

PROJETO DE PESQUISA

**Anisotropia de propriedades mecânicas de poliamida 12 processada por
manufatura aditiva em tecnologia MJF**

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Candidato: Renato da Cunha Araújo

renato_c_araujo@hotmail.com

Início: março de 2021

Conclusão prevista: outubro de 2022

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM

Área de concentração: Materiais e Processos

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 parâmetros de produção, é preciso avaliar se as propriedades mecânicas de componentes produzidos por FFF ou MJF sofrem influência da direção de solicitação em relação à mesa de impressão, e esta é a motivação deste projeto, que tem por objetivo produzir, por método MJF, corpos de prova tração de poliamida 12 com 100% de preenchimento, em diferentes ângulos de orientação com relação ao plano da mesa do equipamento, avaliando a influência desta orientação nas propriedades mecânicas a tração, verificando se há anisotropia e em qual intensidade, para que o projeto de peças por MJF possa ser otimizado em termos de comportamento mecânico.

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).

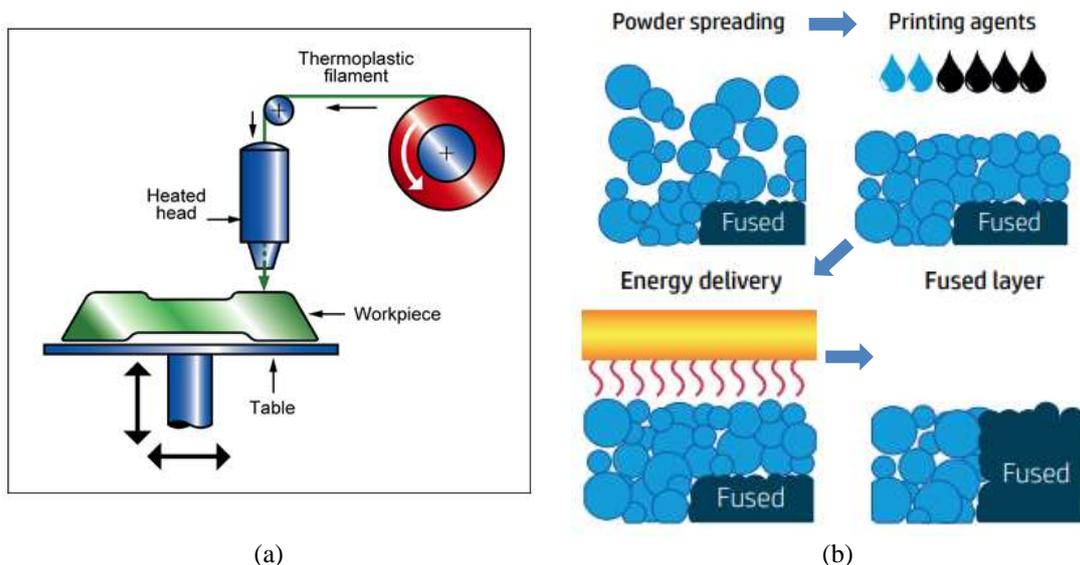


Figura 1. Representação esquemática de dois métodos de manufatura aditiva. Em (a), extrusão de material (também conhecido como FFF – Fused Filament Fabrication, ou FDM – Fused Deposition Modelling [2] e em (b), impressão multijatos (MJF – Multi Jetting Fusion) [3].

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 3 mm, é extrudado por uma cabeça aquecida, que tem um bico de extrusão fabricado em latão 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.

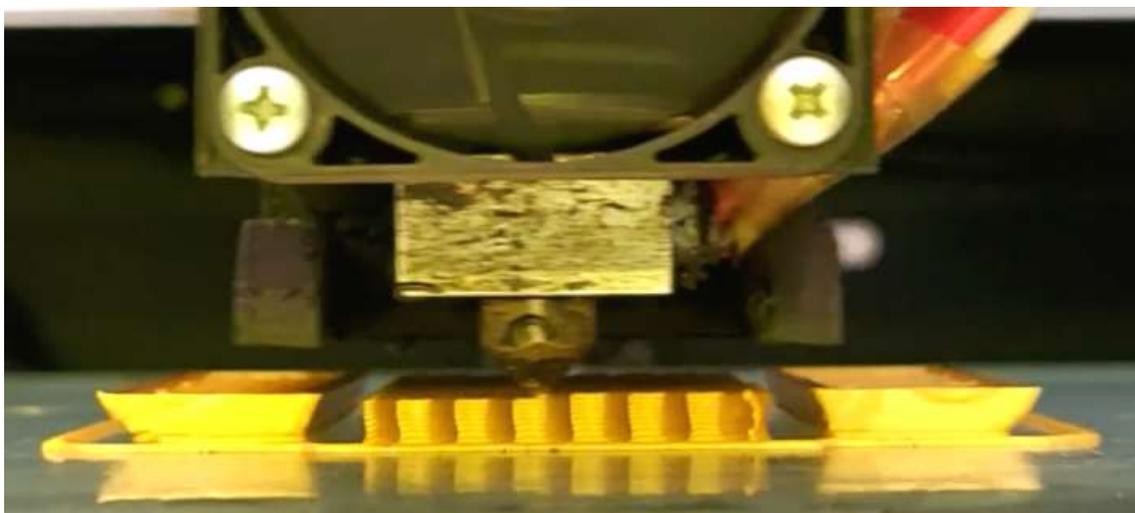


Figura 2. Deposição de PLA pelo processo FFF (fonte: autor).

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.

Já no processo MJF (Figura 1b) o polímero é introduzido na mesa de geração da parte na forma de grânulos de dimensões micrométricas, e agentes de adesão/cura são depositados, num processo semelhante ao das impressoras jato de tinta 2D de papel. Todavia, os agentes de adesão/cura podem percolar pelo leito de partículas poliméricas, e quando a fonte de calor, responsável pela cura e fusão das partículas na região em que o agente foi depositado passar pela superfície, levará a fusão de um volume abaixo da região depositada, criando então um “voxel” (uma unidade volumétrica individual na peça). O termo “voxel” é uma alusão ao termo “pixel”, normalmente utilizado para definir a resolução de uma imagem 2D. Voxel, portanto, é a resolução de pode se atingir no processo MJF, que depende da granulometria do polímero usado, da espessura da camada de polímero granulado depositado antes da cura, e das variáveis de deposição dos agentes de adesão/cura [1, 3, 4].

Assim, ao contrário do processo FFF, onde as camadas são compostas por linhas extrudadas continuamente, no processo MJF a aderência entre voxels é mandatória no

processo de adesão entre camadas, e ocorre praticamente da mesma forma em qualquer direção, apesar da adesão entre camadas ocorrer entre um leito de partículas da camada mais superior e um substrato já fundido na camada inferior. Por este motivo, alega-se [4] que a anisotropia de propriedades mecânicas de peças produzidas por MJF é bastante reduzida. Por exemplo, para poliamida 12, os valores médios de resistência mecânica de corpos de prova obtidos com o sentido longitudinal paralelos à mesa de impressão são idênticos aos médios obtidos em corpos de prova orientados com seu comprimento paralelo à direção da altura das peças (em torno de 50 MPa, em ensaios segundo a norma ASTM D638). Já o módulo de elasticidade apresenta diferenças (1700 MPa no plano, e 1900 MPa no sentido da altura) e diferenças ainda maiores são observadas no alongamento no escoamento (12% e 8%) e na ruptura (17% contra 9%). Tenacidade ao impacto segundo a norma ASTM D792, segundo a mesma norma, não apresenta diferenças significativas (3,7 contra 3,8 kJ/m²). Não há registros na literatura até o momento, no conhecimento do proponente deste projeto, de valores de propriedades em direções diferentes às ortogonais do plano da mesa ou altura da peça, e por isso maiores investigações sobre o comportamento mecânico de partes obtidas por MJF se justificam.

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.

Deste modo, fixando parâmetros de produção, é preciso avaliar se as propriedades mecânicas de componentes produzidos por FFF ou MJF sofrem influência da direção de solicitação em relação à mesa de impressão, e esta é a motivação deste projeto.

PROJETO DE PESQUISA

Objetivos

O objetivo deste projeto é produzir, por método MJF, corpos de prova tração de poliamida 12 com 100% de preenchimento, em diferentes ângulos de orientação com relação ao plano da mesa do equipamento, avaliando a influência desta orientação nas propriedades mecânicas a tração, verificando se há anisotropia e em qual intensidade, para que o projeto de peças por MJF possa ser otimizado em termos de comportamento mecânico.

Metodologia

Além da dedicação do professor-proponente como orientador (que trabalha em regime de tempo integral nesta Instituição), será necessária uma bolsa de mestrado, pelo período de dois anos, para aluno pré-selecionado.

O material (poliamida 12) será processado em impressora HP 3D Jet Fusion 4200 de propriedade da Volkswagen (SBC), com material cedido pela empresa e nas configurações previamente estabelecidas pelo fabricante do equipamento, com 100% de preenchimento, na forma de corpos-de-prova de tração seguindo a ASTM D638-14 [10], apresentado na Figura 3. Ensaios de tração segundo a ASTM D638-14 serão conduzidos no equipamento Instron do Centro Universitário FEI, em triplicata para cada orientação de corpos de prova indicada na Figura 4. Serão avaliados os valores de módulo de elasticidade, limites de escoamento e resistência, alongamento no escoamento e na ruptura. Análise fractográfica será conduzida com o auxílio de lupa estereoscópica será conduzido ao final dos ensaios, relacionando-se o comportamento mecânico ao modo de fratura, e verificando em todas estas observações a influência da orientação dos corpos de prova.

Na Figura 4, tem-se corpos de prova com seus eixos longitudinais com relação a mesa de impressão inclinados de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°, totalizando 13 orientações de deposição.

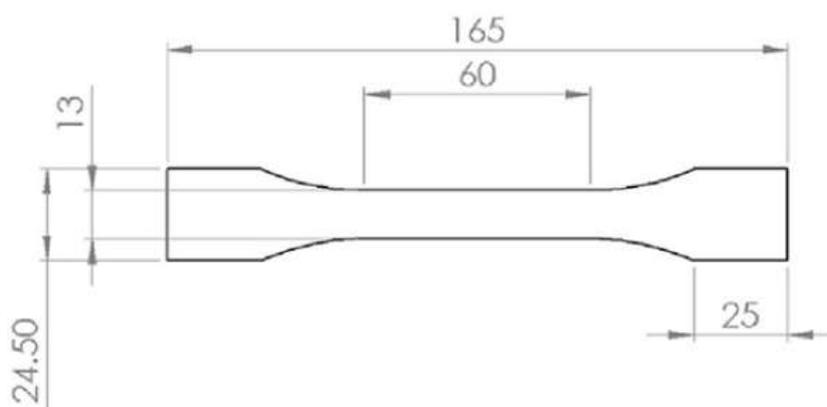


Figura 3. Corpo de prova de tração a produzir, segundo a ASTM D638-14 [10] (fonte: autor).

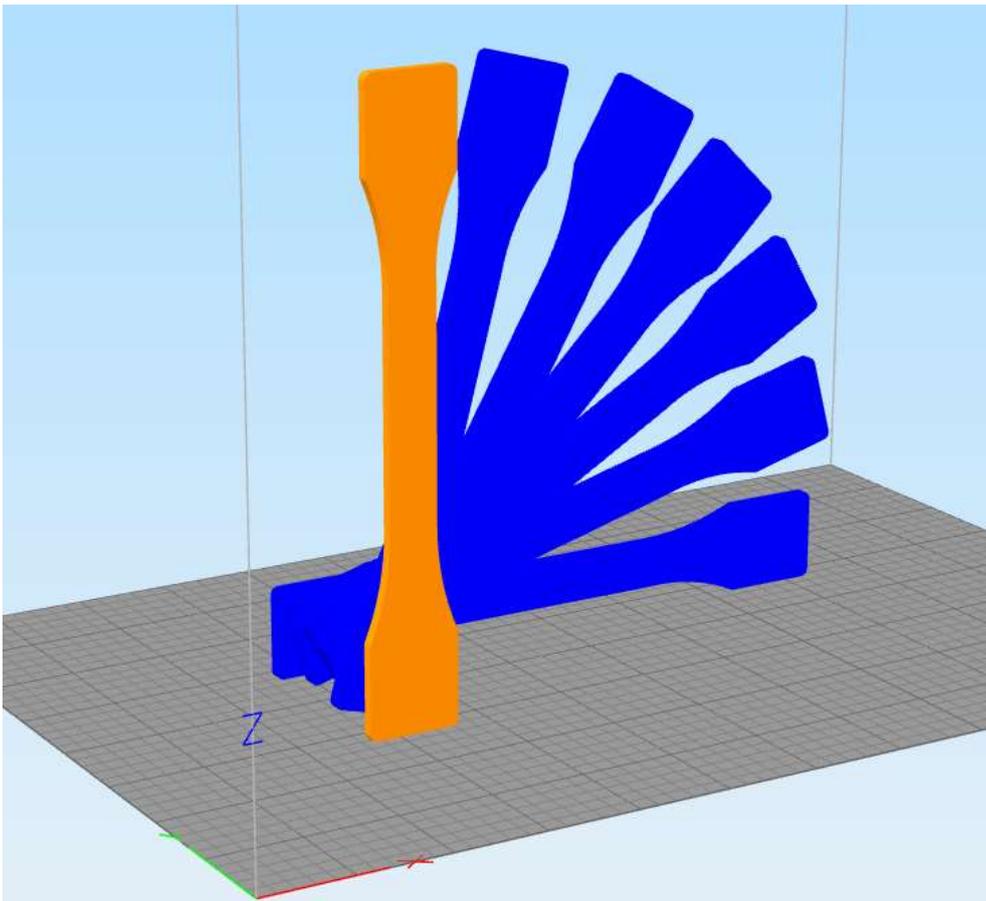
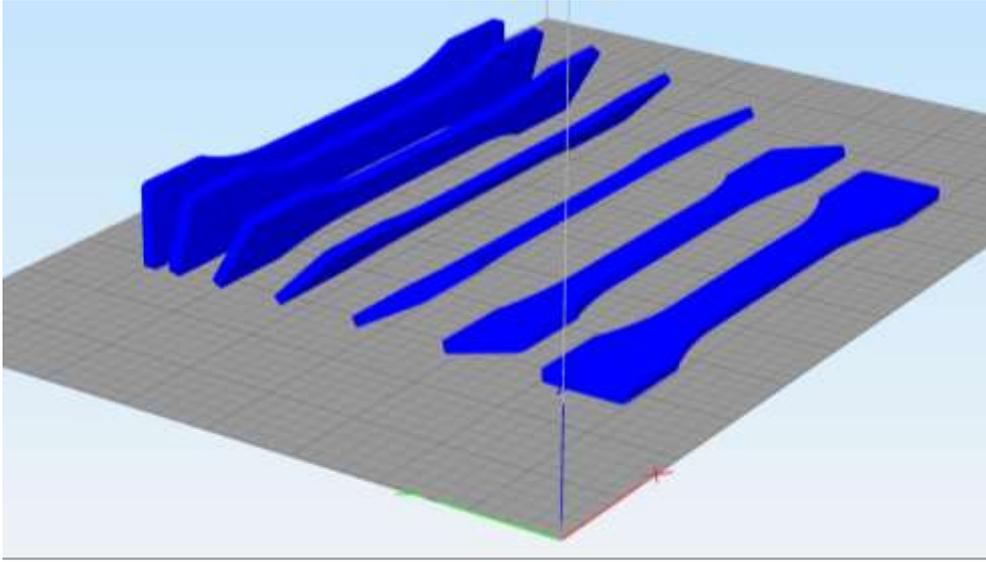


Figura 4. Orientação dos corpos de prova com relação à mesa de impressão (fonte: autor).

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	13	14	15
Obtenção de créditos faltantes (2 períodos, 4 disciplinas)	■	■	■	■	■	■	■	■							
Revisão da literatura	■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■
Obtenção das amostras				■	■	■									
Ensaio mecânicos de tração							■	■	■	■	■				
Análise dos resultados											■	■	■	■	■
Elaboração de exame de qualificação										■	■	■			
Elaboração da dissertação													■	■	■

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. ASTM International (2014), “Standard test method for tensile properties of plastics”, ASTM D638-14