânico dos materiais em estudo. Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos dos corpos de prova impressos com materiais compósitos foram comparados com os resultados do comportamento mecânico do PLA puro. Para a avaliação estatística dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos foi realizada uma análise de variância (ANOVA). Os resultados mostraram que a influência do tipo de reforço, nomeadamente fibras curtas ou micropartículas esféricas, é evidente. A maior resistência à tração foi mostrada para o PLA puro com uma orientação de impressão de 45°/-45° (50,83 MPa). O PLA puro 0°/90° apresentou a maior resistência à compressão (65,55 MPa). A maior resistência à flexão foi dada para o PLA puro 0°/90° (72,25 MPa). O mecanismo de fratura dos corpos de prova compósitos foi o preenchimento de lacunas e interface.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, FDM, PLA, Compósitos poliméricos.

1. INTRODUÇÃO

A alta demanda na fabricação de produtos e o aumento da competitividade entre as empresas tem exigido alterações no processo de desenvolvimentos de produtos visando a redução de tempo de fabricação, os custos e a melhoria na qualidade dos produtos. Dessa forma, a manufatura aditiva permite obter peças com geometrias complexas de forma rápida com materiais poliméricos de baixo custo, os quais, permitem fabricar peças leves, resistentes, a fim de substituir peças fabricadas de materiais metálicos (Yadav et al., 2021).

Nos últimos anos, diversos estudos tem sido desenvolvidos sobre os materiais puros e compósitos que podem ser utilizados no processo de manufatura aditiva (Bowoto et al., 2020). Este tipo de manufatura permite produzir produtos ou componentes mecânicos para serem aplicados em diferentes condições de serviço (Fasel et al., 2020) (Baptista & Guedes, 2021). Para isso, são realizados ensaios de tração, compressão e flexão em três pontos, onde os corpos de prova são produzidos com diferentes orientações de impressão (Moradi et al., 2020). Além disso, pode se afirmar que vários fatores têm um impacto significativo no comportamento mecânico das peças impressas em 3D, nomeadamente, os parâmetros de impressão 3D, as características do material e a adesão camada a camada das peças fabricadas entre outros (Chen et al., 2022). Assim, é necessário realizar estudos que avaliem o processo de fabricação, por meio de caracterização do material manufaturado (Akhoundi et al., 2019).

Dessa forma, estão sendo desenvolvidos novos filamentos compósitos para uso na manufatura aditiva fabricados com matriz polimérica reforçados com nanopartículas, fibras curtas e contínuas (García et al., 2022). Segundo a literatura, entre os materiais mais utilizados como matriz polimérica se encontra o PLA, o ABS e o PETG e o material de reforço mais usado na manufatura aditiva é a fibra de carbono e a fibra de vidro. Nesse sentido, quando a fibra de carbono é adicionada na matriz polimérica se tem mostrado um aumento nas propriedades mecânicas, principalmente na resistência mecânica e na absorção do impacto. Além das fibras usadas como reforço, são utilizadas nanopartículas de alumínio, bronze e cobre. Igualmente, diversos estudos tem analisado que a adição de nanopartículas de alumínio e fibras de carbono na matriz polimérica, o material compósito apresenta uma melhoria na sua resistência à tração, compressão e flexão (Vardhan, H; Kumar, R; Chohan, J., 2020).

No entanto, outros estudos observaram uma redução no comportamento mecânico quando houve a adição de materiais de reforço na matriz polimérica. Normalmente, essa diminuição nas propriedades mecânicas é atribuída pelo aumento na porosidade das peças fabricadas com materiais de reforço e na forma de adesão dos materiais reforçados na matriz polimérica (Hou et al., 2020). Da mesma forma, é fundamental determinar os parâmetros de impressão 3D que permitam uma ligação adequada entre o material de reforço e a matriz, a fim de melhorar a adesão entre as camadas diminuindo os vazios entre elas (Liu et al., 2021).

Segundo o mencionado anteriormente, pode-se afirmar que as propriedades mecânicas são significativamente afetadas pela variação dos diversos parâmetros de impressão, tais como, a densidade de preenchimento, o número de camadas, o ângulo de deposição, a velocidade de impressão, entre outros (Vanaei et al., 2020). Por outro lado, para um melhor desempenho dos materiais compósitos desenvolvidos para uso em manufatura aditiva, o tipo de material da matriz e a porcentagem de reforço devem ser escolhidos adequadamente (Shanmugam et al., 2021). Neste sentido, segundo Camargo et al. (2019) a resistência à tração e a resistência à flexão aumentam quando a espessura da camada e a

porcentagem de preenchimento aumentam. Porém, a energia de impacto diminui à medida que a espessura da camada e o preenchimento aumentam para o PLA reforçado com grafeno processado pela técnica FDM.

Nesse sentido, este trabalho visa a compreender a influência dos materiais de reforço e a orientação de impressão nas propriedades mecânicas das peças impressas. Isto devido a que a manufatura aditiva permite o processamento de geometrias específicas que dificilmente poderiam ser produzidas em processos convencionais de manufatura, em diferentes áreas, como na engenharia aeroespacial (Carcaças de suporte do compressor para um motor de turbina e lâminas de turbina), biomedicina (próteses e órteses ortopédicas, próteses e implantes dentários), indústria automotriz (carcaças da bomba de óleo e coletores de escape), entre outros (Rupinder et al., 2016) (Mohammadzadeh et al., 2019).

Dessa forma, neste estudo, será analisada a influência dos materiais de reforço na matriz polimérica e a influência da orientação de impressão nas propriedades de tração, compressão e flexão de corpos de prova manufaturados de PLA-20% Al (micropartículas de alumínio) e PLA-20% FC (fibra curta de carbono) usando a tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM). A orientação de impressão para a obtenção dos corpos de prova foi estabelecida orientações de impressão de 0°/90° e de 45°/-45°. Os resultados dos ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão em três pontos dos corpos de prova produzidos de PLA com reforço de partículas de alumínio e fibras de carbono serão comparados com o comportamento mecânico do PLA puro. Uma análise de variância (ANOVA) foi desenvolvida para a avaliação estatística dos resultados gerados nos ensaios mecânicos. O processo desenvolvido para a caracterização mecânica dos materiais de PLA puro, PLA-Al e PLA-FC podem ser visualizadas na figura 1.



Figura 1- Etapas usadas para a caracterização e fabricação dos materiais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os filamentos de PLA puro, PLA-Al e PLA-FC usados no planejamento experimental para a fabricação dos corpos de prova foram fornecidos pelo fabricante Voolt 3D. Os filamentos de PLA-Al foram produzidos pela empresa, a qual, utiliza uma extrusora adicionando esferas de alumínio com um tamanho de 9 μm e 20% em peso do compósito. Os filamentos de PLA-FC foram produzidos adicionando fibras de carbono com tamanho de 60 μm e 20% em peso do compósito. Os corpos de prova foram desenhados no software SolidWorks® 2018 conforme a especificações da norma ASTM D638 para o ensaio de tração, ASTM D695 para o ensaio de compressão e a norma BS EN ISO 178:2003 para o ensaio de flexão em três pontos e foram impressos mediante a técnica FDM.

Os parâmetros de impressão 3D foram programados no software Ultimaker Cura 4.2.1. e os corpos de prova foram impressos na impressora 3D Graber I3 - Tec 3D usando um filamento de 1,75 mm de diâmetro de cada material em estudo, o qual, foi aquecido e extrudado utilizando um bico de 0,4 mm de diâmetro. A temperatura de impressão para cada um dos corpos de prova de PLA puro, PLA/Al e PLA/FC foi de 210 °C. Na tabela 1, pode ser observado os parâmetros de impressão 3D determinados para a fabricação dos corpos de prova manufaturados.

Tabela 1. Parâmetros de impressão 3D para a fabricação dos corpos de prova.

Parâmetros	Valor
Velocidade de impressão	15 mm/s
Porcentagem de preenchimento	100%
Orientação de impressão	-45°/45° - 0°/90°
Espessura da camada	0,16 mm
Temperatura ambiente	23°C
Temperatura do bico	210 °C
Temperatura da plataforma	50°C

3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

O desempenho mecânico dos corpos de prova compostos de PLA sem reforço, PLA-Al e PLA-FC foi analisado com a execução de ensaios de tração, compressão e flexão em três pontos. Os ensaios mecânicos foram executados para estudar a influência dos materiais de reforço na matriz polimérica de PLA e a influência da orientação de impressão dos corpos de prova ($0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$) nas propriedades de tração, compressão e flexão. Os ensaios de tração, compressão e flexão de três pontos foram realizados na máquina universal AG-IS Shimadzu com uma célula de carga com capacidade de 100 kN mm a temperatura ambiente.

O ensaio de tração foi realizado de acordo com a norma ASTM D638-14 com uma velocidade de ensaio de 3 mm/min. Os corpos de prova foram impressos de acordo com as dimensões estabelecidas pela norma com uma espessura de 4,5 mm, uma largura de 13 mm e um comprimento de 110.

O ensaio de compressão foi realizado segundo a norma ASTM D695-15 com uma velocidade de ensaio de 1,3 mm/min e com dimensões dos corpos de prova de 12,7 mm de largura, 12,7 de espessura e 25,4 mm de altura.

Finalmente, o ensaio de flexão em três pontos foi realizado baseado na norma BS EN ISO 178:2003 (Plásticos - Determinação das propriedades de flexão). A norma especifica o método para determinar as propriedades de flexão de polímeros rígidos e semi-rígidos sob condições definidas.

Cinco amostras de PLA puro, PLA-Al e PLA-FC com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e cinco amostras de PLA puro, PLA-Al e PLA-FC com orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$ foram testadas para cada um dos testes mecânicos para obter resultados estatisticamente significativos. A orientação de impressão foi determinada de acordo com os parâmetros de impressão fornecidos pelo software Ultimaker Cura 4.2.1. Para avaliar os resultados obtidos nestes ensaios mecânicos, foi utilizada uma análise de variância (ANOVA) para determinar a influência dos dois fatores estudados (material de reforço e orientação de impressão) no comportamento mecânico. Além disso, a análise de variância verificou a diferença entre os valores médios dos resultados e determinou se eles são significativamente diferentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada análise de variância (ANOVA) foi considerado um nível de confiança de 95%, o que equivale a 0,05 P-valor. Os valores de R mostram um ajuste satisfatório dos dados ao modelo estatístico. A análise de variância (ANOVA) foi realizada no software Minitab versão 17.

Na figura 2, pode ser visualizados os valores das médias e o desvio padrão obtidos do ensaio de tração. A análise mostraram que na resistência à tração o tipo de reforço tem maior influência com 91,20%, seguido da interação entre os dois fatores com 6,52% e finalmente a orientação de impressão com 0,60%. Além disso, pode-se observar que os corpos de prova com uma orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$ mostraram um incremento na resistência à tração nos corpos de prova de PLA, PLA-Al e PLA-FC. Dessa forma, afirma-se que esse aumento é dado porque as camadas estão empilhadas de forma alternada com a orientação ideal para a direção da carga no ensaio de tração. Na resistência à tração os maiores valores foram obtidos nos corpos de prova de PLA puro com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ ($47,45 \pm 1,28$ MPa) e $45^\circ/-45^\circ$ ($50,83 \pm 0,92$ MPa).

Dessa forma, pode ser analisado que a adesão de material de reforço no filamento de PLA não proporciona um ganho na resistência à tração. Este comportamento pode ser atribuído pelo fato que as partículas e as fibras que são adicionadas gera uma heterogeneidade na matriz de PLA aumentando a capacidade de cristalização (Adeniran et al., 2022). Além disso, a ligação entre as camadas pode ser afetada pelas partículas de alumínio e as fibras de carbono adicionadas na matriz de PLA fazendo com que a aderência entre os materiais seja fraca e não permita uma adequada dissipação da energia para suportar maiores tensões (Huang et al., 2018).

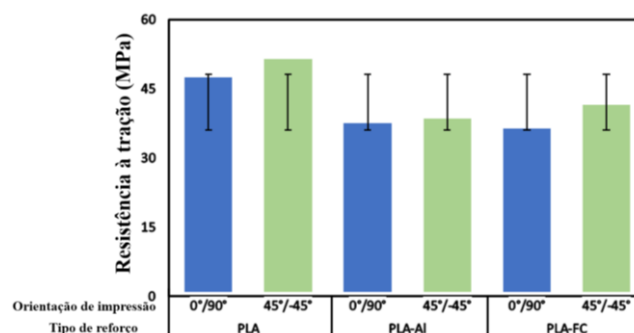


Figura 2 - Resistência à tração para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-Al e PLA-FC com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$ - ensaio de tração.

Na figura 3, pode ser visualizado os valores das médias e o desvio padrão obtidos da resistência à compressão, no qual, o tipo de reforço mostrou ser o parâmetro com maior influência no resultado do ensaio de compressão com 97,52%. A

maior resistência à compressão foi obtida para os corpos de prova de PLA puro com orientação de impressão $0^\circ/90^\circ$ ($65,55 \pm 1,16$ MPa) mostrando valores próximos à orientação de impressão de $45^\circ/-45^\circ$ ($63,55 \pm 1,59$ MPa). O menor valor da resistência à compressão foi dado pelos corpos de prova de PLA reforçadas com fibra de carbono ($52,31 \pm 0,27$ MPa).

Pode-se afirmar que devido às partículas de alumínio e as fibras de carbono tenderem a alterar a temperatura de transição vítrea do polímero, esses afetam significativamente as propriedades de ligação do material compósito depositado, gerando a presença de vazios (Adeniran et al., 2021). Nesse sentido, pode-se concluir que a ligação existente entre o PLA e as partículas de alumínio e as fibras de carbono determinam a resistência à compressão.

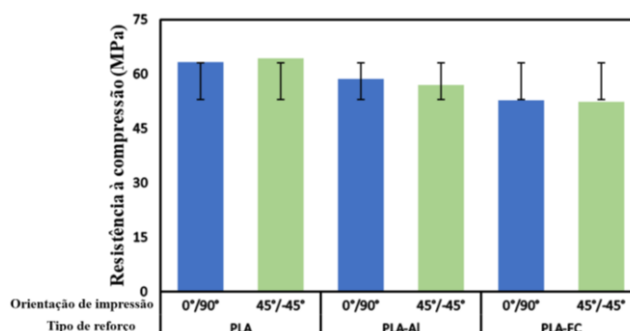


Figura 3- Resistência à compressão para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-Al e PLA-FC com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$ - ensaio de compressão.

Na figura 4, observa-se os valores das médias e o desvio padrão obtidos da resistência à flexão. Pode ser visualizado que a resistência à flexão do PLA puro com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ ($72,25 \pm 0,68$ MPa) e $45^\circ/-45^\circ$ ($68,49 \pm 1,18$ MPa) são superiores aos corpos de prova com reforço de partículas alumínio e fibra de carbono. Os corpos de prova de PLA-Al com uma orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ mostraram o menor valor na resistência à flexão ($48,33 \pm 1,58$ MPa) sendo inferior ao valor da resistência à flexão obtida dos corpos de prova de PLA-FC ($56,29 \pm 0,98$ MPa). Esse comportamento pode ser atribuído a que as fibras curtas de carbono impedem a propagação das trincas permitindo suportar a carga fazendo com que a estrutura não apresente formação de fissuras (Del Pilar Fabra Rivera A, 2023). Além disso, pode-se *afirmar* que as partículas de alumínio e as fibras de carbono não apresentaram uma ligação o suficientemente forte com a matriz do PLA fazendo com que as distribuições das forças não se transmitam de forma correta tendo valores de resistência à flexão inferiores do que o PLA puro. Na resistência à flexão o tipo de reforço influência nos resultados da resistência à flexão em um 94,17%.

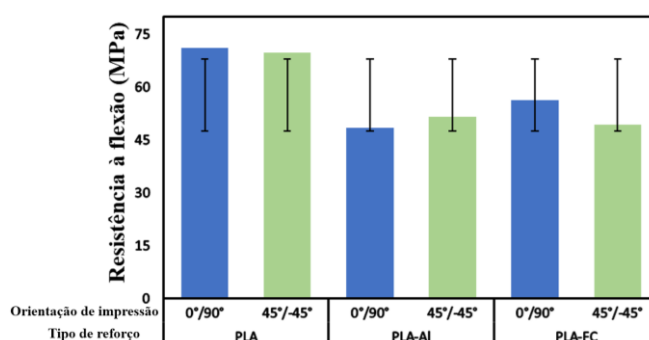


Figura 4 - Resistência à flexão para corpos de prova manufaturados de PLA, PLA-Al e PLA-FC com orientação de impressão de $0^\circ/90^\circ$ e $45^\circ/-45^\circ$ - ensaio de flexão.

5. REFERÊNCIAS

- Adeniran, O., Cong, W., & Oluwabunmi, K. (2022). Thermoplastic matrix material influences on the mechanical performance of additively manufactured carbon-fiber-reinforced plastic composites. *Journal of Composite Materials*, 56(9), 1391–1405.
- Adeniran, O., Cong, W., Bediako, E., & Aladesanmi, V. (2021). Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites: The Effect of Fiber Content on Compressive Properties. *Jornal Composite Science*, 5(325).
- Akhoundi, B., Machado, A., Almeida, E., & Silva, E. (2019). Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. *The Journal of Reinforced Plastics and Composites (JRP)*, 38(3), 2423–2443.
- Baptista, R., & Guedes, M. (2021). Morphological and mechanical characterization of 3D printed PLA scaffolds with controlled porosity for trabecular bone tissue replacement. *Materials Science and Engineering: C*, 118, 111528.

- Bowoto, O., Oladapo, B., Zahedi, S., Omigbodun, F., & Emenuvwe, O. (2020). Analytical modelling of in situ layer-wise defect detection in 3D-printed parts: additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 2311–2321.
- Chen, Q., Zhang, Y., Huang, P., Li, Y., & Fu, S. (2022). Improved bond strength, reduced porosity and enhanced mechanical properties of 3D-printed polyetherimide composites by carbon nanotubes. *Composites Communications*, 30, 101083.
- Del Pilar Fabra Rivera A, d. C. (2023). Experimental characterization of PLA composites printed by fused deposition modelling. *Journal of Composite Materials*, 57(5), 941-954.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1177/002199832211466>
- Fasel, U., Keidel, D., Baumann, L., Cavolina, G., Eichenhofer, M., & Ermanni, P. (2020). Morphing wing research has mostly focused on adaptive trailing edge and wing-camber morphing. By adapting the camber of the wing, the local lift coefficient can be changed to control and manoeuvre the aircraft or to actively alleviate loads. *An extensive. Manufacturing Letters*, 23, 85-88.
- García, E., Núñez, P., Chacón, J., Caminero, M., Chacón, J., & Kamarthi, S. (2022). Effects of carbon fibre reinforcement on the geometric properties of PETG-based filament using FFF additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 109766.
- Hou, Z., Tian, X., Zheng, Z., Zhang, J., Zhe, L., Li, D., . . . Polilov, A. (2020). A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content. *Composites Part B: Engineering*, 189, 107893.
- Huang, B., Meng, S., He, H., Jia, Y., Xu, Y., & Huang, H. (2018). Study of processing parameters in fused deposition modeling based on mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene filament. 59(1), 120-128.
- Liu, G., Xiong, Y., & Zhou, L. (2021). Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications. *Composites Communications*, 27, 100907.
- Mohammadizadeh, M., Imeri, A., Fidan, I., & Elkelany, M. (2019). 3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107112.
- Moradi, M., Moghadam, M., Shamsborhan, M., & Bodaghi, M. (2020). The Synergic Effects of FDM 3D Printing Parameters on Mechanical Behaviors of Bronze Poly Lactic Acid Composites. *Journal of composites and science*, 4(1), 1-17.
- Rupinder et al. (2016). Mechanical properties of bio compatible functional prototypes for joining applications in clinical dentistry. *International Journal Of Production Research* , 56(24), 7330-7340.
- Shanmugam, V., Das, O., Babu, K., Marimuthu, U., Veerasimman, A., Johnson, D., . . . Berto, F. (2021). Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue*, 143, 1-15.
- Vanaei, H., Shirinbayan, M., Deligant, M., Raissi, K., Fitoussi, J., Khelladi, S., & Tcharkhtchi, A. (2020). Influence of process parameters on thermal and mechanical properties of polylactic acid fabricated by fused filament fabrication. *Polymer engineering and science*, 60(8), 1822-1831.
- Vardhan, H; Kumar, R; Chohan, J. (2020). Investigation of tensile properties of sprayed aluminium based PLA composites fabricated by FDM technology. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1599–1604.
- Yadav, A., Srivastav, A., Singh, A., Mushtaque, M., Khan, S., Kumar, H., & Arora, P. (2021). Investigation on the materials used in additive manufacturing: A study. *Materials today proceedings*, 41(1), 154-157.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das Agências de Pesquisa FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) APQ02534-17 e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão de bolsa ao primeiro autor.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.