

Influência do Posicionamento e da Orientação de Peças nas Propriedades Mecânicas da PA12 em Impressão 3D por SLS

Eduardo S. P. Santos^{1,2}, Eduardo B. Fonseca¹, Danilo Polly¹, Marcelo F. Oliveira¹

{eduardo.santos, eduardo.fonseca, danilo.polly,
marcelo.oliveira}@cti.gov.br

¹Laboratório Aberto de Tecnologias Tridimensionais – LAPRINT
CTI Renato Archer – Campinas/SP

²Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM)
Universidade de Campinas (UNICAMP)– Campinas/SP

Abstract. *This study investigated the influence of part positioning on the build area of a selective laser sintering (SLS) 3D printer on mechanical properties. Polyamide 12 test specimens were printed in different Y-axis positions and two orientations (XY and XZ). Tensile tests showed that parts printed at the center of the build area, especially those oriented in XY, exhibited higher strength, ductility, and toughness. The results indicate that both the positioning and orientation of parts significantly affect the final quality of parts produced by SLS.*

Keywords: *Selective Laser Sintering (SLS); PA12; Mechanical Properties; Part Orientation; Build Position; 3D Printing.*

Resumo. *Este trabalho investigou a influência do posicionamento de peças na área de impressão de uma impressora 3D por sinterização seletiva a laser (SLS) sobre as propriedades mecânicas. Corpos de prova em poliamida 12 foram impressos em diferentes posições ao longo do eixo Y e em duas orientações (XY e XZ). Os ensaios de tração mostraram que as peças posicionadas no centro da área de impressão, especialmente com orientação XY, apresentaram maior resistência, ductilidade e tenacidade. Os resultados indicam que tanto o posicionamento quanto a orientação das peças afetam significativamente a qualidade final das peças fabricadas por SLS.*

Palavras chave: *Sinterização Seletiva a Laser (SLS); PA12; Propriedades Mecânicas; Orientação das Peças; Posicionamento na Impressão; Impressão 3D.*

1. Introdução

A manufatura aditiva tem ganhado destaque nas últimas décadas devido às inúmeras possibilidades que oferece para a fabricação de componentes com geometrias complexas e elevado grau de liberdade de projeto, muitas vezes inviáveis por métodos convencionais de manufatura. Essa tecnologia abrange desde a impressão de polímeros até a de metais, sendo amplamente empregada em setores como a indústria automotiva, aeroespacial, biomédica e de bens de consumo. Entre as diversas técnicas de impressão 3D existentes, a Sinterização Seletiva a Laser (do inglês, *Selective Laser Sintering* – SLS), baseada em leito de pó, destaca-se tanto na indústria quanto na pesquisa científica

devido à sua alta precisão dimensional, às boas propriedades mecânicas das peças produzidas, à capacidade de fabricar geometrias complexas e à viabilidade de produção personalizada sob demanda.

A impressão 3D por SLS utiliza como matéria-prima polímeros em forma de pó, como a poliamida 12, que são depositados em camadas finas sobre uma plataforma de fabricação. Um laser de alta potência varre seletivamente cada camada, fundindo parcialmente as partículas de pó apenas nas regiões correspondentes ao modelo tridimensional. Após cada varredura, uma nova camada de pó é aplicada, e o processo se repete sucessivamente até a completa formação da peça. O pó não sinterizado ao redor da geometria impressa atua como suporte durante o processo, eliminando a necessidade de estruturas de apoio adicionais e permitindo a fabricação de peças com elevada complexidade geométrica e boas propriedades mecânicas.

Embora o processo permita a reutilização do material não sinterizado, a cada novo ciclo de impressão esse material sofre certo grau de degradação, o que pode comprometer suas propriedades físico-químicas e, consequentemente, o desempenho mecânico das peças produzidas [Ziegelmeier et al., 2015]. Diante disso, é desejável que o volume útil da câmara de impressão seja aproveitado de forma eficiente em cada ciclo de fabricação, de modo a minimizar o número de reutilizações do pó e reduzir perdas de material.

Além disso, diversos fatores térmicos inerentes ao processo de sinterização influenciam diretamente as propriedades mecânicas das peças fabricadas, como a temperatura inicial do leito de pó, a estabilidade térmica durante a impressão e a posição das peças no volume de fabricação. De acordo com Leigh et al. (2020), peças posicionadas mais distantes do centro do volume de impressão de uma impressora de SLS estão sujeitas a gradientes térmicos mais intensos, especialmente nas regiões próximas às bordas da câmara. Esses gradientes promovem um resfriamento mais rápido do material, reduzindo o tempo de permanência em temperatura elevada e afetando propriedades como a ductilidade e a resistência mecânica. Em contrapartida, no centro do volume de impressão, as peças permanecem por mais tempo em condições térmicas favoráveis, o que favorece a difusão molecular, a redução da porosidade e, consequentemente, melhores propriedades mecânicas.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do posicionamento das peças ao longo do eixo Y de uma impressora de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) sobre as propriedades mecânicas dos corpos de prova produzidos.

2. Materiais e métodos

2.1. Confecção dos corpos de prova

Com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas de peças impressas em diferentes posições ao longo do eixo Y da impressora, foram produzidos corpos de prova posteriormente submetidos a ensaios mecânicos de tração. Para a modelagem das

geometrias e geração do arquivo utilizado na impressão 3D, foi empregado um software de CAD (do inglês, *Computer-Aided Design* – Desenho Assistido por Computador).

Os corpos de prova foram projetados de acordo com a norma ASTM D638-22 (ASTM D638, 2022), tipo I. A Figura 1 apresenta o modelo tridimensional do corpo de prova, sendo a Figura 1A a representação em perspectiva e a Figura 1B o desenho técnico com as principais dimensões.

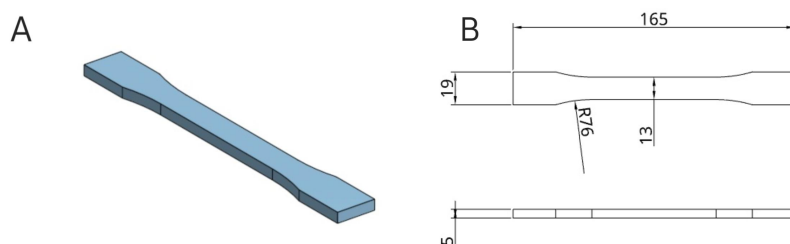


Figura 1. Modelo do corpo de prova: (A) vista em perspectiva do modelo 3D; (B) desenho técnico com dimensões conforme a norma ASTM D638-22.

Os corpos de prova foram posicionados na base da área de impressão, a uma altura de 24,5 mm do substrato, com orientação XY, e distribuídos em três diferentes posições ao longo do eixo Y da impressora: uma próxima à porta da máquina, uma no centro da área de impressão e uma na parte posterior (fundo). Em cada uma dessas posições foram alocados três corpos de prova, com a mesma orientação, empilhados verticalmente e espaçados de 2,83 mm entre si.

Além desses nove corpos de prova, outros três foram posicionados no centro da área de impressão, porém com orientação XZ, totalizando doze corpos de prova produzidos para o experimento. A disposição das peças no volume de impressão é apresentada na Figura 2A, enquanto a Figura 2B ilustra a orientação adotada e a nomenclatura utilizada para a identificação de cada grupo de amostras.

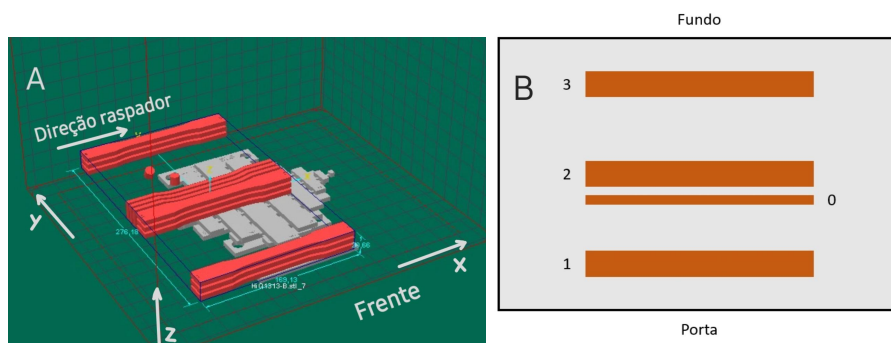


Figura 2. Disposição dos corpos de prova no volume de impressão: (A) posicionamento das peças; (B) orientação e nomenclatura dos corpos de prova.

A manufatura dos corpos de prova foi realizada utilizando uma máquina de manufatura aditiva por SLS, modelo Sinterstation HiQ, apresentada na Figura 3, fabricada pela empresa 3D Systems. O equipamento utiliza um laser de CO₂ para fundir seletivamente partículas de pó em camadas sucessivas. O volume útil de construção da impressora é de 381 × 330 × 457 mm (eixos X, Y e Z, respectivamente) (Agile Manufacturing, 2019).

O build teve uma duração de 8 horas e 47 minutos, com uma altura total de 81,96 mm, incluindo outras peças além dos corpos de prova deste estudo. Os parâmetros de fabricação foram os seguintes: espessura de camada de 0,1 mm, diâmetro do feixe laser de 0,45 mm, espaçamento entre trilhas de 0,15 mm, potência de laser principal de 14 W e 7 W para contorno (outline). A temperatura do leito de pó foi mantida em 176 °C, enquanto os alimentadores (feeders) operaram a 140 °C. O processo foi conduzido em atmosfera de nitrogênio e teor de oxigênio inferior a 0,1%.



Figura 3. Impressora 3D Sinterstation HiQ.

O material utilizado para a produção das peças da Figura 4 foi a poliamida Duraform PA12, fornecida pela 3D Systems.



Figura 4. Corpos de prova impressos por SLS.

2.2. Ensaio de tração dos corpos de prova

Ensaio de tração foram realizados nos corpos de prova utilizando uma máquina universal de ensaios eletromecânicos EMIC, com capacidade de 30 kN, apresentada na Figura 5A.

Durante a execução dos ensaios mecânicos, ilustrada na Figura 5B, a força foi aplicada tracionando o corpo de prova com velocidade constante de 5 mm/min, conforme estabelecido na norma ASTM D638-22, até a ruptura do material. A força aplicada foi medida por meio de uma célula de carga, enquanto o deslocamento foi registrado automaticamente por um transformador diferencial variável linear (LVDT) ao longo de todo o ensaio. Ao final de cada teste, os dados de tempo, força e alongamento dos corpos de prova foram exportados em formato de texto para posterior análise.

Para o tratamento dos resultados obtidos, foi utilizado o software Microsoft Excel, empregado na análise da curva de força em função do alongamento de acordo com a norma ASTM D638-22, bem como no cálculo das curvas de tensão em função da deformação para cada corpo de prova. Em seguida, a linguagem Python foi utilizada para sobrepor e plotar as curvas dos ensaios de tração.

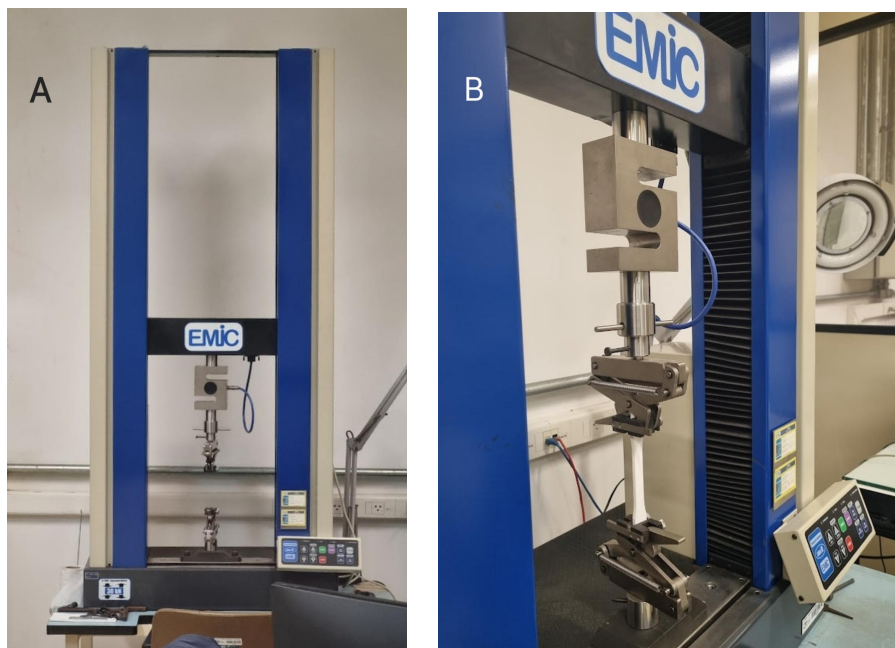


Figura 5. Ensaio de tração dos corpos de prova: (A) máquina universal de ensaios eletromecânica EMIC; (B) corpo de prova durante a realização do ensaio de tração.

3. Resultados e discussões

A Figura 6 apresenta as curvas de Tensão (MPa) em função da Deformação (%) obtidas nos ensaios de tração realizados nos corpos de prova de poliamida 12 fabricados por Sinterização Seletiva a Laser (SLS).

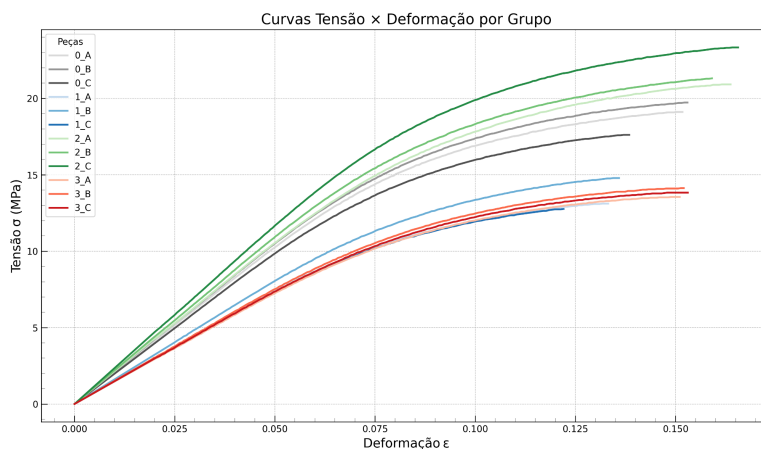


Figura 6. Gráfico Tensão x Deformação dos corpos de prova de PA12 fabricados por SLS.

A partir da análise das curvas apresentadas na Figura 6, observa-se que os corpos de prova impressos na região central da área de impressão apresentaram capacidade de suportar tensões significativamente superiores em comparação às demais posições. Esse comportamento indica um desempenho mecânico mais favorável para as amostras posicionadas no centro do volume de fabricação.

Como mostrado na Figura 7, os corpos de prova da posição 2 (região central da área de impressão) também apresentaram maior deformação até a ruptura, seguidos das posições 0 e 3. A posição 1, correspondente à região próxima à porta da impressora, foi a que apresentou a menor deformação até a ruptura, indicando menor ductilidade.

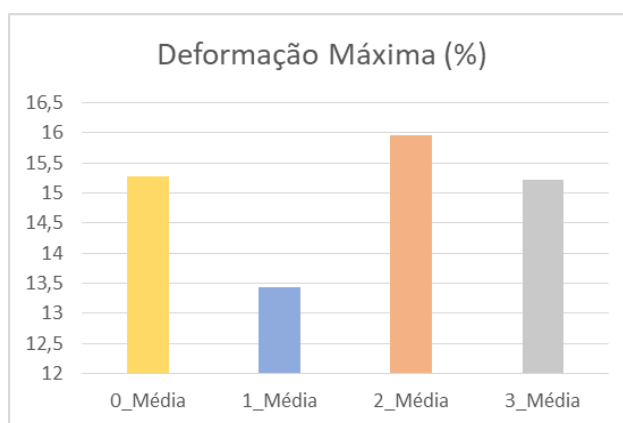


Figura 7. Gráfico de deformação máxima dos corpos de prova de PA 12 fabricados por SLS.

Além disso, conforme ilustrado na Figura 8, o grupo 2 apresentou a maior tensão máxima antes da ruptura, seguido do grupo 0, também posicionado no centro da impressora, porém com orientação distinta. Em seguida aparecem os grupos 3 e 1, posicionados, respectivamente, no fundo e na parte frontal da área de impressão.

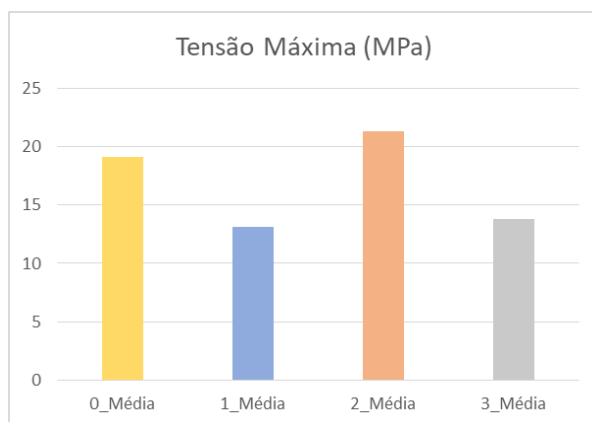


Figura 8. Gráfico de Tensão máxima dos corpos de prova de PA 12 fabricados por SLS.

Esse mesmo comportamento é observado em outras propriedades mecânicas do material, como o módulo de elasticidade e a energia específica de deformação, cujos valores médios são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas da PA12 processada por SLS. Valores reportados correspondem à média de três corpos de prova; valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

Posição	Deformação Max (%)	Tensão Max (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Energia específica de deformação (kJ/m ³)
0	15,3 (0,8)	19,1 (1,1)	206,0 (6,2)	19,1 (2,2)
1	13,4 (0,8)	13,1 (1,1)	149,7 (7,8)	11,1 (1,6)
2	16,0 (0,3)	21,3 (1,3)	219,3 (11,3)	22,6 (1,8)
3	15,2 (0,1)	13,8 (0,3)	148,2 (2,9)	14,0 (0,3)

Segundo os dados apresentados na Tabela 1, os corpos de prova impressos na região central do substrato (grupo 2) demonstraram maior ductilidade, ou seja, apresentaram maior deformação plástica antes da ruptura quando comparados aos demais grupos. Além disso, essas amostras exibiram maior resistência mecânica, uma vez que foi necessária uma tensão mais elevada para provocar sua ruptura, bem como maior rigidez, evidenciada pelo maior módulo de elasticidade. Observou-se ainda maior tenacidade, representada pela energia específica de deformação, indicando que uma quantidade maior de energia é necessária para promover a fratura do material.

Outro aspecto relevante é que o grupo 0, impresso com orientação XZ, apresentou propriedades mecânicas ligeiramente inferiores às do grupo 2, apesar de ambos estarem posicionados no centro da impressora. Esse resultado evidencia que, além do posicionamento no volume de impressão, a orientação das peças também exerce influência significativa sobre o desempenho mecânico final.

Conforme discutido por Leigh et al. (2020), a posição das peças na área de impressão influencia diretamente o tempo durante o qual permanecem em temperatura ideal para a sinterização, afetando a difusão molecular entre as partículas e, consequentemente, a porosidade do material. Essa relação pode explicar o comportamento observado experimentalmente, no qual as peças posicionadas próximas ao perímetro da impressora apresentaram propriedades mecânicas inferiores em comparação às localizadas na região central do substrato.

Do ponto de vista prático, esses resultados indicam que o planejamento do posicionamento e da orientação das peças no volume de impressão é um fator crítico no processo de SLS, especialmente para componentes de maior dimensão ou que ocupem grande parte da área de fabricação. Diferenças locais nas propriedades mecânicas podem resultar em regiões estruturalmente mais frágeis dentro de uma mesma peça. Estudos futuros podem aprofundar essa análise por meio da avaliação da porosidade, da densidade e da microestrutura dos materiais produzidos, bem como investigar a variação das propriedades mecânicas ao longo da altura do leito de pó e ao longo do tempo, à medida que o material sofre degradação com sucessivos ciclos de impressão.

4. Conclusão

Neste trabalho, foram avaliadas as propriedades mecânicas de corpos de prova de poliamida 12 fabricados por Sinterização Seletiva a Laser (SLS), considerando diferentes posições e orientações no volume de impressão. Os resultados obtidos evidenciaram que o posicionamento das peças exerce influência significativa sobre o desempenho mecânico final, sendo que as amostras produzidas na região central da área de impressão apresentaram os melhores resultados em termos de tensão máxima, módulo de elasticidade, deformação total até a ruptura e energia específica de deformação.

Além disso, observou-se que a orientação de fabricação também desempenha papel relevante, uma vez que os corpos de prova impressos com orientação XY apresentaram desempenho mecânico superior àqueles orientados em XZ, mesmo quando posicionados na mesma região do volume de impressão. Esses resultados indicam que tanto o posicionamento quanto a orientação das peças devem ser considerados de forma conjunta no planejamento do processo de fabricação por SLS.

Do ponto de vista prático, os achados deste estudo reforçam a importância de um planejamento criterioso da disposição das peças no volume de impressão, especialmente para componentes de maiores dimensões ou aplicações estruturais, nas quais variações locais nas propriedades mecânicas podem comprometer o desempenho do produto final. Trabalhos futuros podem aprofundar essa análise por meio da investigação da porosidade, da densidade e da microestrutura dos materiais produzidos, bem como avaliar os efeitos da degradação do pó ao longo de múltiplos ciclos de impressão.

5. Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao CNPq e ao CTI pela concessão da bolsa e pelo suporte fundamental ao meu desenvolvimento acadêmico e aprendizado. Agradeço ao coorientador Eduardo Bertoni da Fonseca pelo apoio contínuo e pelos valiosos conhecimentos compartilhados, que foram essenciais para a realização deste trabalho. Sou grato também a Danilo Polly, coorientador sempre solícito e dedicado, que contribuiu significativamente com seu empenho e colaboração. Por fim, registro meus agradecimentos ao orientador Marcelo Fernandes de Oliveira, cuja orientação, experiência e sabedoria foram indispensáveis para o sucesso deste estudo.

Referências

- AGILE MANUFACTURING. Sinterstation® HiQ series SLS. [S.l.], ago. 2019. 1 PDF (ficha técnica). Disponível em: <<https://agile-manufacturing.com/wp-content/uploads/2019/08/sinterstation-hiq.pdf>> . Acesso em: 17 ago. 2025.
- Ziegelmeier, S., Christmann, P., Hund, R. D., & Drummer, D. (2015). Aging effects of polyamide 12 in selective laser sintering: Molecular weight distribution and thermal behavior. *Polymer Testing*, 48, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.10.008>
- LEIGH, D.K.; BOURELL, D. *Powder Bed Fusion of Polymers*. In: BOURELL, D.; KUHN, H.; FRAZIER, W.; SEIFI, M., editors. **ASM Handbook, Volume 24, Additive Manufacturing Processes**. [S.l.]: ASM International, 2020. DOI: 10.31399/asm.hb.v24.a0006543.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2022.