

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Daniel Marcos Souza do Couto**

**Desenvolvimento e implementação de um algoritmo para  
deposição variável de camadas aplicado ao processo  
aditivo por extrusão**

**São Carlos**

**2023**



**Daniel Marcos Souza do Couto**

**Desenvolvimento e implementação de um algoritmo para  
deposição variável de camadas aplicado ao processo  
aditivo por extrusão**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Dra. Zilda de Castro  
Silveira

**São Carlos  
2023**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C184d      Couto, Daniel M.S.  
Desenvolvimento e implementação de um algoritmo  
para deposição variável de camadas aplicado ao processo  
aditivo por extrusão. / Daniel M.S. Couto; orientadora  
Zilda de Castro Silveira; coorientadora Henrique T.  
Idogava. São Carlos, 2023.

Monografia (Graduação em Engenharia de  
Computação) -- Escola de Engenharia de São Carlos e  
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da  
Universidade de São Paulo, 2023.

1. Fatiamento digital controlado. 2. Design for  
Additive Manufacturing (DfAM). 3. Linguagem Python. 4.  
Métodos de otimização. I. Título.



# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Daniel Marcos Souza do Couto

Título: "Desenvolvimento e implementação de um algoritmo para deposição variável de camadas aplicado ao processo aditivo por extrusão"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 14 / 12 / 23,

com NOTA 10,0 (   , Dt ), pela Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira - Orientadora - SEM/EESC/USP

Mestre Dávila Moreira Lopes Silva - EESC/USP

Prof. Dr. Pedro de Oliveira Conceição Junior - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior



## RESUMO

COUTO, D. M. S. **Desenvolvimento e implementação de um algoritmo para deposição variável de camadas aplicado ao processo aditivo por extrusão.** 2023. 61p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

A Manufatura Aditiva (MA) representa um processo de fabricação digital por adição de material que compreende conhecimentos multidisciplinares, com interfaces na área de materiais, engenharia elétrica, engenharia mecânica, engenharia de produção, mecatrônica e computação. Por se tratar de uma tecnologia recente, os trabalhos voltados em melhorias de estruturas da máquina e de peças impressas mostram-se de grande valia tanto no sentido comercial quanto científico. Este trabalho representa a continuidade da linha de pesquisa referente à estruturação de um procedimento computacional em python de controle de fluxo de material associado às estratégias de fatiamento para a geração código G para a fabricação de estruturas avançadas por MA. O software base de fatiamento para MA foi desenvolvido e testado na elaboração de peças funcionais utilizando a variação de fluxo de material para o processo aditivo por extrusão. O objetivo principal deste trabalho é a estruturação e validação de um procedimento computacional em python que consiga controlar o fluxo de material em equipamentos de impressão 3D por extrusão de filamento. Para isso será necessário validar a robustez do software proposto de fatiamento para a publicação em plataforma aberta open-source. A interface do software proposto com os equipamentos de impressão 3D é feita a partir da linguagem G, que descreve as instruções para cada motor e sensor do equipamento. A validação da robustez do software leva em consideração o fatiamento e processamento de peças complexas encontradas em repositórios abertos e sua interface com usuário. O software é implementado em linguagem python e os modelos serão implementados em código G e produzidos em impressoras 3D comerciais do tipo low-end. A publicação do código proposto junto da documentação em plataforma de código aberto irá proporcionar o compartilhamento do conhecimento, onde mais usuários possam interagir com o código, promovendo testes, correções e evoluções dentro das versões. Além da publicação do código serão elaborados ensaios mecânicos dos corpos de prova, manuais processuais, tutoriais (em mídia audiovisual) e um artigo científico. O projeto mantém a sua natureza interdisciplinar, incluindo as ciências dos materiais, sistemas digitais, sistemas embarcados, materiais de engenharia, processo de fabricação, projeto mecânico e computação.

**Palavras-chave:** fatiamento digital controlado. Design for Additive Manufacturing (DfAM). linguagem python. métodos de otimização.

## ABSTRACT

COUTO, D. M. S. **Development and implementation of an algorithm for variable layer deposition applied to the additive extrusion process.** 2023. 61p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Additive Manufacturing (AM) represents a digital manufacturing process by adding material that comprises multidisciplinary knowledge, with interfaces in the areas of materials, electrical engineering, mechanical engineering, production engineering, mechatronics and computing. As it is a recent technology, work aimed at improving machine structures and printed parts proves to be of great value in both a commercial and scientific sense. This work represents the continuation of the line of research regarding the structuring of a computational procedure in Python to control material flow associated with slicing strategies for generating G code for the manufacture of advanced structures using AM. The basic slicing software for AM was developed and tested in the creation of functional parts using material flow variation for the additive extrusion process. The main objective of this work is the structuring and validation of a computational procedure in Python that can control the flow of material in 3D printing equipment using filament extrusion. To do this, it will be necessary to validate the robustness of the proposed slicing software for publication on an open-source platform. The interface of the proposed software with 3D printing equipment is made using the G language, which describes the instructions for each motor and sensor on the equipment. Validation of software robustness takes into account the slicing and processing of complex parts found in open repositories and their user interface. The software is implemented in Python language and the models will be implemented in G code and produced on low-end commercial 3D printers. The publication of the proposed code along with the documentation on an open source platform will provide knowledge sharing, where more users can interact with the code, promoting tests, corrections and evolutions within the versions. In addition to publishing the code, mechanical tests of the specimens, procedural manuals, tutorials (in audiovisual media) and a scientific article will be prepared. The project maintains its interdisciplinary nature, including materials sciences, digital systems, embedded systems, engineering materials, manufacturing process, mechanical design and computing.

**Keywords:** controlled digital slicing. Design for Additive Manufacturing (DfAM). python language. optimization methods.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modos de falhas durante o processo de extrusão (da esquerda para direita): diâmetro inconsistente do filamento que excede o diâmetro do bico; retorno anular e flambagem do filamento . . . . .	18
Figura 2 – Diagrama de Venn dos parâmetros de Processo da Manufatura Aditiva	20
Figura 3 – Mecanismo de extrusão FFF com matéria-prima filamentar, baseada na patente FDM® . . . . .	26
Figura 4 – Fluxo de dados digitais e físicos envolvidos na fabricação de uma peça por Manufatura Aditiva . . . . .	28
Figura 5 – Classificação dos métodos de fatiamento: (A) planar uniforme, (B) planar adaptativo, (C) non-layerwise e (D) multidirecional. . . . .	29
Figura 6 – Estruturas avançadas: (a) Unidade celular, variações e amostra uniaxial para compressão Fonte: (NAZIR; JENG, ) (2020); (b) Materiais responsivos. Adaptado de (GARDAN, 2018); (c) Compliant mechanism Adaptado de (BYUCMR, 2020). . . . .	31
Figura 7 – Parâmetros de impressão . . . . .	34
Figura 8 – Fluxograma do Algoritmo . . . . .	37
Figura 9 – Representação dos objetos no Algoritmo . . . . .	38
Figura 10 – Impressora Sethi 3D . . . . .	39
Figura 11 – Máquina de ensaio cíclico (SMM-EESC-USP) . . . . .	41
Figura 12 – Fatiamento do modelo 3D Benchy no software desenvolvido . . . . .	43
Figura 13 – Importação de dois objetos representados pelas retângulos em azul e o quadrado vermelho (esquerda) e o fatiamento heterogêneo de uma camada (direita) . . . . .	44
Figura 14 – Impressão 3D da região flexível em peça de ABS desenvolvida no código proposto . . . . .	44
Figura 15 – Corpos de prova variando a quantidade de raster para o perímetro . . . . .	46
Figura 16 – Corpos de prova variando o perímetro . . . . .	47
Figura 17 – Corpos de prova em forma de cubo com a demarcação da direção de impressão . . . . .	48
Figura 18 – Comparação entre calotas esféricas. Fatiamento uniforme (esquerda) e com o fatiamento adaptativo (direita) . . . . .	49
Figura 19 – Amostras recobertas com espessura de ouro de 6 nm . . . . .	50
Figura 20 – Comparação entre camadas para a impressão 45°/-45° por MEV do código desenvolvido no trabalho (primeira), pelo software Simplify3D (segunda) e Slic3R (terceira) . . . . .	51
Figura 21 – Detalhe das camadas 45°/-45° do código desenvolvido no trabalho. . . . .	52

Figura 22 – Comparação entre camadas para a impressão $90^{\circ}/0^{\circ}$ por MEV do código desenvolvido no trabalho (primeira), pelo software Simplify3D (segunda) e Slic3R (terceira). . . . .	53
Figura 23 – Detalhe das camadas $90^{\circ}/0^{\circ}$ do código desenvolvido no trabalho. . . . .	54
Figura 24 – Corpos de Prova para Ensaio Cíclico, sendo L a distância variada no ensaio. . . . .	54
Figura 25 – Ensaio cíclico com os corpos de prova em tração para o caso de Estreitamento de Seção (esquerda) e Feixes (direita). . . . .	55
Figura 26 – Fatiamento da geometria Snap-fit . . . . .	56
Figura 27 – Amostras impressas do Snap-fit . . . . .	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclaturas utilizadas no equacionamento . . . . .	33
Tabela 2 – Dimensões dos corpos de prova cúbicos . . . . .	48
Tabela 3 – Resultados parciais do Ensaio Cíclico . . . . .	55





## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	17
2	OBJETIVOS . . . . .	23
3	EMBASAMENTO TEÓRICO . . . . .	25
3.1	Conceitos sobre técnica aditiva por extrusão FFF (Filament Fused Fabrication) . . . . .	25
3.2	Conceitos de planejamento do processo e métodos de fatiamento em manufatura aditiva . . . . .	27
3.3	Estruturas avançadas em Manufatura Aditiva . . . . .	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .	33
4.1	Equacionamento para controle de impressão . . . . .	33
4.2	Desenvolvimento do Algoritmo . . . . .	36
4.3	Equipamento de impressão 3D . . . . .	38
4.4	Microscopia por Varredura (MEV) . . . . .	40
4.5	Ensaio Cíclico . . . . .	40
5	RESULTADOS . . . . .	43
5.1	Desenvolvimento do código . . . . .	43
5.2	Testes preliminares de corpos de prova . . . . .	45
5.3	Análise da morfologia da mesoestrutura . . . . .	49
5.4	Ensaio Cíclico de Tração . . . . .	54
5.5	Caso de Estudo: Snap-fits . . . . .	55
6	CONCLUSÃO . . . . .	57
	REFERÊNCIAS . . . . .	59



## 1 INTRODUÇÃO

A linha de pesquisa em Manufatura Aditiva se caracteriza pela sua natureza interdisciplinar, na qual seu avanço depende dos conhecimentos transversais integrados de diferentes especialidades dentro da engenharia, tais como, áreas de projeto e fabricação, ciência e engenharia de materiais, instrumentação, controle e estruturas e implementação de trajetórias e empilhamento de camadas.

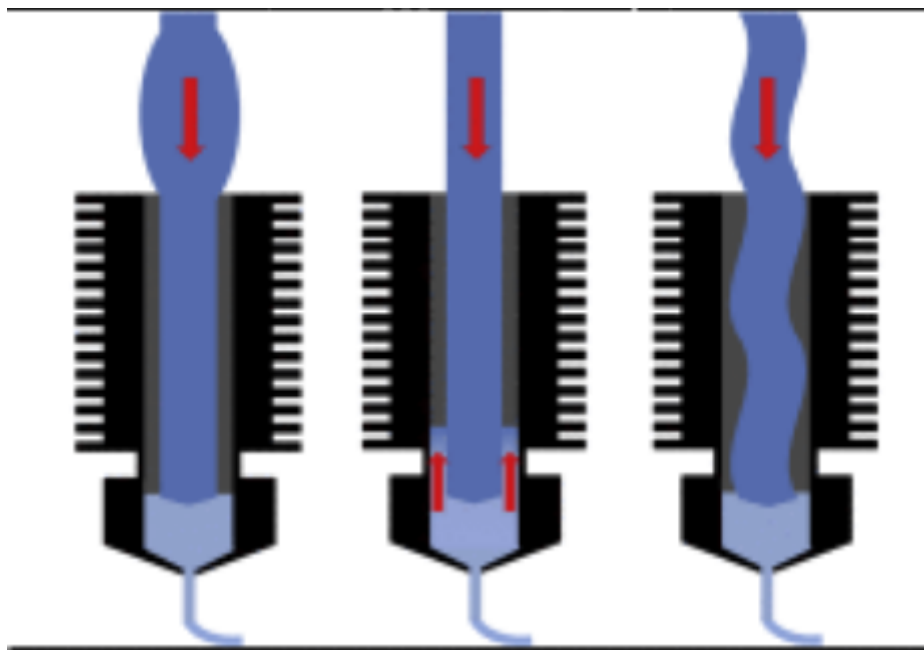
A técnica aditiva por extrusão ou FFF (Fused Filament Deposition), definida pela ISO-ASTM 52900;11961: 2015 (E) é amplamente utilizada, a partir de matéria-prima termoplástica sob a forma sólida filamentar (THOMPSON *et al.*, 2016; BALANI *et al.*, 2019)

Seu papel relevante e popularidade dentro das técnicas aditivas decorre das contribuições de pesquisa e do mecanismo mais simplificado de deposição, oriundos de projetos acadêmicos como o RepRap.org e Fab@home, das Universidades de Bath e Cornell, respectivamente, dando início nos anos de 2006 e 2007, ao movimento open source design em impressão 3D low-end e criando o conceito das redes mundiais FabLabs. Com relação às pesquisas desenvolvidas, diversos trabalhos têm sido publicados com diferentes focos de investigação: macroestrutura por meio da qualidade final da peça considerando acabamento superficial e a precisão geométrica; ONWUBOLU; RAYEGANI; GALANTUCCI *et al.*; VOLPATO *et al.*; CHAIDAS *et al.*; TYMRAK; KREIGER; PEARCE; ALAFAGHANI *et al.*; SANTANA *et al.*, bastante correlacionada com as áreas de processo de fabricação e caracterização de propriedades mecânicas; mesoestrutura por meio do estudo da morfologia de deposição (estruturação), e mais recentemente trabalhos teórico experimental para investigações do comportamento termomecânico das microestruturas e mesoestruturas. (COSTA; DUARTE; COVAS, 2015; BALANI *et al.*, 2019)

Durante o processo de deposição aditivo por extrusão, há um conjunto de requisitos técnicos multifatoriais, incluindo àqueles relacionados com o comportamento reológico/mecânico filamentar, que deve atender a requisitos técnicos, como diâmetros calibrados dos bicos de deposição correlacionados com uma tolerância de ovalização de forma, para uma taxa constante de fluxo no tempo (SPOERK; HOLZER; GONZALEZ-GUTIERREZ, 2019). Também devem apresentar uma rigidez suficiente que permita que o filamento possa ser conduzido em formato de bobina até a câmara de aquecimento e, então depositado em deslocamento na base móvel de deposição. Alguns estudos citam um campo de tensão mínima em torno de 5%, de modo que, o filamento possa ser continuamente enrolado. Essa variação de tensão pode estar relacionada com a alta quantidade de preenchimento nos filamentos, de acordo com a sua pigmentação (SPOERK; HOLZER; GONZALEZ-GUTIERREZ, 2019). Essa condição conduz a modos de falhas no processo de

deposição e, conseqüentemente na parada do equipamento e/ou falhas primárias nas peças finais. A Figura 1 ilustra esses modos de falha primários, em sistemas aditivos baseados em FFF, que possui similaridade com princípios físicos de reômetros capilares.

Figura 1 – Modos de falhas durante o processo de extrusão (da esquerda para direita): diâmetro inconsistente do filamento que excede o diâmetro do bico; retorno anular e flambagem do filamento



Fonte: (GILMER *et al.*, 2018)

Para que haja repetição com confiabilidade do movimento entre as roda motriz e a conduzida, o filamento deve manter sua forma, suportar as forças de atrito e o carregamento de flambagem no período de plastificação. Essa condição só pode ser garantida, desde que sejam aplicados uma força e um valor de rigidez suficientes ao segmento filamentar envolvido no processo de deposição.

Considerando materiais compostos (multicomponentes), uma forte adesão à matriz de preenchimento é um pré-requisito para alta resistência e rigidez dos filamentos. Para que o material seja depositado de maneira controlada sem excesso de material, a viscosidade do material do filamento não pode ser muito baixa. Simultaneamente, se a viscosidade for alta, o filamento precisa estar submetido a uma força e rigidez para ser extrudado pelo bico.

Para materiais termoplásticos semicristalino, os filamentos com um baixo grau de cristalinidade e uma lenta taxa de cristalização são mais indicados para a técnica aditiva FFF, pois a tendência do material de encolher e deformar é, portanto, extensivamente reduzida. Simultaneamente, a expansão térmica é diminuída, resultando em uma peça impressa

em 3D com dimensões mais precisas. (SPOERK; HOLZER; GONZALEZ-GUTIERREZ, 2019)

Peças fabricadas pela técnica FFF são depositadas sobre uma plataforma, normalmente móvel. A aderência entre a primeira camada depositada e a plataforma determina parte da integridade estrutural da impressão. Se a adesão for muito fraca, o material depositado se solta da plataforma. Como resultado, a produção da peça final não pode ser continuada sem falhas. Se a adesão for muito boa, especialmente à temperatura ambiente, o produto final não poderá ser removido da plataforma sem danificar a peça, a plataforma ou ambas. Em um processo ideal, a peça é processada em alta adesão entre a primeira camada e a plataforma, controlável, por exemplo, por meio da temperatura da plataforma de construção, considerando que a remoção da peça é realizada em um estado de baixa adesão. (GILMER *et al.*, 2018)

Portanto, pode-se desdobrar três conjuntos de características e parâmetros técnicos dentro de três domínios do conhecimento: a) parâmetros digitais; b) parâmetros físicos e c) parâmetros do material (SILVEIRA; IDOGAVA, 2019). Para a técnica aditiva FFF, o conjunto de parâmetros digitais podem ser exemplificados pelo modelo geométrico digital (sistemas CAD), arquivos de transferências (.stl;.iges; amf); arquivo de fatiamento; funções e estratégias em código G de posicionamento e deslocamento durante a impressão, estratégias de empilhamento das camadas. O conjunto de parâmetros físicos podem ser exemplificados pelos sistemas de controle e instrumentação, tais como: elementos de movimentação, de transmissão e sensoramento. Por fim, os parâmetros operacionais relacionados com o processamento do material de deposição, podem ser exemplificados por suas características e parâmetros físicos e mecânicos, que se relacionam com a taxa e temperatura de extrusão.

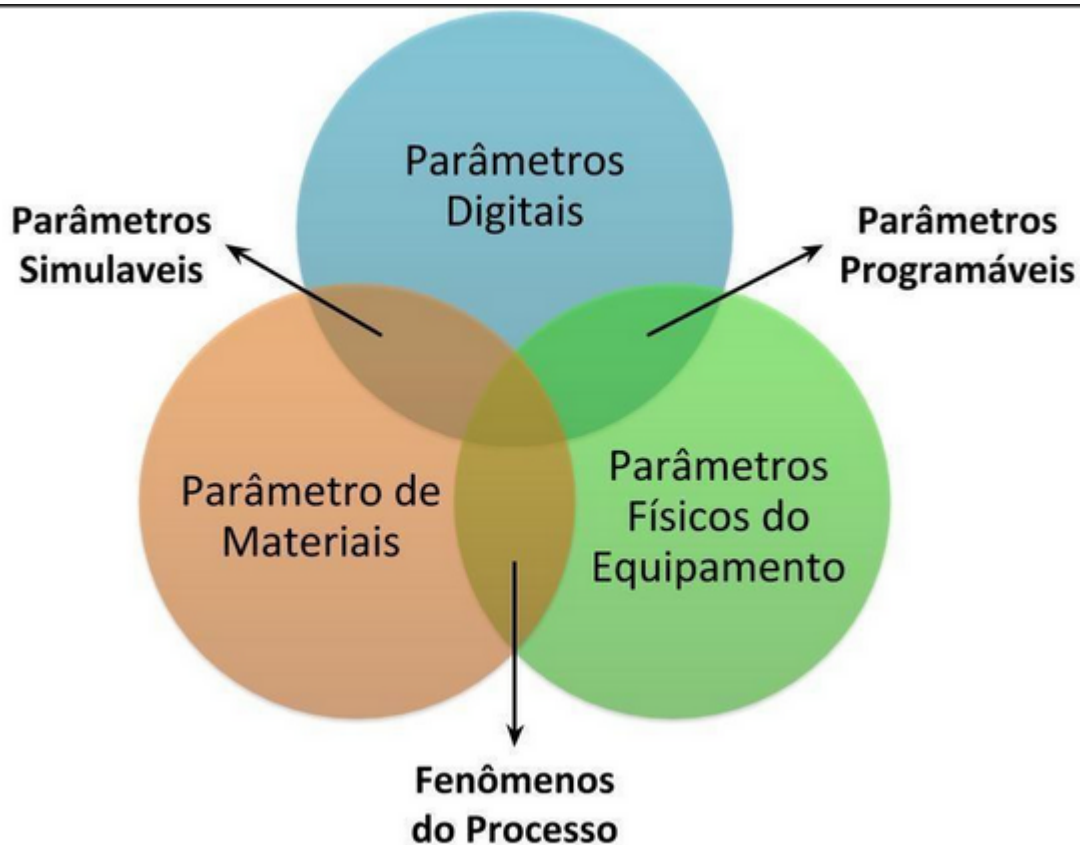
Em relação aos equipamentos disponíveis de manufatura aditiva, há duas classes: industriais (normalmente licenciados sob patentes) e de equipamentos open source (low-end ou middle-end). Os equipamentos do tipo low-end apesar de terem menos robustez estrutural e de instrumentação e controle são projeto abertos, que amplia o leque de pesquisas nas áreas de materiais de engenharia e monitoramento, por exemplo. O diagrama representado na Figura 2, é uma concepção das oportunidades de pesquisa com a interseção dos domínios de conhecimento na área de manufatura aditiva. (SILVEIRA; IDOGAVA, 2019)

- **Parâmetros Programáveis:** A programação envolve o setup da máquina, na qual os parâmetros físicos são controlados por meio de uma linha de comando expresso por um código. O mais usual do mercado é o Código-G. Além de conter as informações básicas dos Parâmetros Físicos da arquitetura do equipamento, também controla a velocidade de extrusão, os limites da movimentação, dentre outros.
- **Parâmetros Simuláveis:** A simulação envolve a previsão do comportamento do mate-

rial em ambiente virtual. Análises térmicas, fluídicas, mecânicas são exemplos de aplicações de parâmetros digitais em materiais.

- Fenômenos do Processo: Relacionado com as propriedades físicas da máquina e as propriedades do material. São fenômenos dessa área: fluxo do material no estado fundido e transferência de calor. O conhecimento e aplicação de conceitos reológicos é importante para compreender o comportamento do material no estado plastificado (fundido).

Figura 2 – Diagrama de Venn dos parâmetros de Processo da Manufatura Aditiva



Fonte: (SILVEIRA; IDOGAVA, 2019)

Dessa forma, a interseção de todos os parâmetros resulta no domínio pleno de operação do processo da técnica aditiva. O domínio dos parâmetros permite um controle do processo de manutenção e utilização do equipamento e do material. Diminuição da interferência de fatores externos que garantem escalabilidade, assim como o ganho de propriedade e qualidade das peças impressas.

Existem vários parâmetros que determinam a qualidade de peças impressas, destaca-se a trajetória de impressão que é gerada por meio do fatiamento da geometria e enviada

à máquina por meio do código-G, o mesmo utilizado em centros de usinagem de comando numérico computadorizado (CNC). A linguagem G desenvolvida principalmente, para equipamentos CNC foi adotada como padrão pelo sistema ISSO (ISO 6983-1-2009), mantendo funções básicas e universais. Os fabricantes possuem liberdade para criar as próprias funções auxiliares, desde que mantenham as funções básicas de acordo com a norma.

A implementação de estratégias numéricas para trajetórias e empilhamento entre camadas e análise do processo de deposições geram diferentes configurações e propriedades para as mesoestruturas. Esse estudo tem influência nas propriedades mecânicas e físicas do objeto/peça final. Dentre essas grandezas, o controle da porosidade e geração de gradientes funcionais parametrizados com características de resistência mecânica, fluxo de material, por exemplo, podem gerar estruturas com requisitos técnicos com diversas aplicações. Em complemento a possíveis oportunidades de pesquisa, cabe ressaltar que no primeiro trimestre de 2020 houve um movimento mundial iniciado por comunidades de Impressão 3D, para a fabricação emergencial de complementos de Equipamentos de Proteção Individuais - EPI's, principalmente para atender localmente profissionais da área de saúde em centros hospitalares, devido a pandemia declarada pelo OMS (Organização Mundial da Saúde) do coronavírus COVID-19 (WORLDHEALTHORGANIZATION, 2020). Dentro desse escopo, novas pesquisas para atender as normas específicas como a brasileira, para artigos de não tecidos de uso odonto-médico-hospitalar, ABNT NBR 15052:2004 e também peças de reposição de sistemas de respiradores artificiais devem se concentrar em materiais que possam ter graus biológicos efetivos e configurações de mesoestruturas para atender essas classes de doenças infectocontagiosas, bem como aumentar a impressão de mais peças simultaneamente, fornecendo uma maior produtividade.

Portanto, esse trabalho como pesquisa em Manufatura Aditiva se situa entre o estudo de interface entre parâmetros programáveis e os fenômenos do processo, com o objetivo de otimizar o planejamento do processo da técnica aditiva por extrusão, em função de parâmetros reológicos.





## 2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a estruturação e validação de um procedimento computacional que consiga controlar o fluxo de material em equipamentos de impressão 3D por extrusão de filamento. O conteúdo está correlacionando conhecimentos abordados no curso de engenharia elétrica como sistemas digitais, sistemas microprocessados e sistemas embarcados num ambiente interdisciplinar. Os objetivos secundários incluem:

- Validação do código em equipamentos de diferentes fabricantes;
- Validação experimental: Serão testadas geometrias complexas com deposição variável utilizando a técnica aditiva por extrusão.
- Publicação do código em versão estável em plataforma aberta de forma a compartilhar o conhecimento e promover a evolução do trabalho para novas esferas do conhecimento.



### 3 EMBASAMENTO TEÓRICO

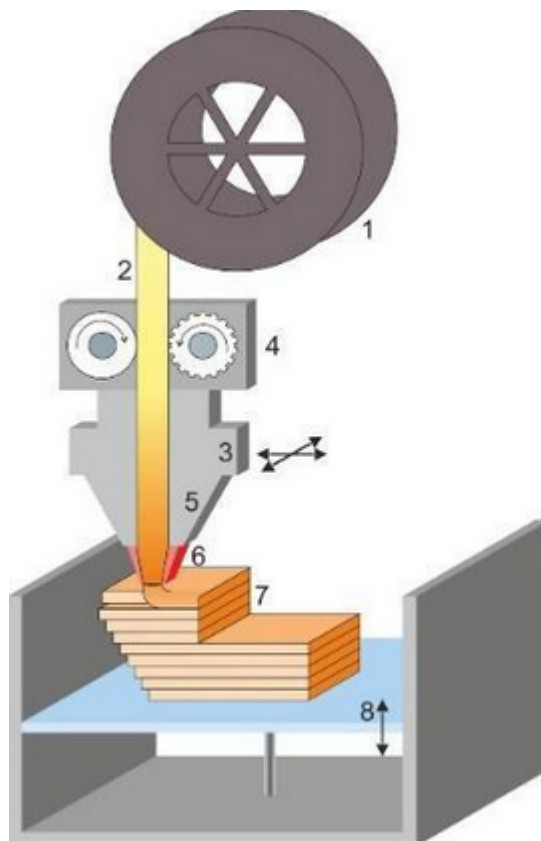
#### 3.1 Conceitos sobre técnica aditiva por extrusão FFF (Filament Fused Fabrication)

A tecnologia de Manufatura Aditiva tem como princípio físico, a construção por adição de camada a camada com espessuras finitas, as quais são aderidas umas às outras por diferentes fontes de energia e, portanto, diferentes mecanismos físicos. A geometria resultante será uma aproximação dos dados originais de modo que, quanto mais fina as camadas, mais próxima será a geometria impressa com a geometria de origem. Segundo GIBSON; ROSEN; STUCKER, as diferentes técnicas aditivas conferem diferentes qualidades geométricas, acabamento superficial e propriedades mecânicas, bem como diferentes tempos de fabricação e de pós-processamento.

A técnica aditiva por extrusão também conhecida como ME-AM, Fused Filament Fabrication (FFF) ou Fused Layer Modeling foi desenvolvida no final de 1980 pela Stratasys Inc. sob o nome de Fused Deposition Modeling (FDM®). (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010; SPOERK; HOLZER; GONZALEZ-GUTIERREZ, 2019)

O princípio de funcionamento do processo aditivo para extrusão em manufatura aditiva consiste na deposição de material plastificado com fonte de calor camada a camada. Ilustrada pela Figura 3 baseada na solução FDM®, o processo consiste na condução de um filamento termoplástico enrolado inicialmente em um carretel (1), que é conduzido até a entrada de um cabeçote (2), no qual dois rolos, um deles motor em movimento de contra rotação (4), que conduz a uma região de aquecimento (3) e plastificação (5) que se desloca até um bico calibrado (6). O material conformado é depositado em uma plataforma normalmente aquecida e móvel, resultando em uma fabricação camada por camada do elemento estrutural de acordo com o contorno de camada definido por um sistema CAD.

Figura 3 – Mecanismo de extrusão FFF com matéria-prima filamentar, baseada na patente FDM®



Fonte: (SPOERK; HOLZER; GONZALEZ-GUTIERREZ, 2019)

Entretanto, há outros mecanismos alternativos e adaptativos, que permitem processar material filamentar (GUTIERREZ *et al.*, 2018); ou outras formas de matéria-prima sob a forma viscosa e particulada (princípios de êmbolos) (VOLPATO *et al.*, 2015); (GUTIERREZ *et al.*, 2018); (DUTY *et al.*, 2018). A matéria-prima também pode ser fornecida sob a forma de pó. (SILVEIRA *et al.*, 2014; VALKENAERS *et al.*, 2013; NETTO; SILVEIRA, 2017)

A escolha do processo aditivo para fabricação é feita numa decisão multicritério. A técnica FFF apresenta as principais vantagens: a) mecanismo simplificado para processamento e deposição das camadas; b) uso de termoplásticos de grau de engenharia; c) não requer processo de cura após fabricação; d) Baixo custo de insumos e manutenção considerando equipamentos low-end. Algumas das limitações e oportunidades de pesquisa: a) o bico calibrado limita a precisão e a resolução dimensionais e torna o processo aditivo mais lento, limitado pela vazão de material no bico de extrusão; b) há a necessidade de estrutura de suportes em regiões suspensas ou com geometrias negativas com ângulos de inclinação inferior ao de suporte, ocasionando o aumento do uso de matéria-prima e pós-processamento; c) o aumento de opções de materiais de engenharia ainda estão em desenvolvimento. (VOLPATO *et al.*, 2017; WHOLERS *et al.*, 2014)

A melhoria e otimização de peças geradas por manufatura aditiva requer conhecimentos interdisciplinares entre áreas específicas da engenharia. Portanto, a tomada de decisão ocorre sob um conjunto multifatorial de parâmetros e características técnicas. Há na literatura técnica, diversos trabalhos que investigam apenas um domínio de conhecimento, por exemplo, processos de fabricação, com pouca interface nos conceitos de reologia, no caso de polímeros, e mais recentemente a manufatura ativa com materiais metálicos, que exigem conhecimentos sólidos também em transferência de calor, transformação de fases, ensaios não destrutivos, por exemplo. Alguns parâmetros listados na literatura são: Orientação de construção, espessura de camada, largura do perímetro/contorno, número de contornos, número de perímetros, ângulo de varredura (raster angle); espaçamento entre filamentos (air gap), espaçamento entre contorno e preenchimento, temperatura de extrusão, temperatura da base, temperatura externa. (HOSSAIN *et al.*, 2013; ONWUBOLU; RAYEGANI, 2014)

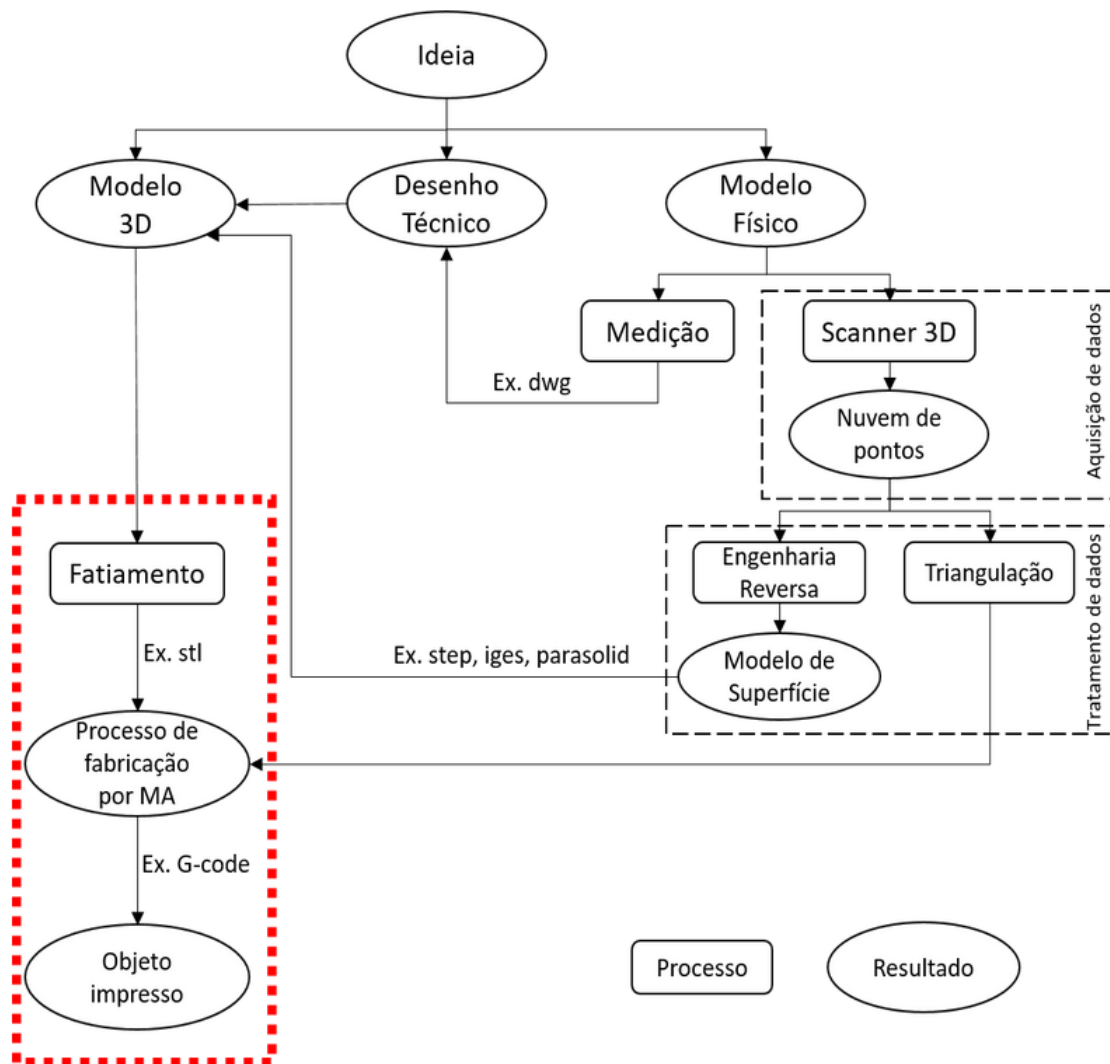
GALANTUCCI *et al.* citam que a acurácia e precisão dimensional de peças produzidas por processos aditivos FFF podem ser afetadas diretamente pelos parâmetros de processo e pela reologia do material, como por exemplo, variações na geometria dos filamentos depositados em relação à forma cilíndrica de referência; elevados valores de espessura de camadas, influenciando diretamente na integridade do material e aumentando o volume de material depositado e, também causando contração do material e falhas de adesão com as primeiras camadas geradas.

Nesse conjunto de parâmetros, a interface computacional entre o sistema CAD e o fatiamento e deposição do material, tem particular relação com os algoritmos de empilhamento e trajetória. A trajetória de deposição do material é gerada por programas baseados na linguagem computacional de código G desenvolvidas para equipamentos CNC. Por meio desse programa são determinadas as coordenadas que são traduzidas no movimento do cabeçote da extrusora. Por outro lado, os algoritmos de estratégias de empilhamento podem trazer benefícios com relação ao tempo de deposição, aumentando a produtividade e melhorando as propriedades macroscópicas (resistência mecânica), por meio de melhor controle da taxa de vazão que influencia diretamente nas condições de adesão do material na superfície e entre as camadas.

### **3.2 Conceitos de planejamento do processo e métodos de fatiamento em manufatura aditiva**

De uma forma geral, a tecnologia de Manufatura Aditiva está inserida em um fluxo digital e físico desde a concepção da solução técnica até a sua fabricação (THOMPSON *et al.*, 2016), apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxo de dados digitais e físicos envolvidos na fabricação de uma peça por Manufatura Aditiva



Fonte: Adaptado de (THOMPSON *et al.*, 2016)

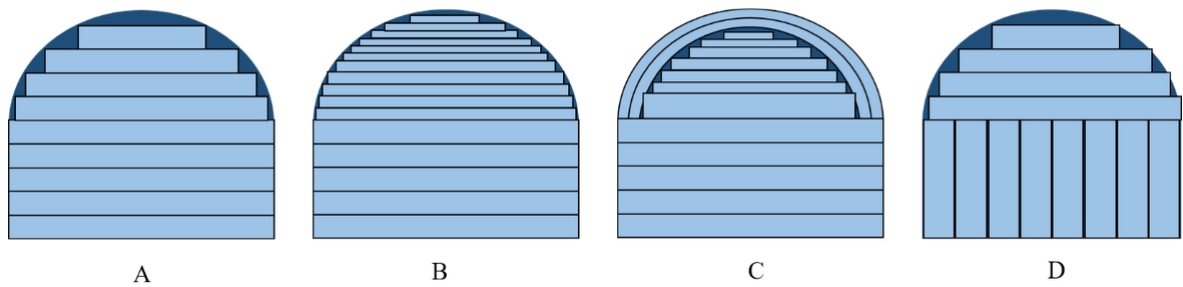
O trabalho proposto está inserido nas atividades no contorno demarcado em vermelho da Figura 4. Essas atividades estão inseridas no Planejamento do Processo em Manufatura Aditiva, com variações em relação aos parâmetros do tipo de material e fonte de energia.

Para ser funcional e permitir a repetibilidade de processo, um programa de fatiamento deve ser capaz de dividir um modelo geométrico tridimensional em camadas e, gerar o código-G para cada camada. Nas técnicas aditivas, os modelos geométricos precisam ser processados para que sejam transmitidos em coordenadas para as impressoras 3D. Os programas podem ser comerciais, normalmente protegidos por propriedade intelectual ou de código aberto. NILSIAM; SANDERS; PEARCE citam dois programas de fatiamento de código aberto: Cura e Slic3r para técnicas aditivas com polímeros. Porém, mesmo os

programas comerciais e os abertos apresentam ainda muitas restrições técnicas, como por exemplo: a) alterações das métricas da largura do perímetro, para rastrear a contagem, porque a largura da linha é constante; b) limitações no controle da deposição/vazão de material in loco do primeiro filamento na base e nos filamentos subsequentes; c) iniciar o preenchimento imediatamente, a partir do último segmento do perímetro concluído e com direções limitadas.

Portanto, a geometria e suas características estruturais (features) da peça podem ser fabricadas com diferentes métodos de fatiamento. Segundo XU *et al.* os métodos de fatiamento podem ser classificados em três métodos: tradicional (fatiamento uniforme e adaptativo), multidirecional e non-layerwise, ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Classificação dos métodos de fatiamento: (A) planar uniforme, (B) planar adaptativo, (C) non-layerwise e (D) multidirecional.



Fonte: Elaborado pelo autor

O método de fatiamento uniforme é utilizado para peças com primitivas regulares sem ressaltos, separando o modelo ao longo de uma direção com uma série de planos paralelos. Dependendo da adaptabilidade da espessura da camada pode-se usar o fatiamento adaptativo. Para peças com geometrias mais complexas são utilizadas combinações primitivas regulares e estruturas compostas, especialmente com várias estruturas de direções e projeções gerando um fatiamento multidirecional. (VOLPATO *et al.*, 2017; XU *et al.*, 2018)

O método multidirecional é usado para dividir o modelo com vários conjuntos de planos, em direções diferentes. Para peças com formas livres, como geometrias com revolução, o método de fatiamento não planar é usado particionando o modelo em um conjunto de superfícies de formas livres. Os métodos de fatiamento multidirecional e não planar tem como objetivos aumentar a qualidade superficial e reduzir as estruturas de suportes das peças. (XU *et al.*, 2018)

Segundo VOLPATO *et al.*, XU *et al.* o método de fatiamento adaptativo está baseado nos seguintes critérios: extrapolação de contorno; refinamento uniforme gradual;



fatiamiento adaptativo local; acurácia na superfície com rapidez na construção de features internas. Os resultados observados no processo de fatiamento são: altura variada da camada com em relação à superfície, atende a requisitos de complexidade ou precisão. As principais vantagens: melhor qualidade de superfície; trata certa complexidade na direção da construção; implementação viável. As limitações do método são: deficiência em gerar ressaltos e features; dificuldade numérica em gerar estruturas com grau de complexidade maior (muitos detalhamentos). O método de fatiamento não planar está baseado nos seguintes critérios: segmentação de estruturas em projeção (ressaltos); extração do eixo centroide; fatiamento em coordenadas cilíndricas. Os resultados observados no processo de fatiamento são: considera informações geométricas (.stl) e não há formação de estrutura de suporte. As principais vantagens: pode minimizar o efeito da escada na peça final; não há necessidade de estrutura de suporte; é possível implementar features com maior complexidade geométrica em direções infinitas. As limitações do método são: algoritmo com grau de dificuldade de implementação, ainda limitado a casos específicos de geometrias, não há padronização em equipamentos comerciais e mesmo abertos.

Para materiais poliméricos e blendas, as condições de aderência são funções das condições reológicas do processamento do material e parâmetros de processo, com relação direta no programa de fatiamento e estratégia de deposição. Além da configuração das coordenadas do fatiamento das peças impressas, há outros parâmetros que podem ser variados por meio do programa de trajetória, como o fluxo do material.

### **3.3 Estruturas avançadas em Manufatura Aditiva**

Como citado na Introdução, a linha de pesquisa em Manufatura Aditiva MA é atualmente sustentada pela pesquisa em materiais, processos, projeto, software, instrumentação e controle. Na fronteira do conhecimento dentro da área de materiais, os esforços têm se concentrado na utilização de materiais múltiplos em um mesmo processo aditivo, na impressão 3D de componentes com gradientes funcionais e no desenvolvimento de materiais inteligentes. (CHEN *et al.*, 2017)

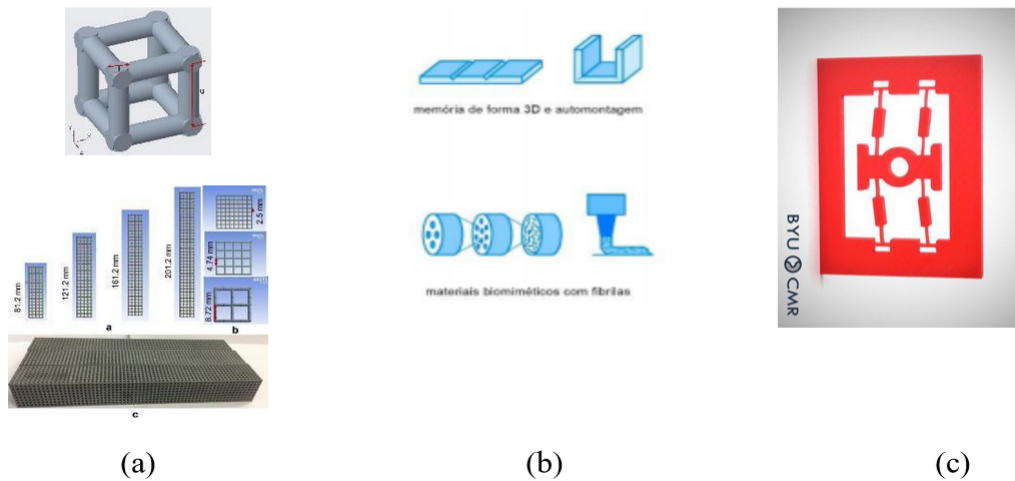
Para a efetiva aplicação da MA de materiais múltiplos, o desenvolvimento de gradientes funcionais, é fundamental para permitir variação da composição ou da microestrutura ao longo de pelo menos uma direção, levando a alteração de ao menos uma propriedade. Essa variação pode ser descontínua, implicando na presença de interfaces, ou contínua, sendo possível no material como um todo ou apenas em regiões específicas de um componente (ZHANG *et al.*, 2019).

Há, um conjunto de diferentes abordagens para gradientes funcionais e multimateriais em MA que podem dar origem a estruturas avançadas, podendo-se citar: lattice structures, smart materials, metamaterials e compliant mechanisms. A mesoestrutura é a estrutura formada entre vazios e preenchimentos na composição das camadas. As cama-

das podem estar alinhadas ou desalinhadas. Segundo NAZIR; JENG, estruturas do tipo “lattice” são sólidos celulares comumente predefinidos em geometrias regulares, dispostas em uma rede interconectada de estruturas sólidas/ocas, placas/superfícies ou pequenas células unitárias ilustradas na Figura 6(a). A mesoestrutura que possui características de células de 0,1 mm a 10 mm é chamada de estruturas celular.

O desenvolvimento de materiais responsivos (Smart Materials) está associado ao conceito de impressão 4D, possibilitado pela capacidade da MA em combinar materiais múltiplos e estruturas com gradiente funcional, conforme ilustrado na Figura 6(b). Potenciais aplicações incluem sistemas com memória de forma ou capacidade de auto ordenação, em que a geometria se altera de modo reversível ou definitivo em resposta a gatilhos térmicos, fóticos, químicos, magnéticos, hídricos ou mecânicos (GARDAN, 2018). As compliant structures são estruturas que permitem flexibilidade de suas partes sem a necessidade de utilizar juntas móveis. A movimentação é devida uma treliça em forma de junta monolítica (Fig. 6(c)). O sentido de movimentação da junta permite a previsibilidade do movimento de sua estrutura, com aplicações em mecanismos (BYUCMR, 2020).

Figura 6 – Estruturas avançadas: (a) Unidade celular, variações e amostra uniaxial para compressão Fonte: (NAZIR; JENG, ) (2020); (b) Materiais responsivos. Adaptado de (GARDAN, 2018); (c) Compliant mechanism Adaptado de (BYUCMR, 2020).





## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Equacionamento para controle de impressão

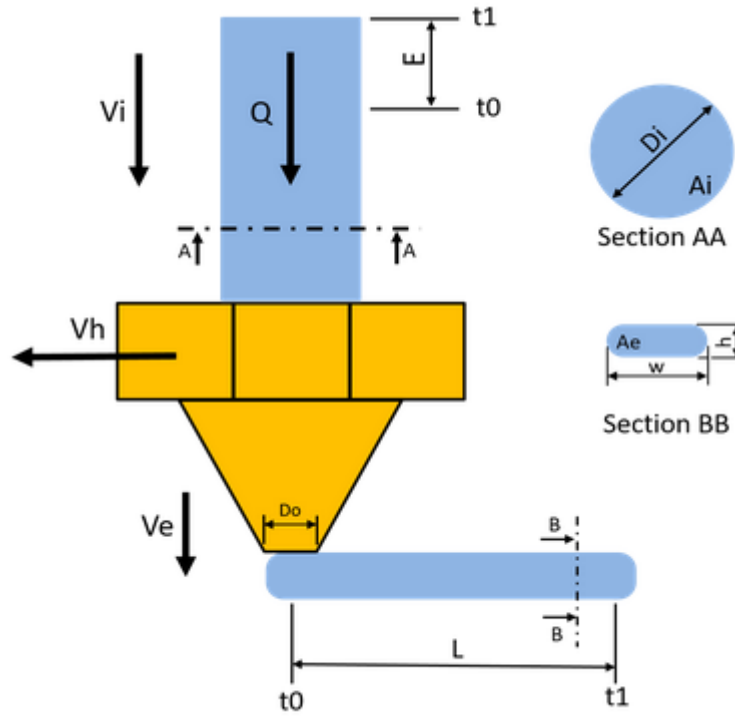
O equacionamento que rege o comportamento mecânico da extrusão de material na técnica FFF por meio do bico extrusor ilustrado na Figura 5.

Tabela 1 – Nomenclaturas utilizadas no equacionamento

Símbolo	Descrição
$Q$	Fluxo de material [mm <sup>3</sup> /s]
$V_i$	Velocidade de entrada do filamento [mm/s]
$V_h$	Velocidade de movimentação do cabeçote ou mesa na extrusão [mm/s]
$V_e$	Velocidade de extrusão na saída do bico extrusor [mm/s]
$D_i$	Diâmetro do filamento [mm]
$D_o$	Diâmetro de saída do bico extrusor [mm]
$A_i$	Área de seção do filamento [mm <sup>2</sup> ]
$A_e$	Área de seção do extrudado [mm <sup>2</sup> ]
$A_o$	Área de seção da saída do bico extrusor [mm <sup>2</sup> ]
$w$	Largura do extrudado [mm]
$h$	altura do extrudado [mm]
$L$	Comprimento do extrudado [mm]
$E$	Comprimento de filamento usado [mm]
$t_0$	Tempo inicial da extrusão
$t_1$	Tempo final da extrusão

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 7 – Parâmetros de impressão



Fonte: Elaborada pelo autor

Na MA, o parâmetro E é a variável responsável pela quantidade linear de filamento do carretel que será utilizado na impressão. Aplicando o princípio de conservação de fluxo de material e relacionando com o balanço volumétrico, pode-se extrair os principais parâmetros de impressão. A área de seção do filamento, do extrudado e a área de seção da saída do bico extrusor são descritas pelas Equações 4.1 a 4.3. Vale a pena ressaltar que a Eq. 4.2 é a representação geométrica da extrusão do material através de observações do microscópio e considerações do comportamento viscoelástico do polímero durante a extrusão (COSTA; DUARTE; COVAS, 2015; DUTY *et al.*, 2018; BALANI *et al.*, 2019).

$$A_i = 4D_i^2 \quad (4.1)$$

$$A_e = w * h + 4h^2(-4) \quad (4.2)$$

$$A_o = 4D_o^2 \quad (4.3)$$

O Fluxo de material (Q) na saída do bico extrusor é dado pela Eq. 4.4, onde  $V_h$  representa a velocidade de movimentação da máquina.

$$Q = A_e V_h \quad (4.4)$$

O Fluxo de material é constante ao longo de todo o processo, por isso podemos aplicar a Eq. 4.4 para o ponto de entrada do filamento, utilizando a área de seção do filamento ( $A_o$ ) e a velocidade de entrada do filamento ( $V_i$ ).

$$V_i = Q A_i \quad (4.5)$$

De maneira análoga, aplicamos a equação anterior para o caso da Velocidade de extrusão na saída do bico, conforme apresentada na Eq. 4.6.

$$V_e = Q A_o \quad (4.6)$$

Com o Fluxo e as Velocidades calculadas, o próximo passo é assumir a conservação de volume. Temos que o volume inicial de filamento que entra em operação ( $V_{fil}$ ) é igual ao volume final de material extrudado ( $V_{ext}$ ), como descrito nas Eq(s). 4.7 a 4.9. O volume de cada parte é relacionado com a área do material multiplicado pelo seu comprimento linear. Para o volume inicial é considerada a área da seção transversal do filamento ( $A_i$ ) enquanto que para a área do extrudado ( $A_e$ ) é considerado a largura ( $w$ , em inglês: width) e a altura da camada ( $h$ , em inglês: height).

$$V_{fil} = V_{ext} \quad (4.7)$$

$$A_i E = A_e L \quad (4.8)$$

$$E = (A_e L) A_i \quad (4.9)$$

$$E = [4wh + h^2(\pi - 4)\pi * D_f^2](L) \quad (4.10)$$

A partir da Equação horária do movimento uniforme podemos aproximar o tempo de extrusão de acordo com a relação de distância e velocidade de cada ponto observado (Eq. 4.11).

$$t = EV_i = LV_h \quad (4.11)$$

Determinada a quantidade de material a ser depositada (Eq. 4.10) em um determinado tempo (Eq. 4.11) é possível calibrar o algoritmo para que a deposição de polímero

não seja abaixo ou acima da quantidade necessária. No próximo capítulo será discutida a estrutura do algoritmo e as referências utilizadas.

## 4.2 Desenvolvimento do Algoritmo

O desenvolvimento do algoritmo de fatiamento envolveu as seguintes etapas:

- Importação do arquivo CAD em formato STL e DXF;
- Importação de arquivos CAD com regiões de intersecção para indicar a região heterogênea em que será subscrito o parâmetro de quantidade de material depositado;
- Fatiamento planar do objeto diferenciando as regiões de perímetro e preenchimento;
- Possibilidade de alterar a inclinação do filamento extrudado no plano da mesa de impressão;
- Empilhamento de camadas subsequentes mantendo as configurações heterogêneas das camadas.

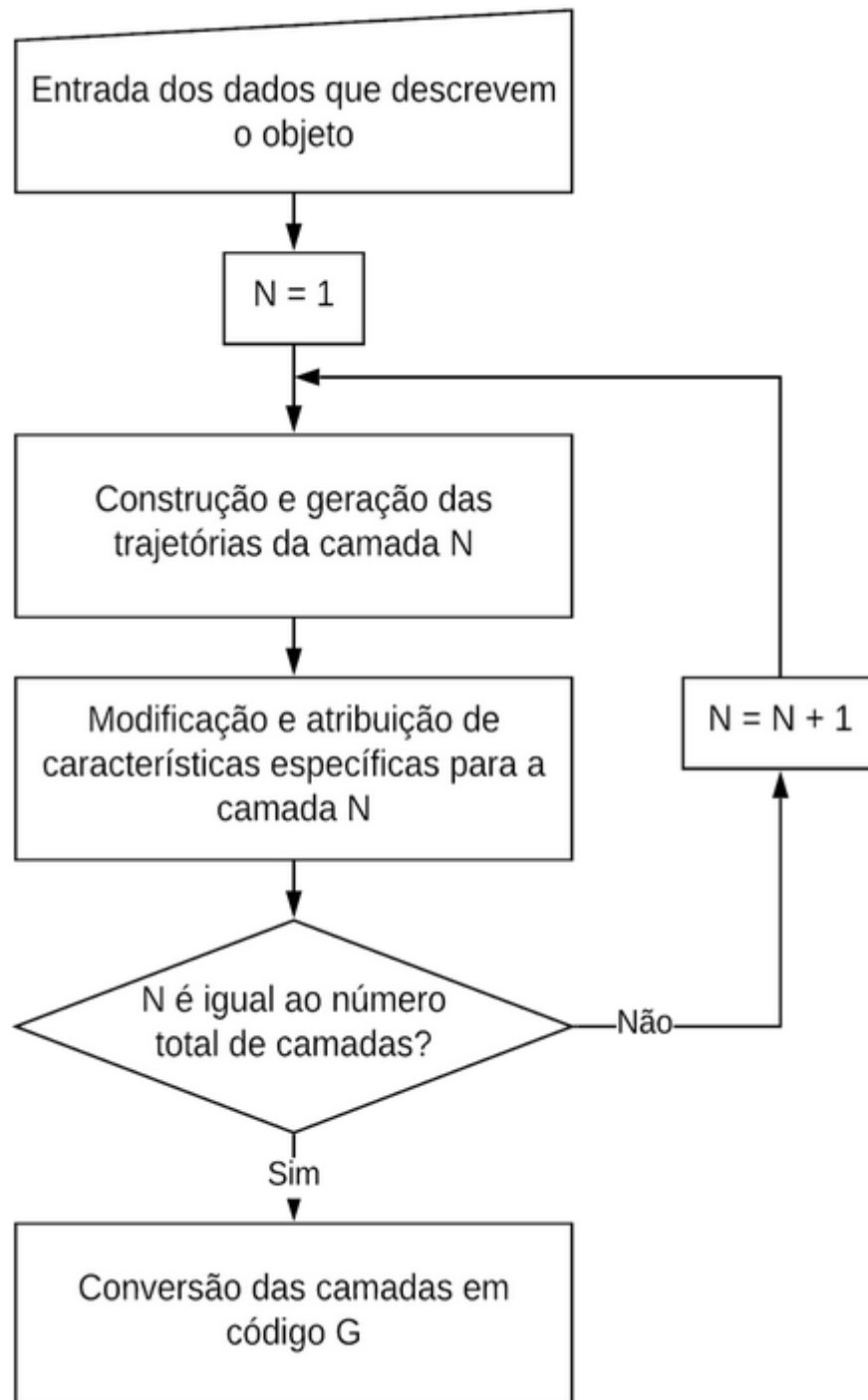
A estrutura básica do algoritmo se dá pelo fluxograma descrito na Fig. 8. Os dados contendo toda descrição necessária do objeto, bem como todos seus parâmetros de impressão são inseridos no programa. Em seguida, são criadas as camadas com base nesses dados. Cada camada contém a trajetória de deposição do material.

Modificações são adicionadas posteriormente à trajetória, atribuindo características específicas para diferentes regiões de cada camada, como a variação de alguns parâmetros de impressão. Os dados finais são então processados e convertidos em um arquivo contendo o código G dedicado para a máquina em que se deseja imprimir. A conversão em código G pode ser adaptada para diversas máquinas, permitindo ampla utilização do algoritmo.

No algoritmo, todo objeto a ser impresso é uma instância da classe PrintableObject, que contém cada uma das camadas a ser empilhada, instâncias da classe Layer. Cada camada contém o conjunto de trajetórias que o cabeçote de impressão deve seguir, bem como todos os outros parâmetros necessários. Essa organização é descrita na Fig. 9.

O programa foi implementado sob a forma de um script, com grande flexibilidade, onde as principais funções e classes são fornecidas pela biblioteca do algoritmo. Desta maneira, novas implementações e variações do algoritmo são possíveis.

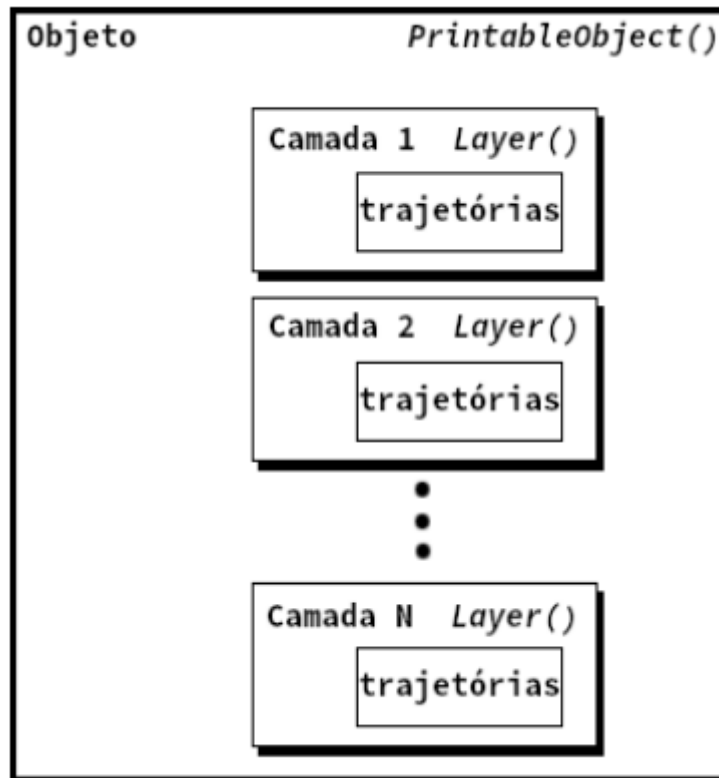
Figura 8 – Fluxograma do Algoritmo



Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 9 – Representação dos objetos no Algoritmo



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 Equipamento de impressão 3D

O equipamento de impressão 3 D do tipo low-end (com preço inferior a U\$ 5.000,00) utilizado é a impressora da marca Sethi3D, modelo AIP A3 (Fig. 8). A impressora apresenta seguintes características: Volume de impressão, em câmara fechada, de 8400 cm<sup>3</sup>, com precisão de camada entre 0,05 mm e 0,32 mm. Já as velocidades máximas de impressão e de deslocamento são 80 mm/s e 200 mm/s, respectivamente. Com relação às temperaturas: o cabeçote atinge até 250 °C, enquanto a base pode ser aquecida até 120 °C. Além disso, há dois bicos de injeção com diâmetro de 1,75 mm e auto nivelamento por nove pontos da mesa de impressão. A impressora trabalha com arquivos de código-G, que serão provenientes do código desenvolvido em Python. Para a impressão, a matéria prima utilizada será o ABS em formato de filamento com diâmetro de 1,75 mm.

Figura 10 – Impressora Sethi 3D



Fonte: Elaborado pelo autor

Os testes preliminares de impressão serão feitos em formas geométricas simples, de natureza extrudada e que não apresentem cavidades ou porções convexas. A verificação da forma de preenchimento entre raster e entre camadas é o objeto dessa análise. Por isso variações no ângulo de deposição entre camadas será executado pela impressora 3D e analisado por microscopia.

Os corpos de prova iniciais verificaram a validade do algoritmo em construir pequenas trilhas (do inglês raster). Esses testes foram importantes para a calibragem do equipamento (altura da mesa, velocidade de extrusão) e a calibragem do material (temperatura de fusão, necessidade de estufamento). Com a validade das coordenadas produzidas pelo algoritmo, foram impressas formas mais avançadas, como cubos, losangos e semiesferas. A fim de verificar melhorias em relação ao “efeito-degrau”, comum na MA, duas calotas foram configuradas no código e testadas, sendo uma com fatiamento uniforme (todas as camadas com mesma altura de 0,2 mm) e a segunda calota com o fatiamento adaptativo (camadas iniciando com 0,2 mm e variando conforme se aproximasse do topo com a altura até 0,1 mm). As possibilidades de variar alturas de camada dentro de uma mesma geometria permitem uma qualidade melhor em regiões de interesse e diminui o desvio dimensional da peça em relação ao modelo geométrico original.

Para verificar se o parâmetro E adotado no algoritmo está adequado para a impressão, foram feitas análises em corpos de prova retangulares de dimensões 50 x 10 mm com altura de 1,6 mm (equivalente a 8 camadas com 0,2 mm de altura cada). Foram analisados 2 fatores: o ângulo de preenchimento entre camadas ( $-45^{\circ}/45^{\circ}$  e  $90^{\circ}/0^{\circ}$ ) e o

software usado (Algoritmo próprio, Simplify3D e Slic3R). No total 6 corpos de prova foram impressos. Os corpos de prova foram mergulhados em nitrogênio líquido por 1 hora para serem cortadas de maneira a não sofrerem deformação plástica. As regiões de corte foram analisadas por microscopia eletrônica por varredura, que será discutida no próximo item de resultados.

#### **4.4 Microscopia por Varredura (MEV)**

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) usa feixes de elétrons de alta energia para gerar sinais da superfície da amostra. A partir dessa interação entre os elétrons e a amostra tem-se informações do material como a morfologia externa (textura), composição química e estrutura cristalina, bem como a orientação dos materiais que compõem a peça. A técnica possui aumento entre 20x e 30000x, com resolução espacial de 50 a 100 nm. Usualmente, o MEV pode ser utilizado, por meio da geração de imagens de alta resolução, para análise da morfologia, da composição do material, além de ser capaz detectar e analisar superfícies de fratura e de fornecer informações sobre a microestrutura e identificar estruturas cristalinas. Nesse projeto, as microfotografias serão importantes para avaliar a estruturação das camadas depositadas durante o processo de impressão com diferentes estratégias de deposição.

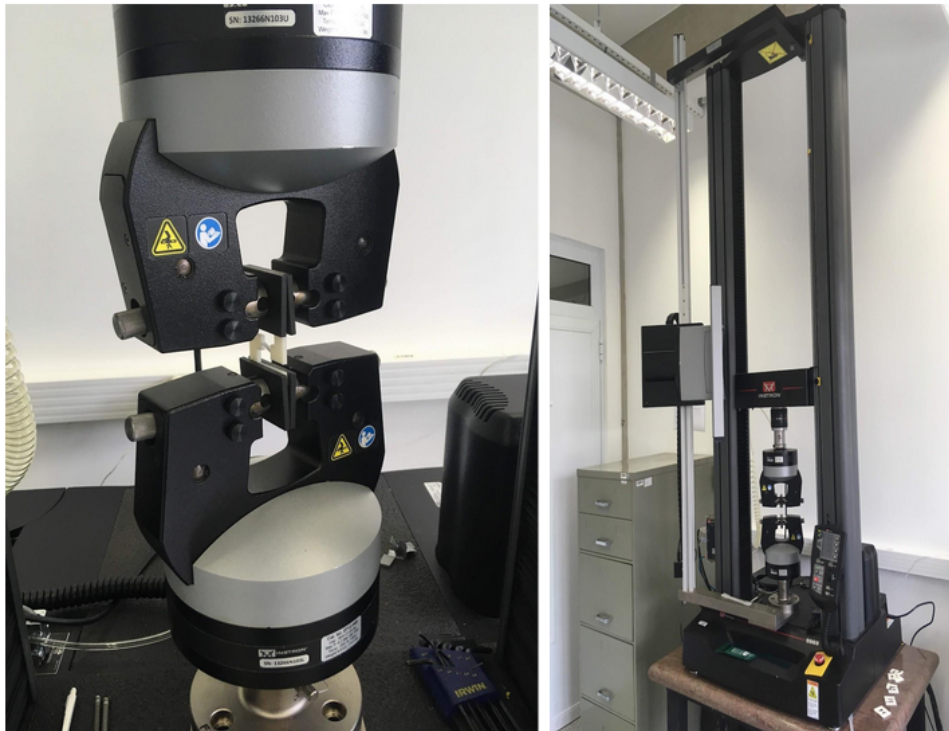
Para a verificação das estruturas impressas e a adesão entre camadas será utilizado o Microscópio Eletrônico por varredura da marca ZEISS modelo LEO 440 (Cambridge, England) com detector OXFORD (model 7060), operando com feixe de elétrons de 15kV, corrente de 2,82A e I probe de 200pA. As amostras foram recobertas com 6 nm de ouro em um metalizador Coating System BAL-TEC MED 020 (BAL-TEC, Liechtenstein) e mantidas em dessecador até o momento de análise. Condições de metalização: pressão na câmara =  $2,00 \times 10^{-2}$  mbar; corrente = 60mA; taxa de deposição 0,60 nm/s) do Centro de Análises Químicas do Instituto de Química da Universidade de São Paulo - Campus São Carlos.

#### **4.5 Ensaio Cíclico**

O ensaio cíclico do experimento verifica a força envolvida e o número de ciclos durante a tração dos corpos de prova. A Fig. 11 mostra o equipamento da marca Instron, modelo 5969 do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo - Campus São Carlos. A máquina de teste eletromecânico universal realiza testes de tração, compressão, dobra, descascamento, rasgo e outros testes mecânicos em materiais e produtos conforme ASTM, ISO e outros padrões da indústria. O software próprio de aquisição de dados permite plotar curvas de deslocamento e monitorar o número de ciclos até a eventual ruptura do corpo de prova.

Os corpos de prova serão testados no comportamento de tração para um deslocamento fixo em ensaio cíclico. Será acompanhado a força necessário para dado deslocamento e o número de ciclos. Os corpos de prova para o ensaio cíclico serão feitos de modo comparativo, sendo que o corpo de prova padrão será fabricado de acordo com os códigos abertos comerciais enquanto que o corpo de prova proposto no trabalho irá refletir as novas configurações do algoritmo.

Figura 11 – Máquina de ensaio cíclico (SMM-EESC-USP)



Fonte: Elaborado pelo autor



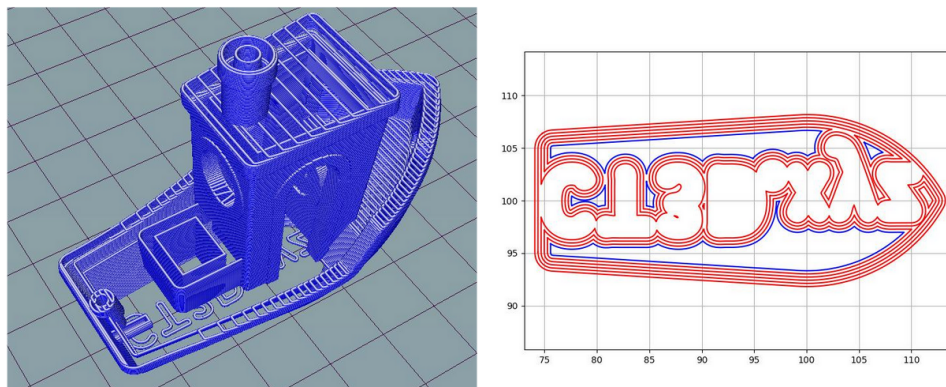
## 5 RESULTADOS

### 5.1 Desenvolvimento do código

A importação de objetos tridimensionais no formato STL foi feita através da biblioteca Trimesh. O arquivo STL é lido, em seguida os atributos de tamanho e posição do objeto são usados para o centralizar na mesa de impressão e adequar o sistema de coordenadas do algoritmo. O número de camadas é definido de acordo com a altura especificada ao algoritmo (por padrão, 0,2 mm), e então, o objeto é dividido em seções planas de acordo com esse resultado. Essas seções são as camadas, que são enviadas para as próximas etapas do código, onde são definidos os caminhos em que o cabeçote de impressão irá fazer para o preenchimento.

Para ilustrar a importação de um objeto em formato STL, o modelo 3D Benchy. Foi adotado para a validação do fatiamento em etapa preliminar (Fig. 12). O modelo 3D Benchy é reconhecido nas comunidades de impressão 3D por ser um corpo de prova de calibragem para impressoras 3D. Embora o formato de barco remete a um brinquedo, o modelo 3D Benchy permite que o usuário visualize dificuldades no processo de impressão, como inclinação máxima de camada, construção de estruturas sem auxílio de suporte, cavidades em superfícies e discretização de circunferências. (CREATIVETOOLS, 2021)

Figura 12 – Fatiamento do modelo 3D Benchy no software desenvolvido

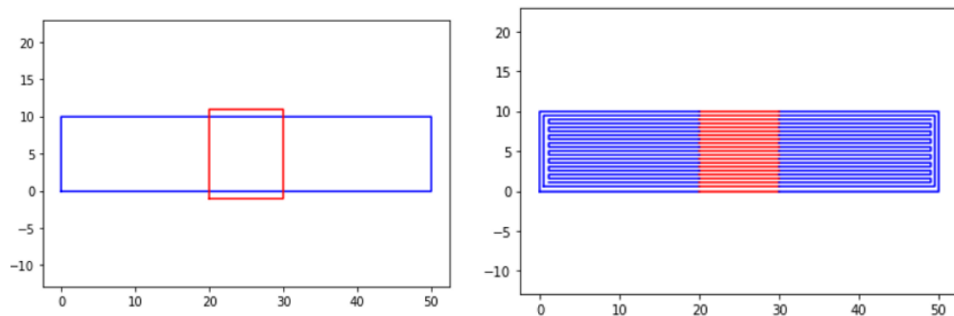


Fonte: Elaborado pelo autor

A Fig. 13 ilustra o processo de fatiamento para a geração de uma região heterogênea, onde são importados dois objetos tridimensionais, o retângulo azul e o quadrado vermelho. Nota-se que existe uma região de intersecção entre os objetos e nessa região será configurada uma quantidade de material depositada diferente do restante do retângulo azul. O fatiamento é executado por um segmento contínuo por toda a camada, quando o segmento atinge a região em vermelho, mantém a trajetória mas altera a quantidade de

material extrudado.

Figura 13 – Importação de dois objetos representados pelas retângulos em azul e o quadrado vermelho (esquerda) e o fatiamento heterogêneo de uma camada (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado observado no fatiamento discutido anteriormente foi executado com a região vermelha utilizando uma quantidade de material menor que a região em azul. A região vermelha por ser menos rígida obteve um comportamento de flexibilidade quando solicitada. Os resultados podem ser acompanhados na Fig. 14 que mostra o snap fit impresso, com a região de feixes flexíveis sendo solicitada pelo usuário.

Figura 14 – Impressão 3D da região flexível em peça de ABS desenvolvida no código proposto



Fonte: Elaborado pelo autor

O código fonte do projeto é mantido em um repositório no GitHub, sob licença de código livre GNU GPL v2. Esta licença garante a distribuição livre e gratuita do código, bem como o acesso para copiar, modificar e colaborar com o projeto existente, permitindo a contribuição e disseminação do conhecimento gerado para a comunidade. Um pacote python, contendo o código está disponível no python package index, a fim de facilitar o

acesso às funcionalidades do algoritmo e permitir a fácil implementação em scripts python. Dentre as melhorias no código realizadas neste trabalho, temos:

- Padronização dos módulos e submódulos do algoritmo em classes, seguindo uma arquitetura de Programação Orientada a Objeto. Classes abstratas foram usadas para definir os padrões de implementação dos módulos, generalizando a forma e padronizando o fluxo de dados entre as classes. Tomando por exemplo, a classe Slicer, responsável por definir o objeto fatiador básico, que recebe o arquivo tridimensional e o fatia em camadas, retornando uma lista contendo as camadas bidimensionais. A partir dessa classe, foi implementada a classe STLSlicer, que permite a leitura de arquivos .stl pelo algoritmo.
- Organização dos scripts e módulos em supermódulos Printables, classes que contém toda a funcionalidade necessária para gerar um arquivo de impressão a partir de um arquivo tridimensional e conjuntos de parâmetros. Para cada proposta ou estratégia de impressão, pode ser criada uma classe Printable diferente, e assim a utilização final obtém maior simplicidade, não sendo necessário alterar e rever todas as subrotinas durante as etapas de aplicação.
- Implementação das configurações de impressão em arquivos .YAML, onde para calibrar e modificar os parâmetros de impressão não é necessário alterar o código escrito, apenas os arquivos externos .YAML que ditam as configurações de impressão do projeto.

## 5.2 Testes preliminares de corpos de prova

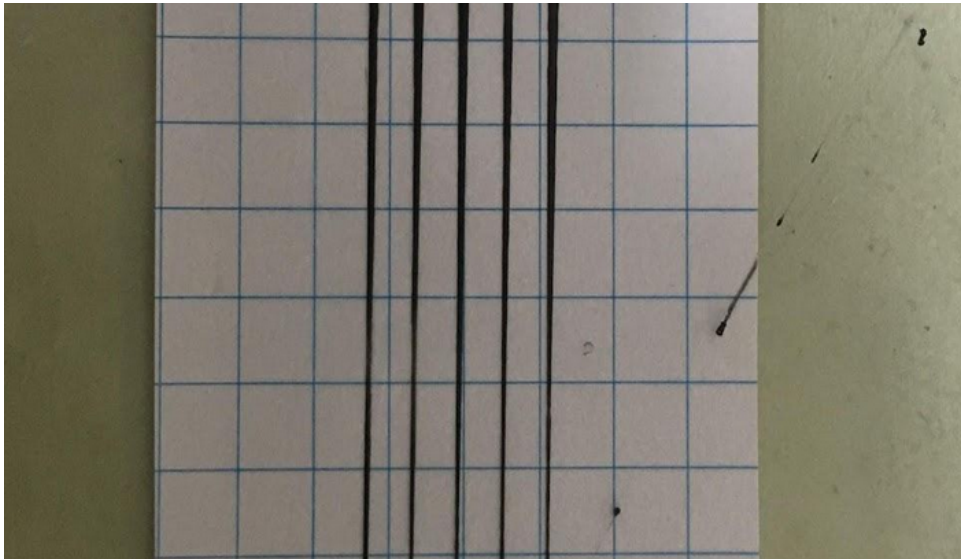
Os ensaios iniciais verificaram as seguintes formas de deposições de impressão: altura de camada, largura de raster, comprimento de segmento e distância entre raster. A velocidade do extrusor foi variada a fim de verificar a sua correlação com o parâmetro E. A calibragem e verificação entre esses dois parâmetros é importante devido a maneira como eles se correlacionam. Por exemplo, uma quantidade de material extrudado baixo em alta velocidade poderia gerar segmentos finos, frágeis e longe do padrão esperado. Da mesma forma, uma quantidade de material extrudado alto, com baixa velocidade excede a largura de segmento desejado, acarretando em erros dimensionais.

Corpos de prova como da Fig. 15 foram impressos sobre folhas milimetradas a fim de verificar o comprimento individuais de cada raster. Os corpos de prova tinham comprimento de 100 mm, sendo que a porção individual apresentava 80 mm de comprimento. A largura analisada do raster foi ajustada com o valor de 0,48 mm e a sua altura entre mesa e camada com o valor de 0,2 mm. As velocidades de extrusão foram variadas em 100, 300, 500, 1000 e 3000 mm/min. Os resultados indicaram que para velocidades de extrusão abaixo de 300 mm/min a impressora não é capaz de depositar na mesa de maneira contínua, acarretando



falhas de impressão. Provavelmente o material não tem tempo suficiente de encher a cavidade do bico de extrusão antes que o material seja depositado, esse atraso (delay) acarretou falhas na impressão.

Figura 15 – Corpos de prova variando a quantidade de raster para o perímetro



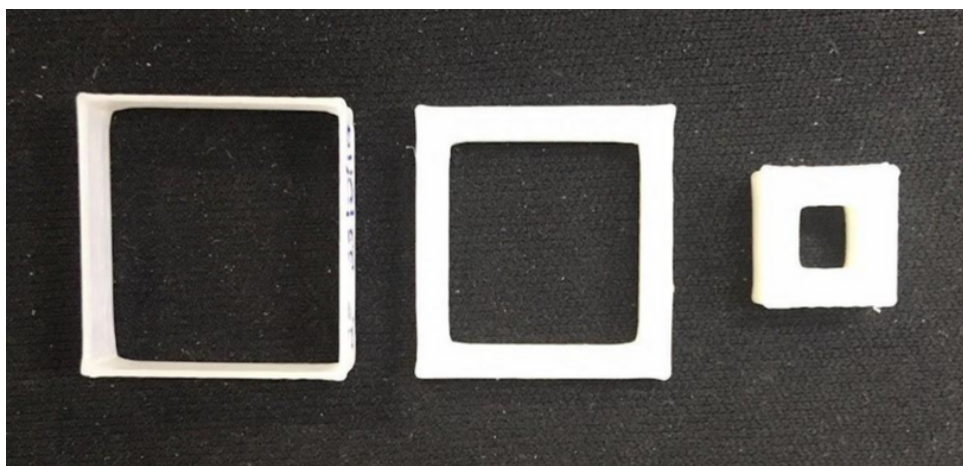
Fonte: Elaborado pelo autor

Para a verificação do parâmetro perímetro no código foram feitos 3 corpos de prova de acordo com a seguinte configuração:

- 1º Quadrado com 20 mm de aresta, 1 camada de perímetro e 6 mm de altura;
- 2º Quadrado com 20 mm de aresta, 5 camadas de perímetro e 6 mm de altura;
- 3º Quadrado com 10 mm de aresta, 5 camadas de perímetro e 6 mm de altura;

A Fig. 16 mostra as peças após a impressão e estavam dentro das dimensões que foram projetadas. O código para a parte de perímetro foi validado para esse teste.

Figura 16 – Corpos de prova variando o perímetro



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a calibragem do programa em relação ao preenchimento e o empilhamento foram impressos corpos de prova cúbicas, com aresta de 20 mm. Foram comparados cubos com os fatiadores comerciais Simplify3D, Slic3R e o algoritmo proposto. Os cubos foram impressos individualmente e as suas direções de impressão foram marcadas com as cores vermelho para o eixo X, azul para o eixo Y e preto para o eixo Z (Fig. 17). Embora a geometria seja a mesma para os três testes, foi verificado que haviam diferenças dimensionais entre elas. Esse resultado pode ser explicado devido a variação do parâmetro E para cada fatiador.

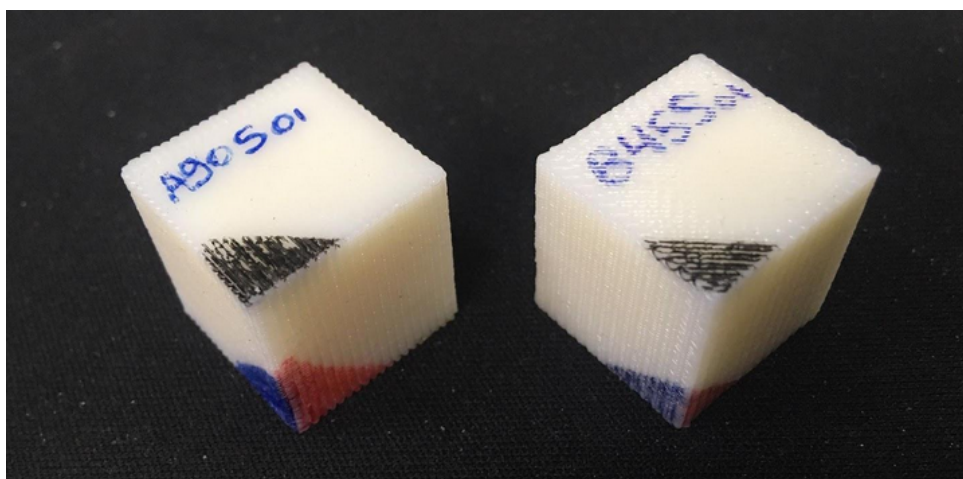
Foram analisadas dez amostras para cada um dos três softwares e variando duas configurações de ângulo de deposição ( $45^\circ/-45^\circ$  e  $0^\circ/90^\circ$ ), com o total de 30 amostras. O preenchimento e o perímetro usado em todas as amostras foram de 100% e 3, respectivamente. Os resultados estão descritos na Tabela 2. Os maiores desvios foram observados para o fatiador Slic3R, com uma diferença de 0,7 mm. Os resultados para a direção Z foram muito parecidos entre os fatiadores e próximos ao valor esperado de 20 mm, esse fato é explicado devido ao fato de que, a altura do objeto depende da movimentação vertical do cabeçote e não tanto das propriedades do material (onde podem ocorrer contrações ou inchamento de filamento depositado). Pode-se concluir para essa análise que as direções X e Y são as mais afetadas com a variação do parâmetro E, e as diferentes estratégias de fatiamento. Como resposta, o código foi implementado incorporando um fator multiplicador do parâmetro E que o usuário pode usar para corrigir pequenas variações dimensionais.

Tabela 2 – Dimensões dos corpos de prova cúbicos

Fatiador	Ângulo	Média x [mm]	Média y [mm]	Média z [mm]
Próprio	45/-45	20,2	20,4	20
Próprio	0/90	20,3	20,4	19,9
Simplify3D	45/-45	19,4	19,4	20
Simplify3D	0/90	19,4	19,4	19,9
Slic3R	45/-45	20,5	20,7	20,2
Slic3R	0/90	20,7	20,5	20

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 17 – Corpos de prova em forma de cubo com a demarcação da direção de impressão



Fonte: Elaborado pelo autor

A comparação entre fatiamento uniforme e adaptativo pode ser verificado na Fig. 18, onde podemos ver na região demarcada em preto o chamado “efeito-degrau” muito menor na imagem da direita (adaptativo). O algoritmo fatiou a peça de modo a diminuir a altura das camadas quando se aproximava do topo da calota. A região inferior até metade da altura da calota foi mantida com 0,2 mm de altura. É importante ressaltar que a diminuição na altura da camada acarretou um aumento no tempo de impressão das peças, sendo que para esse exemplo, o fatiamento uniforme demorou aproximadamente 30 minutos para ser executado enquanto que o fatiamento adaptativo levou 47 minutos.

Figura 18 – Comparação entre calotas esféricas. Fatiamento uniforme (esquerda) e com o fatiamento adaptativo (direita)



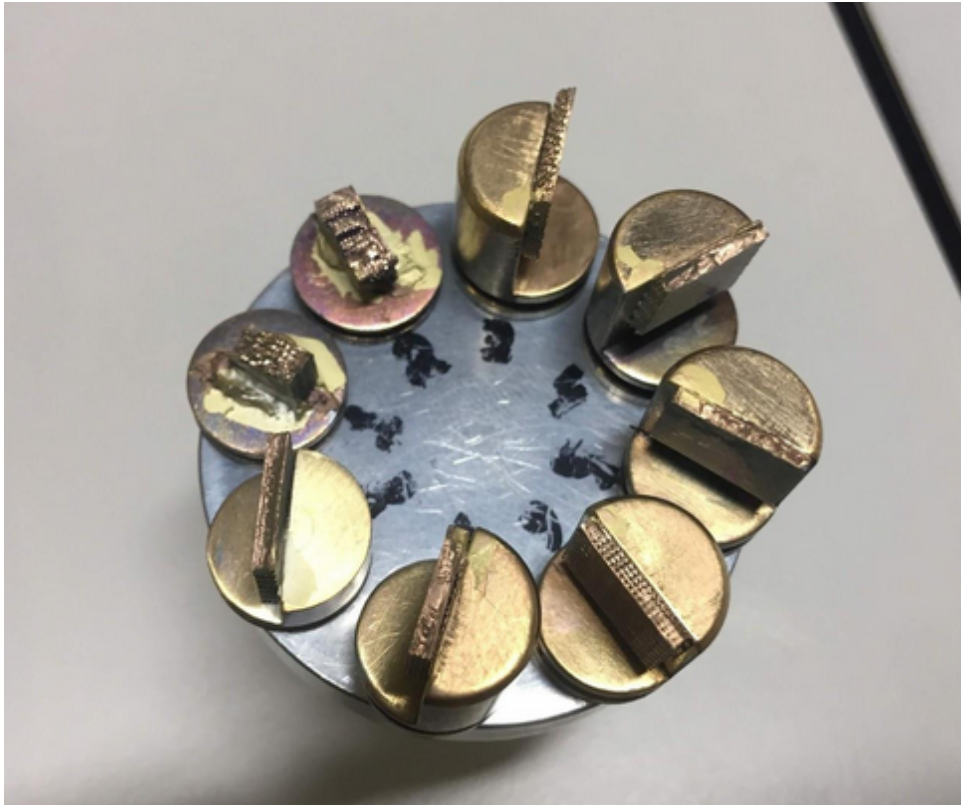
Fonte: Elaborado pelo autor

Com a finalização dos corpos de prova preliminares e da calibragem do algoritmo e da máquina, foram feitos os ensaios de microscopia.

### 5.3 Análise da morfologia da mesoestrutura

No MEV foram analisadas regiões de corte de área 10 x 1,6 mm, sendo que a altura de camada usada (0,2 mm) foi usada em todos os experimentos. O material usado foi o ABS natural de 1,75 mm de diâmetro da marca GTMax 3D. Como descrito na metodologia, as amostras foram recobertas com 6 nm de ouro para melhorar o nível de emissão de elétrons da amostra para a captura pelo microscópio (Fig. 19).

Figura 19 – Amostras recobertas com espessura de ouro de 6 nm

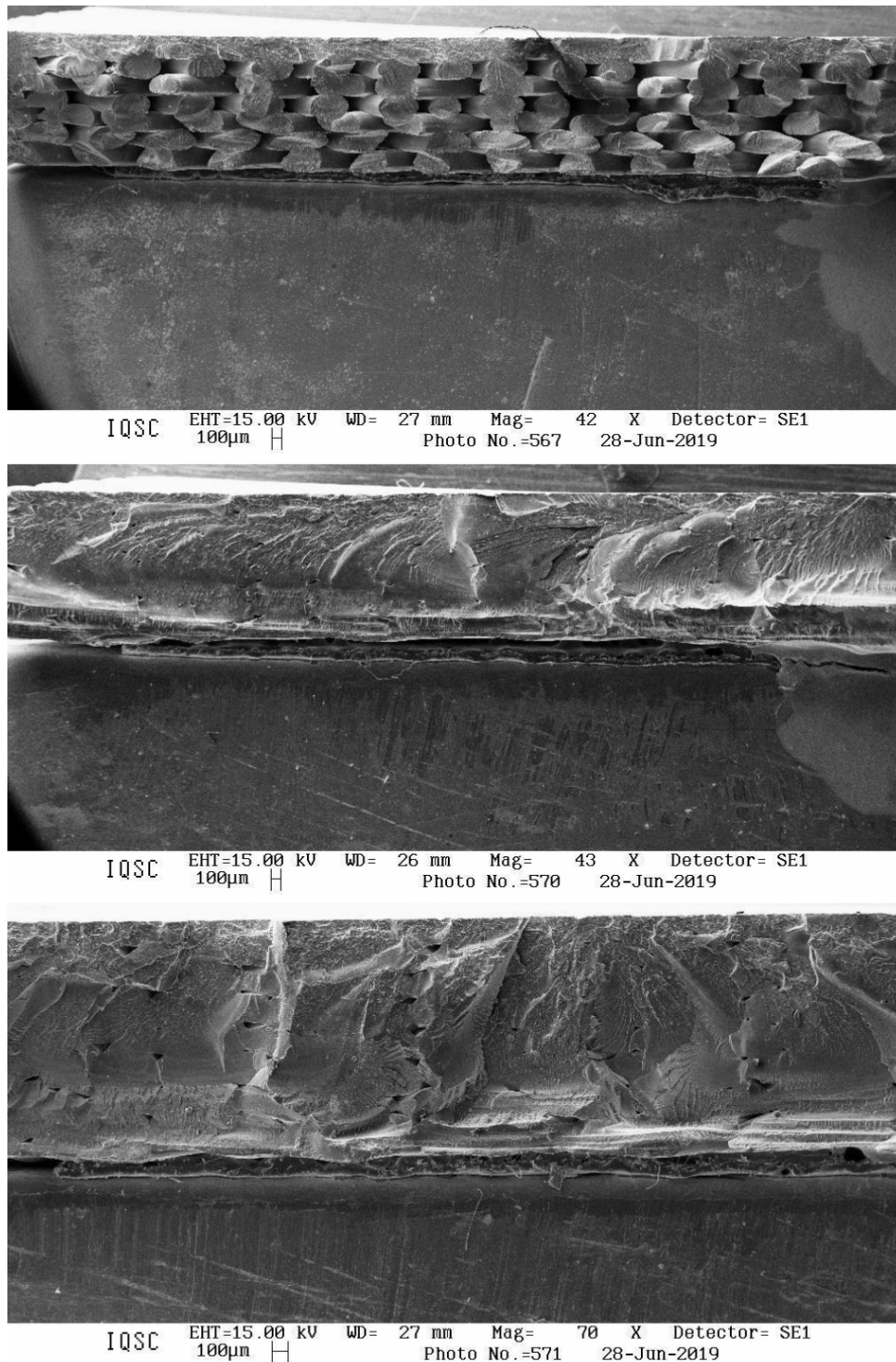


Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados das imagens foram separados de acordo com o ângulo entre camadas. A Fig 20 compara a região de corte de três amostras construídas em  $45^\circ/-45^\circ$ . Podemos observar que a amostra do software Simplify3D e Slic3R apresentam uma região sem cavidades, quase homogênea e sem distinção de camadas. Na mesma imagem é verificado que o código proposto tem um comportamento mais próximo que a literatura prevê, com a distinção de camadas que atuam como uma “rede”. Foi verificado que o parâmetro E dos códigos comerciais são na ordem de 14 a 18% maiores do que o calculado no modelo teórico. Esse aumento de material extrudado acarreta a superposição de material e o preenchimento entre as vizinhanças. Embora haja a impressão que maior adesão entre camadas seja melhor, vale lembrar que um excesso de material além do necessário para a MA pode acarretar problemas de contração de material, desvios dimensionais e problemas no acabamento superficial das peças.



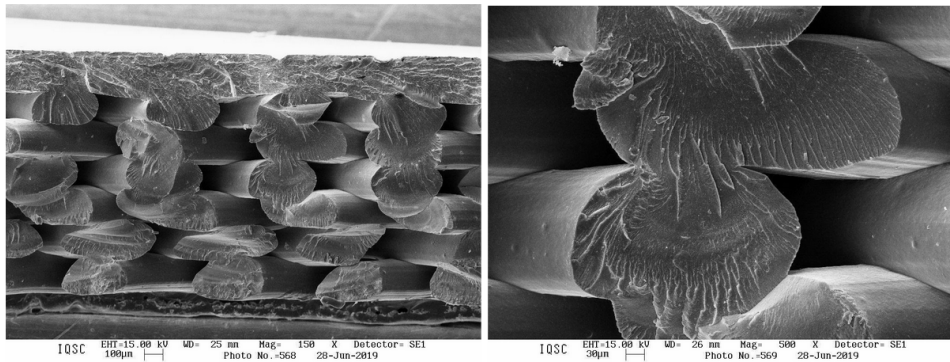
Figura 20 – Comparação entre camadas para a impressão 45°/-45° por MEV do código desenvolvido no trabalho (primeira), pelo software Simplify3D (segunda) e Slic3R (terceira)



Fonte: Elaborado pelo autor

A Fig 21 apresenta em detalhes a formação das camadas do código proposto para as direções de 45°/-45°. Podemos observar que a forma elíptica aproximada do perfil de extrusão teórico está presente em todos os segmentos da amostra.

Figura 21 – Detalhe das camadas  $45^\circ/-45^\circ$  do código desenvolvido no trabalho.

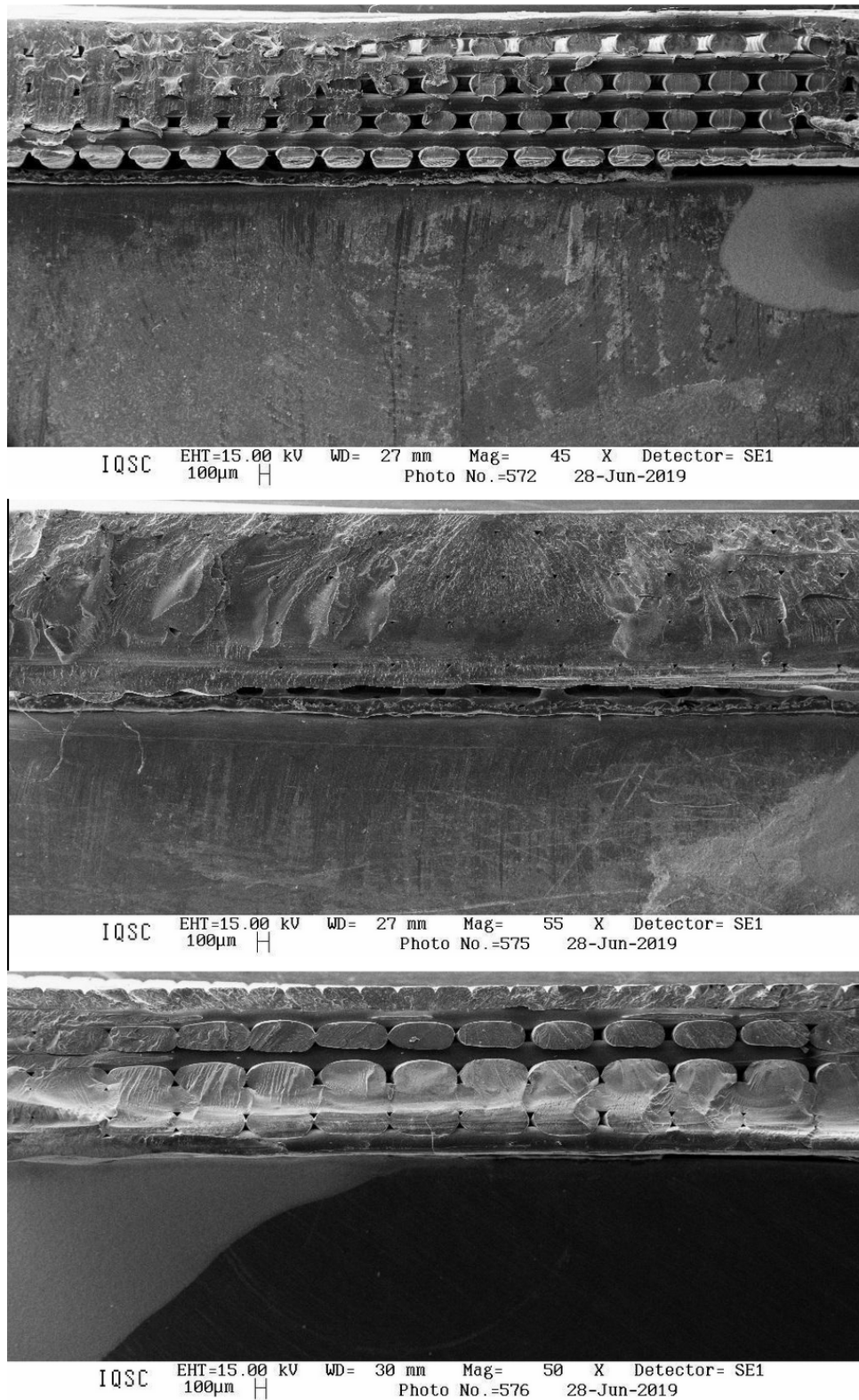


Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras do software Simplify3D tiveram comportamento similar tanto para o caso de  $45^\circ/-45^\circ$  (Fig 20) quanto para o caso de  $90^\circ/0^\circ$  (Fig 22). Uma seção de aspecto homogêneo sem cavidades foi observada nos dois casos, mostrando que o excesso de material estava presente, independente do ângulo de deposição entre camadas. Para o caso do software Slic3R, observamos uma mudança de comportamento, no caso de  $45^\circ/-45^\circ$  (Fig. 20) vemos um bloco homogêneo sem cavidades, enquanto que para o caso de  $90^\circ/0^\circ$  (Fig. 22) vemos perfis elípticos de aspecto achatado e muito próximo uns dos outros. Esse efeito pode ser explicado, porque a distância entre rasters depositados é maior para o caso de  $90^\circ$  do que o caso de  $45^\circ$ , esse aumento na distância propicia a um aumento no distanciamento entre os rasters, mas ainda mantém o aspecto de sobre material entre camadas.

No código proposto, pode-se observar a continuidade do comportamento de formação de perfis elípticos e a presença de cavidades entre raster quando são comprados os dois casos de ângulos entre camadas. A Fig. 23 apresenta em detalhes o perfil gerado.

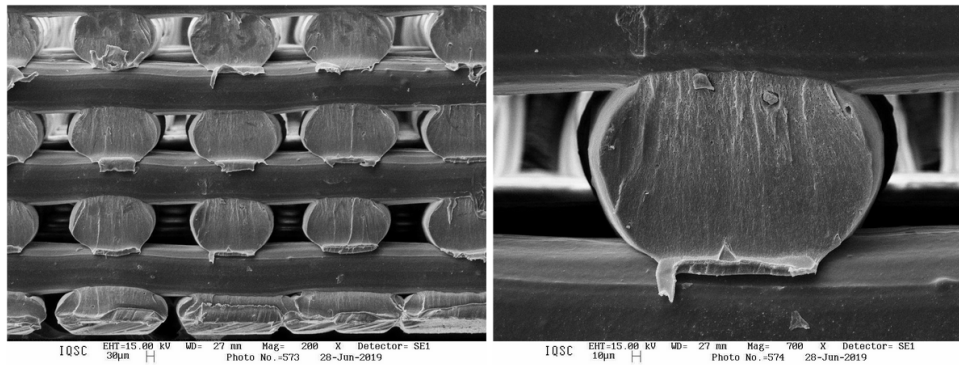
Figura 22 – Comparação entre camadas para a impressão 90°/0° por MEV do código desenvolvido no trabalho (primeira), pelo software Simplify3D (segunda) e Slic3R (terceira).



Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 23 – Detalhe das camadas 90°/0°do código desenvolvido no trabalho.

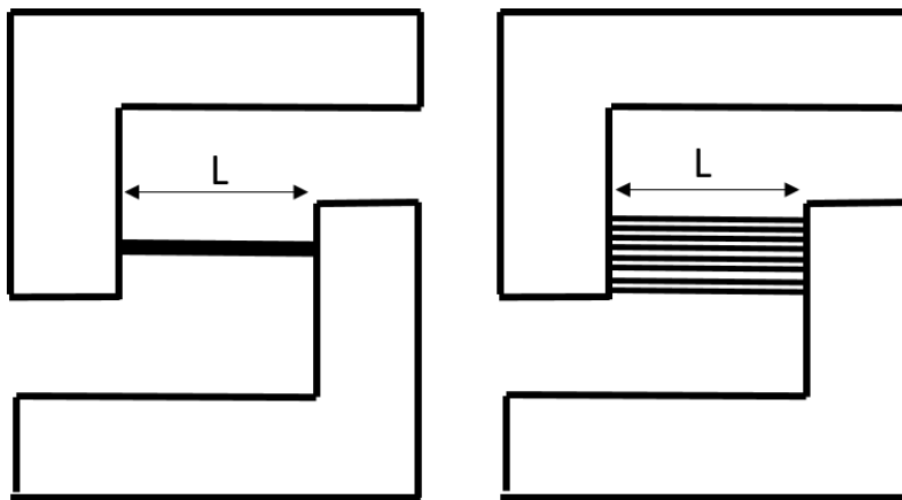


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 5.4 Ensaio Cíclico de Tração

Os corpos de prova dos ensaios cíclicos (Fig. 24) foram adaptados para a comparação com os corpos de prova adotados na estratégia de (HOWELL; MAGLEBY; OLSEN, 2013). Os autores utilizam um estreitamento de seção para provocar diminuição de rigidez das estruturas e por consequência maior flexibilidade. No entanto, o corpo de prova fica fragilizado por conta de uma mudança abrupta de estrição da seção. A proposta deste trabalho foi variar a deposição de material de forma contínua da peça, forçando a deposição de feixes de seção variável que diminuirão a rigidez do sistema de modo orgânico.

Figura 24 – Corpos de Prova para Ensaio Cíclico, sendo L a distância variada no ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor

A distância L dos corpos de prova (Fig. 24) foram variados em intervalos de 10, 15 e 20 mm, sendo que para o teste inicial foram ensaiados cinco corpos de prova para cada configuração (Estreitamento de seção e Feixes). Para o fim do ensaio cíclico foram propostos 200 ciclos de operação, sendo que a máquina armazena a informação do ciclo

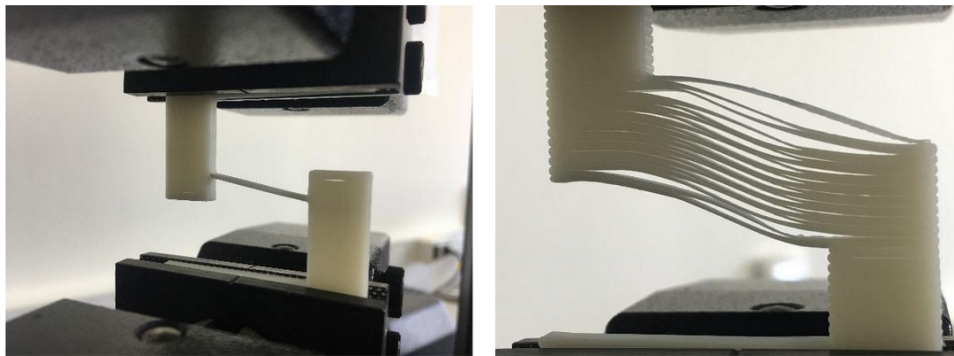
de ruptura anterior a esse valor. Os resultados de força e número de ciclos podem ser observados na Tab. 3 e Fig. 25.

Tabela 3 – Resultados parciais do Ensaio Cíclico

Configuração	Deslocamento [mm]		N° de Ciclos	
	Estreitamento de Seção	Feixes	Estreitamento de Seção	Feixes
L=10 mm	2,93	1,82	23,5	100
L=15 mm	5,02	2,34	7,8	63,6
L=20 mm	7,48	4,08	4,3	25,2

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 25 – Ensaio cíclico com os corpos de prova em tração para o caso de Estreitamento de Seção (esquerda) e Feixes (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a Tab. 3 podemos verificar que os corpos de prova com os Feixes propostos no trabalho conseguiram completar um número de ciclos maior do que os de Estreitamento de seção, no entanto o resultado de deslocamento foi inverso. Um dos motivos para esse resultado é que embora o material tenha a mesma medida de largura, a presença de feixes por toda a seção acarreta em um aumento na área de seção transversal do objeto. O aumento da área de seção permite que o material tenha mais rigidez e por consequência maior resistência, apresentando um deslocamento menor. Um novo ensaio cíclico será proposto de modo a igualar as áreas de seção transversal dos corpos de prova, para haver rigidez equivalente.

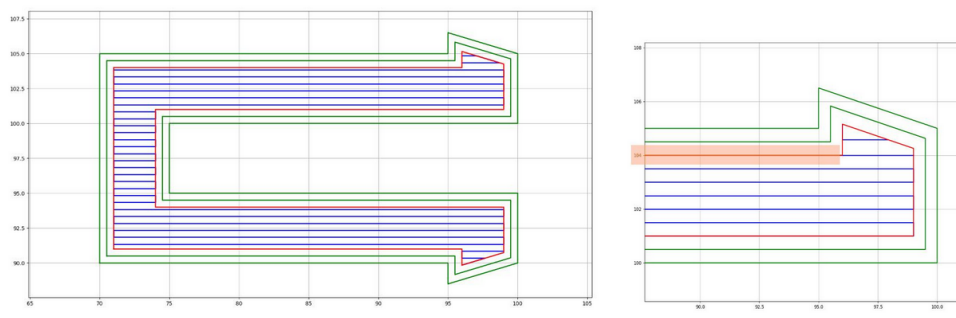
## 5.5 Caso de Estudo: Snap-fits

A natureza flexível das peças produzidas com o algoritmo desenvolvido no trabalho permitiram encontrar uma aplicação com peças que sofrem esforços devido a um deslocamento programado. O segmento de travas poliméricas foi a interface investigada, em específico a aplicação com Snap-fits, que é composto por componentes de intertravamento

de partes móveis, sendo aplicado em sistemas de segurança. A utilização de um código controlado para a fabricação de snap-fits poliméricos permite uma melhor distribuição de tensões pela peça, evitando concentradores de tensão e por consequência diminuindo falhas por fadiga.

O desenho geométrico do snap-fit foi desenvolvido no software aberto LibreCAD e exportado em formato .step para o fatiamento no algoritmo do projeto. A Fig. 26 mostra a trajetória desenvolvida, com destaque para o preenchimento da área da trava. A impressão foi feita em filamento de ABS natural a temperatura de 238°C de extrusão e 110°C de mesa de impressão. O raster da impressão foi definido pelo direção de 0° ao longo da peça, sem conjugação de camadas cruzadas, essa configuração foi escolhida para verificar a adesão dos trechos extrudados e verificar se a quantidade de material do parâmetro E estava atendendo o preenchimento previsto.

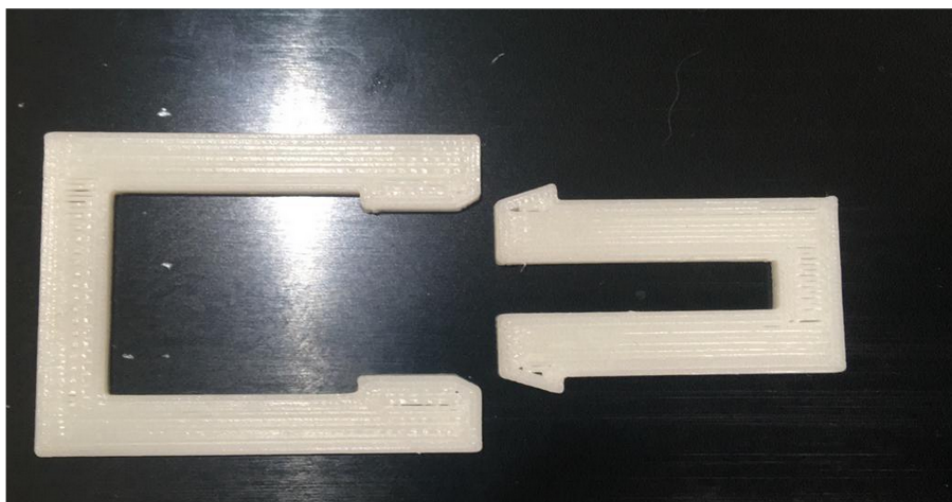
Figura 26 – Fatiamento da geometria Snap-fit



Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras impressas (Fig. 27) apresentaram nível de preenchimento satisfatório, sendo que a funcionalidade da trava foi testada manualmente por ciclos de 20 travamentos, sem apresentar danos ou deformações plásticas.

Figura 27 – Amostras impressas do Snap-fit



Fonte: Elaborado pelo autor

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a relevância da pesquisa tratada. A inovação do tema e das técnicas propostas são demonstradas através dos resultados inéditos comparando com as soluções comerciais disponíveis. O objetivo principal foi alcançado, com a disponibilização, manutenção e melhoria do algoritmo desenvolvido, publicado em plataforma de código livre, além dos exemplos de código disponíveis no repositório. A plataforma aberta e de código livre permite a colaboração e a disseminação do conhecimento gerado, permitindo que futuras pesquisas sejam desenvolvidas, contribuindo para o desenvolvimento da comunidade. O código foi validado e testado por meio de ensaios com corpos de prova, que demonstraram suas capacidades.

Ainda existem possíveis melhorias no código a serem feitas, bem como a implementação de automação de teste e distribuição, das quais podem ser desenvolvidas em futuros trabalhos.

Os conhecimentos adquiridos pelo aluno durante a pesquisa permitiram a aplicação de diversas áreas desenvolvidas durante a graduação. Tais conhecimentos, de natureza interdisciplinar, integram diferentes áreas da engenharia, envolvendo mecânica, eletrônica, computação e engenharia de materiais. O estudo do funcionamento das impressoras 3D, bem como o funcionamento de seus circuitos internos e o controle dos motores foi aplicado para que fosse possível o desenvolvimento do algoritmo. Tal trabalho de natureza interdisciplinar reflete o aspecto adaptativo e flexível do engenheiro eletricista, capaz de atuar em diferentes ambientes e resolver diferentes problemas, empregando as mais diversas soluções e a criatividade desenvolvida durante o curso.



## REFERÊNCIAS

- ALAFAGHANI, A. *et al.* Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: A design-for-manufacturing approach. **Procedia Manufacturing**, v. 10, p. 791–803, 2017.
- BALANI, S. B. *et al.* Influence of printing parameters on the stability of deposited beads in fused filament fabrication of poly(lactic) acid. **Addit. Manuf.**, n. 25, p. 112–121, 2019.
- BYUCMR. **Compliant Mechanisms Research Group (CMR), Department of Mechanical Engineering - Brigham Young University**. 2020. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:3488009>.
- CHaidas, D. *et al.* The impact of temperature changing on surface roughness of fff process. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 161, n. 1, p. 1–8, 2016.
- CHEN, L. *et al.* The research status and development of additive manufacturing technology. **International Journal of Additive Manufacturing Technology**, v. 89, n. 9-12, p. 3651–3660, 2017.
- COSTA, S.; DUARTE, F.; COVAS, J. Thermal conditions affecting heat transfer in fdm/ffe: a contribution towards the numerical modelling of the process. **Virtual and Physical Prototyping**, p. 35–46, 2015.
- CREATIVETOOLS. **3DBenchy - The jolly 3D printing torture-test by CreativeTools.se**. 2021. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:763622>.
- DUTY, C. *et al.* What makes a material printable? a viscoelastic model for extrusion-based 3d printing of polymers. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 35, p. 526–537, 2018.
- GALANTUCCI, L. M. *et al.* Analysis of dimensional performance for a 3d open-source printer based on fused deposition-modelling technique. **THIRD CIRP GLOBAL WEB CONFERENCE**, n. 28, p. 82–87, 2015.
- GARDAN, J. Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 14, p. 1, 2018.
- GIBSON, I.; ROSEN, W. D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. [S.l.: s.n.], 2010.
- GILMER *et al.* Model analysis of feedstock behavior in fused filament fabrication: enabling rapid materials screening. **Polymer**, v. 52, p. 51–61, 2018.
- GUTIERREZ, J. G. *et al.* Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly filled polymers: a review and future perspectives. **Materials (Basel)**, v. 11, n. 5, 2018.
- HOSSAIN, M. S. *et al.* Improving tensile mechanical properties of fdm-manufactures specimens via modifying build parameters. **ANNUAL INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM - AN ADDITIVE MANUFACTURING CONFERENCE**, p. 380–392, 2013.

- HOWELL, L.; MAGLEBY, S. P.; OLSEN, B. M. **Handbook of Compliant Mechanisms**. [S.l.: s.n.], 2013.
- NAZIR, A.; JENG, J.-Y. Buckling behavior of additively manufactures cellular columns: experimental and simulation validation. **Materials and Design**, v. 186.
- NETTO, J. J.; SILVEIRA, Z. Dispositivo extrusor dupla rosca corrotativa vertical e modular e processo de extrusão do mesmo. **RPI** **2526**, p. 294, 2017.
- NILSIAM, Y.; SANDERS, P.; PEARCE, J. Slicer and optimization for open-source gmaw-based metal 3-d printing. **Additive Manufacturing**, v. 18, p. 110–120, 2017.
- ONWUBOLU, G. C.; RAYEGANI, F. **Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process**. [S.l.: s.n.], 2014. v. 2014. 1-13 p.
- SANTANA, L. *et al.* evaluating the deposition quality of parts produced by an open-source 3d printer. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, p. 796–803, 2017.
- SILVEIRA, Z. *et al.* Design development and functional validation of a interchangeable head based on mini screw extrusion applied to experimental desktop 3-d printer. **International Journal of Rapid Manufacturing – IJRAPIDM**, v. 4, n. 1, p. 49–65, 2014.
- SILVEIRA, Z.; IDOGAVA, H. T. Aula 4: Planejamento de processo em manufatura aditiva. disciplina sem 5944. **Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.**, 2019.
- SPOERK, M.; HOLZER, C.; GONZALEZ-GUTIERREZ, J. Material-extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. **Journal of Applied Polymer Science**, 2019.
- THOMPSON, M. *et al.* **Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations and constraints**. [S.l.: s.n.], 2016. v. 65. 737-760 p.
- TYMRAK, B.; KREIGER, M.; PEARCE, J. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions. **Materials Design**, v. 58, p. 242–246, 2014.
- VALKENAERS, H. *et al.* A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3d printing. **10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture**, p. 235–238, 2013.
- VOLPATO, N. *et al.* Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets. **Additive Manufacturing**, v. 81, n. 9-128, p. 1519–1531, 2015.
- VOLPATO, N. *et al.* Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações em impressões 3-d. **Editora Edgard Blucher**, p. 400, 2017.
- WHOLERS, T. T. *et al.* Wholer’s report 2017: Additive manufacturing and 3d printing state of the industry. **Wohler’s Associates.**, 2014.

WORLDHEALTHORGANIZATION. **Coronavirus disease (COVID-19)**. 2020.  
Disponível em: [https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab_1).

XU, J. *et al.* Slicer and optimization for open-source gmaw-based metal 3-d printing.  
**Rapid Prototyping Journal**, 2018.

ZHANG, C. *et al.* Additive manufacturing of functionally graded materials: A review.  
**Materials Science Engineering**, v. 764, p. 1–29, 2019.