



PROJETO DE PESQUISA

Influência da velocidade de deposição nas propriedades mecânicas de PLA processado por manufatura aditiva em tecnologia FFF

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco
Candidato: Rafael Bartolo Pereira (RA: 12.124.082-4)
rafaelbpereira2017@gmail.com

Início: agosto de 2025
Conclusão prevista: julho de 2026

Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Manufatura Aditiva Avançada (LMAA-FEI)
Laboratório de Materiais
Centro Universitário FEI

RESUMO DO PROJETO

A manufatura aditiva, comumente conhecida como impressão 3D, é um dos processos de fabricação mais inovadores e versáteis para a obtenção de peças de geometrias complexas a partir de arquivos digitais de projetos em 3 dimensões (3D). No entanto, fixando os demais parâmetros de produção, é preciso avaliar se as propriedades mecânicas de componentes produzidos por FFF sofrem influência da velocidade de deposição imposta, e esta é a motivação deste projeto, que tem por objetivo produzir, por método FFF, corpos de prova para ensaios de flexão em 3 pontos de poli ácido láctico (PLA) com 100% de preenchimento, em diferentes velocidades de deposição, avaliando a influência nas propriedades mecânicas, especificamente limite de escoamento e módulo de elasticidade, para que o projeto de peças por FFF possa ser otimizado em termos de comportamento mecânico e tempo de processamento.

Palavras-chave:

1. Manufatura aditiva
2. Impressão 3D
3. Propriedades mecânicas
4. Comportamento mecânico

Introdução

A manufatura aditiva, comumente conhecida como impressão 3D, é um dos processos de fabricação mais inovadores e versáteis para a obtenção de peças de geometrias complexas a partir de arquivos digitais de projetos em 3 dimensões (3D). Os processos consistem na deposição de material camada a camada, a partir de código de linguagem de máquina do tipo gcode, gerado em programas conhecidos como fatiadores, que transformam o projeto 3D (usualmente gerado em extensões .stl ou .obj) em linhas de comando que controlam os três eixos de deslocamento da máquina e a deposição de material [1]. Na Figura 1 são apresentadas representações esquemáticas de dois dos processos de manufatura aditiva mais comuns para a produção de peças poliméricas, o de extrusão de material (também conhecido como FFF – Fused Filament Fabrication, ou FDM – Fused Deposition Modelling) e o de impressão multijatos (MJF – Multi Jetting Fusion).

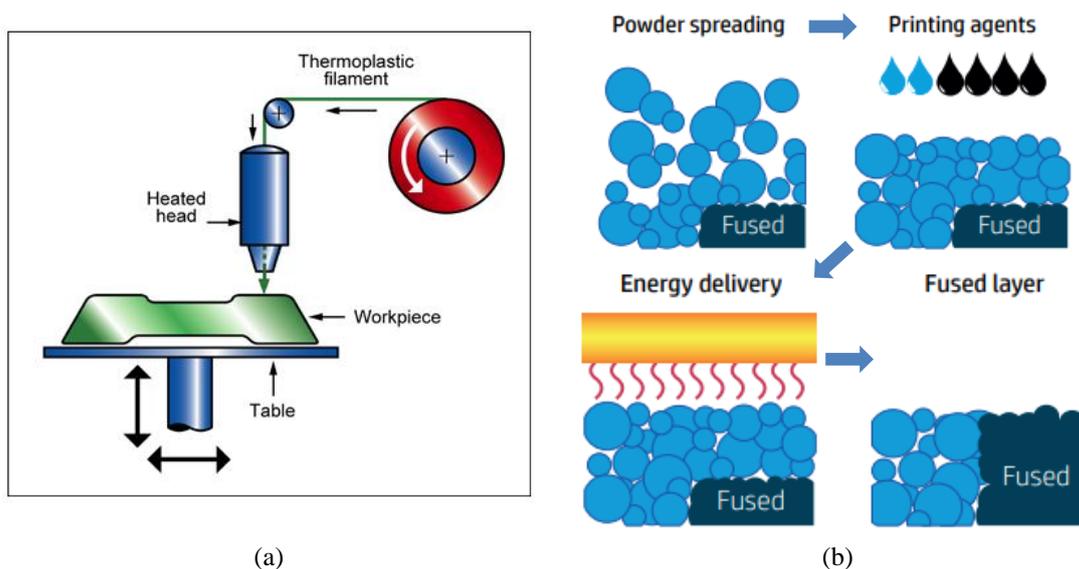


Figura 1. Representação esquemática de dois métodos de manufatura aditiva. Em (a), extrusão de material (também conhecido como FFF – Fused Filament Fabrication, ou FDM – Fused Deposition Modelling [2] e em (b), impressão multijatos (MJF – Multi Jetting Fusion) [3,4].

O processo FFF (Figura 1a) é o mais popular para a obtenção de peças por manufatura aditiva de polímeros termoplásticos. O material, na forma de filamento de diâmetro padronizado em 1,75 mm ou 2,85 mm, é extrudado por uma cabeça aquecida, que tem um bico de extrusão fabricado em latão, aço temperado ou aço inoxidável, e que tem orifício de extrusão de diâmetro variando entre 0,2 mm e 0,8 mm nos equipamentos mais comuns. O material fundido é pressionado contra a mesa de impressão e movimentos no plano da mesa permitem a deposição da primeira camada da peça, usualmente com espessura que não ultrapassa metade do diâmetro do orifício de extrusão utilizado. Após a deposição de todo o material da primeira camada, a mesa de impressão é deslocada com relação ao bico de extrusão na distância equivalente a espessura da próxima camada a ser depositada, e o processo então se repete, até que a peça final seja obtida.

Na Figura 2, é apresentado exemplo de peça sendo produzida em PLA (Poli Ácido Lático, um polímero termoplástico de origem vegetal), onde é possível ver as camadas depositadas, neste caso de 0,18 mm de altura cada, sendo usado um bico de extrusão de orifício com 0,4 mm de diâmetro.

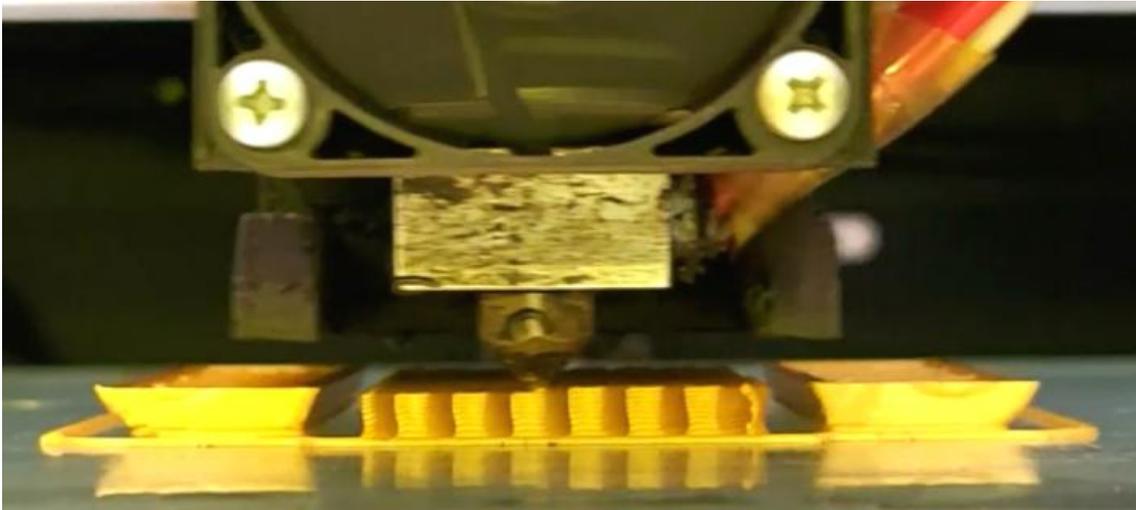


Figura 2. Deposição de PLA pelo processo FFF (fonte: autor).

Existem no mercado desde equipamentos simples de impressão FFF, que tem volume de impressão de 200x200x200 mm, com custo inicial de aquisição de aproximadamente R\$ 2.500,00, e que podem processar PLA, ABS (Acrilonitrila-Butadieno-Estireno) e PETG (Poli Etileno Tereftalato Glicol), com custo de aquisição da ordem de R\$ 100,00 o kg. Apesar da facilidade de acesso a equipamentos e materiais para o processo FFF, a Figura 2 ilustra o principal problema desta técnica: como a extrusão ocorre em camadas, pressionando o fluxo extrudado de polímero fundido contra o plano de impressão, criam-se estrias horizontais, que podem gerar concentradores de tensão perpendiculares ao eixo da altura das peças, levando a diminuição da resistência mecânica nesta direção. Além disso, sendo o material fundido depositado continuamente numa camada sobre a outra, pode ocorrer má adesão entre as camadas, prejudicando resistência e ductilidade na direção da altura da peça, o que ocasiona grande anisotropia de propriedades mecânicas nas peças assim produzidas.

Comparadas aos valores de propriedades mecânicas obtidos em MJF, as propriedades mecânicas de partes obtidas por FFF apresentam anisotropia de propriedades muito mais pronunciadas, e tem sido objeto de estudos recentes [5-9].

ABS produzido por FFF apresentou limites de escoamento de 27,7 MPa quando as camadas foram depositadas paralelas ao sentido de tração, e 21,2 MPa quando as camadas foram depositadas a 45° com relação a direção de tração [5]. No entanto, outro trabalho com ABS [6] indica que há menores rigidez, resistência mecânica e ductilidade a tração quando as linhas de deposição principais são depositadas paralelas à direção de tração, sem a existência das camadas de perímetro nas peças, o que seria padrão nos processos FDM, e que foi usado em [5] e nas demais referências consultadas.

A existência ou não de perímetros de contorno no processo FFF, bem como outras variáveis de produção, como fração de preenchimento interno as camadas de perímetro, geometria e orientação de preenchimento, temperaturas de extrusão e de manutenção da

mesa de manufatura, e ocorrência de sobre- ou sub extrusão, levando a maior ou menor aderência entre camadas, são variáveis importantes de processamento e que precisam ser investigadas. Em [6] e [7] há revisão sobre trabalhos que enfocam as diferentes influências destas variáveis nas propriedades mecânicas. Indicações sobre a anisotropia de propriedades relacionada a diferentes orientações de deposição de perímetros e preenchimentos em relação a direção de solicitação são amplamente discutidas em [7,8], mas os corpos de prova de tração sempre estão posicionados com o seu comprimento ou paralelamente à mesa de impressão, ou perpendiculares a esta (com seu comprimento no sentido da altura de impressão). Peças onde o sentido principal de solicitação esteja localizado num ângulo diferente de 0 ou 90° com relação à mesa de impressão não são discutidos.

Recentemente, equipamentos de manufatura aditiva por FFF tem obtido maiores velocidades de deposição. Se usualmente as velocidades de deposição situavam-se entre 40 e 60 mm/s, equipamentos disponíveis no mercado no corrente ano podem atingir velocidades superiores a 500 mm/s, com ganhos expressivos de qualidade superficial a partir de controles de aceleração e vibração aprimorados [10]. Todavia, a compreensão da influência deste aumento expressivo de velocidade no cisalhamento imposto ao polímero é necessária, pois a alteração na orientação de cadeias e adesão entre camadas é esperada.

Trabalhos recentes iniciam a discussão sobre a influência da velocidade de impressão sobre as propriedades de PLA produzido por FFF. ZHU e colaboradores [11] realizaram produção de PLA por FFF em velocidades de 30 a 60 mm/s, encontrando os maiores valores de limites de resistência a tração e compressão na menor velocidade de impressão testada. Já MIAZIO [12] produziu PLA por FFF em velocidades entre 20 e 100 mm/s, e encontrou os maiores valores de resistência a tração nas velocidades mais baixas, notando pequena variação no limite de resistência para os corpos-de-prova produzidos entre 50 e 80 mm/s, mas com significativa redução de propriedades com velocidades superiores a 80 mm/s.

KHOSRAVANI e colaboradores [13] notaram reduções de mais de 10% nos valores de limite de resistência e de módulo de elasticidade de PLA produzido por FFF se a velocidade de impressão era aumentada de 20 para 80 mm/s; notaram também que se a orientação do preenchimento era variada, provocava queda para deposição transversal à aplicação de carga de mais de 50% se comparada a deposição paralela à direção de tração.

KARTAL e KAPTAN [14] produziram corpos de prova de tração com PLA por FFF a velocidades de impressão variadas de 15 mm/s a 105 mm/s em incrementos de 15 mm/s, mantendo uma taxa de preenchimento de 100%. À medida que a velocidade aumentava, houve uma tendência de diminuição nas massas das amostras, com uma redução notável de 12%, de 8,21 g a 15 mm/s para 7,21 g a 105 mm/s. Os valores de resistência à tração diminuíram com velocidades de impressão mais altas. Para amostras impressas a 15 mm/s, a resistência à tração foi de 60 MPa, diminuindo para 44 MPa a 105 mm/s, representando uma redução de 27%.

Deste modo, fixando parâmetros de impressão, é preciso avaliar se as propriedades mecânicas de componentes produzidos por FFF sofrem influência da velocidade de deposição, especialmente nas altas velocidades propiciadas pelos equipamentos contemporâneos, e esta é a motivação deste projeto.

PROJETO DE PESQUISA

Objetivos

O objetivo deste projeto é produzir, por método FFF, corpos de prova para ensaios de flexão em 3 pontos de poli ácido láctico (PLA) com 100% de preenchimento, em diferentes velocidades de deposição, avaliando a influência nas propriedades mecânicas, especificamente limite de escoamento e módulo de elasticidade, para que o projeto de peças por FFF possa ser otimizado em termos de comportamento mecânico e tempo de processamento.

Metodologia

Além da dedicação do professor-proponente como orientador (que trabalha em regime de tempo integral nesta Instituição), será necessária uma bolsa de iniciação científica, por um ano, para o aluno pré-selecionado.

O material (PLA na forma de filamento com 1,75 mm de diâmetro, na cor preta, disponível no Laboratório de Manufatura Aditiva Avançada – LMAA-FEI) será processado na forma de corpos-de-prova de com 3,2 mm de espessura, 12,7 mm de largura e 127 mm de comprimento, em impressora FFF com 100% de preenchimento, diâmetro do orifício do bico de extrusão de 0,4 mm, espessura perpendicular à mesa de impressão, altura de camada de 0,2 mm e 2 perímetros de extrusão, iniciando pelo perímetro mais interno e finalizando no período mais externo. A velocidade de deposição será variada entre 40 mm/c (convencionalmente utilizada para o material em questão) e 500 mm/s, em 6 níveis diferentes, avaliando-se as possibilidades no fatiador BambuStudio, do equipamento de impressão BambuLab P1s, disponíveis no LMAA-FEI. Serão também adotados preenchimentos concêntricos e em grade, verificando se a orientação dos preenchimentos é variável determinante no comportamento mecânico. No total, serão produzidos 36 corpos de prova de flexão, 18 com preenchimento concêntrico (em 6 velocidades diferentes, caracterizando 3 corpos de prova por velocidade) e 18 com preenchimento do tipo grade.

Para avaliar se as velocidades de impressão afetam na quantidade de material depositado, os corpos-de-prova terão sua massa medida em balança digital, de 0,01g de resolução, disponível no LMAA-FEI. Observação das superfícies dos corpos-de-prova para avaliação de criação de possíveis defeitos será realizada em lupa estereoscópica, também disponível no LMAA-FEI

Ensaio de flexão segundo a norma ASTM D790-17 [15] serão conduzidos no equipamento Instron do Laboratório de Materiais do Centro Universitário FEI, em triplicata para cada velocidade de deposição e tipo de preenchimento utilizados. Serão avaliados os valores de módulo de elasticidade e limite de escoamento.

Plano de trabalho e cronograma

Para cumprir as metas anteriormente propostas, o trabalho será dividido conforme descreve o cronograma mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Cronograma global de atividades do projeto.

Atividade	meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão da literatura	■	■	■				■	■	■	■		
Obtenção das amostras e determinação de massa		■	■	■				■				
Ensaio de flexão					■	■	■		■	■		
Análise dos resultados				■	■	■	■	■	■	■		
Redação de relatório parcial		■		■		■						
Elaboração do relatório final								■		■	■	■

REFERÊNCIAS

1. B. Redwood, F. Schöffler, B. Garret. The 3D Printing Handbook. 3D Hubs : Amsterdam, 2017, 289 p.
2. Granta EduPack database, base de dados de processos, nível 3, release 2021.
3. HP MJF Handbook, disponível em <https://reinvent.hp.com/us-en-3dprint-mjfhandbook>, acessado em 23/02/2021.
4. HP 3D Printing materials for the HP Jet Fusion 4200 3D Printing Solution - Mechanical Properties, whitepaper HP, disponível em <https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-4200.html> acessado em 23/02/2021.
5. Ö. Keles et al. Effect of build orientation on the mechanical reliability of 3D printed ABS. Rapid Prototyping Journal, 23/2, 2017, p. 320–328.
6. H. R. Dana et al. Polymer additive manufacturing of ABS structure: Influence of printing direction on mechanical properties. Journal of Manufacturing Processes 44, 2019, p. 288–298.
7. T. J. Gordelier et al. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. Rapid Prototyping Journal, 25/6, 2019, p. 953–971.
8. M. Samykano et al. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102, 2019, p. 2779–2796.
9. M. Schmitt et al. Additive manufacturing infill optimization for automotive 3D-printed ABS components. Rapid Prototyping Journal, 26/1, 2020, p. 89–99.
10. <https://bambulab.com/pt-br/p1> consultado em 20/05/2025.
11. Yu Zhu et al. Study on Effects of FDM 3D Printing Parameters on Mechanical Properties of Polylactic Acid. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 688 (2019) 033026, doi:10.1088/1757-899X/688/3/033026
12. Łukasz Miazio. Impact of print speed on strength of samples printed in FDM technology. Agricultural Engineering, 2019, Vol . 23, No. 2 , pp .33-38.
13. M. R. Khosravani et al. Characterization of 3D-printed PLA parts with different raster orientations and printing speeds. Sci Rep 12, 1016 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05005-4>
14. F. Kartal, A. Kaptan, A. Response of PLA material to 3D printing speeds: A comprehensive examination on mechanical properties and production quality. European Mechanical Science, 8(3): 137-144. 2024, <https://doi.org/10.26701/ems.1395362>
15. ASTM D790-17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM, 2017.