

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**FELIPE GONÇALVES DI NISIO**

**ESTRATÉGIA DE DEPOSIÇÃO COM VARIAÇÃO DE LARGURA DO  
FILAMENTO PARA GERAÇÃO DE ESTRUTURAS POROSAS COM  
MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL**

**CURITIBA**

**2022**

**FELIPE GONÇALVES DI NISIO**

**ESTRATÉGIA DE DEPOSIÇÃO COM VARIAÇÃO DE LARGURA DO  
FILAMENTO PARA GERAÇÃO DE ESTRUTURAS POROSAS COM  
MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL**

**Variable bead width deposition strategy for porous structures generation  
with material extrusion additive manufacturing**

Dissertação apresentada como requisito para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Mecânica e dos Materiais da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Neri Volpato, *Ph.D.*

**CURITIBA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.



FELIPE GONCALVES DI NISIO

**ESTRATÉGIA DE DEPOSIÇÃO COM VARIAÇÃO DE LARGURA DO FILAMENTO PARA GERAÇÃO DE ESTRUTURAS POROSAS COM MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 29 de Abril de 2022

Dr. Neri Volpato, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Carlos Alberto Costa, Doutorado - Universidade de Caxias do Sul (Ucs)

Dr. Lucas Freitas Berti, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 29/04/2022.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento especial à minha companheira Taoana Marques Chaves pelo apoio, afeto e compreensão, mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha mãe pelo apoio e incentivo constante durante minha jornada.

Ao professor Neri Volpato pela sua orientação impecável, sua paciência e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao professor Thiago Antonini Alves pela disponibilização do permeâmetro e pelo auxílio na sua utilização.

Aos colegas de laboratório Marcelo Okada Shigueoka, Antonio Verguetz Silva, Elizeu Greber Filho e Rafael Voltolini pela sua disponibilidade para tirar dúvidas e compartilhar sua experiência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida – número de financiamento 001.

## RESUMO

DI NISIO, Felipe G. **Estratégia de deposição com variação de largura do filamento para geração de estruturas porosas com manufatura aditiva por extrusão de material**. 2022. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

Através da Manufatura Aditiva (AM) por extrusão de material é possível a fabricação de meios porosos (MP) com estrutura planejada apenas variando os parâmetros de processo. Diversos estudos foram realizados para a obtenção de estruturas *lattice* utilizando o preenchimento tipo *raster* e aplicando filamentos depositados com largura constante. Neste trabalho é proposta uma estratégia de deposição para a obtenção de uma estrutura porosa única, utilizando a variação da largura dos filamentos extrudados. Estes filamentos (denominados de segmentados) são divididos em trechos grossos e finos, identificados de acordo com a sua largura, gerados por meio da variação combinada dos parâmetros de velocidade de impressão e da taxa de extrusão de material durante a deposição. Um algoritmo capaz de gerar o preenchimento proposto foi desenvolvido e implementado no programa de planejamento de processo RP3 (*Rapid Prototyping Process Planning*), permitindo o controle dos parâmetros nos segmentos das linhas de preenchimento. Testes preliminares foram realizados em uma impressora de baixo custo, em PLA, visando analisar o comportamento do equipamento em resposta à variação dos parâmetros durante a impressão dos filamentos segmentados. Esses testes possibilitaram a definição de parâmetros para a fabricação de MP com diferentes configurações, que foram analisadas geometricamente por microtomografia computadorizada ( $\mu$ CT) e caracterizadas através de ensaios de porosidade e permeabilidade. Uma configuração fabricada com o preenchimento *raster* tradicional (sem variação de largura do filamento depositado) serviu de comparação ao preenchimento proposto. Os resultados mostraram que a impressora 3D foi capaz de reproduzir o padrão de deposição proposto e que as dimensões e densidade dos poros na camada podem ser controladas pelos parâmetros da estratégia. A estrutura porosa obtida, quando comparada a estrutura tradicional, apresenta poros com maior razão de aspecto e com menor interconectividade na estrutura. A configuração com o preenchimento proposto apresentou 27% menos porosidade e uma redução de 55% na permeabilidade quando comparada ao preenchimento *raster* tradicional em amostras de mesma dimensão e com parâmetros de impressão básicos semelhantes. Por ser uma estratégia inovadora, que obtém uma estrutura porosa única, o trabalho abre campo para novas oportunidades de estudos e aplicações.

**Palavras-chave:** Meios porosos. Manufatura aditiva. Planejamento de processo. Permeabilidade. Deposição segmentada.

## ABSTRACT

DI NISIO, Felipe G. **Variable bead width deposition strategy for porous structures generation with material extrusion additive manufacturing**. 2022. p. 114. Thesis (Masters in Mechanical Engineering and Materials), Federal University of Technology - Paraná. Curitiba, 2022.

Through Additive Manufacturing (AM) based on material extrusion, it is possible to manufacture porous media (PM) with planned structure by varying the process parameters. Several studies have been carried out to obtain lattice structures using raster filling with constant width beads. This work proposes a deposition strategy to obtain a unique porous structure, using variable-width beads. These beads (nominated here as segmented) are divided in thick and thin segments, according to their width, generated through combined variation of printing speed and extrusion rate parameters during deposition. An algorithm capable of generating the proposed filling was developed and implemented in the process planning program called RP3 (Rapid Prototyping Process Planning), allowing the control of the parameters in segments of the filling lines. Preliminary tests were carried out in an open-source printer, in PLA, to analyze the equipment's behavior in response to the variation of parameters during the deposition of segmented beads. These tests made it possible the definition of parameters to manufacture PM with different configurations, which were geometrically analyzed by computerized microtomography ( $\mu$ CT) and characterized through porosity and permeability tests. A configuration generated with traditional raster filling (with constant bead width) served as comparison to proposed filling. The results showed that the 3D printer was able to reproduce the proposed deposition pattern and that pores dimensions and density can be controlled by the parameters of the segmented deposition. The porous structure obtained, when compared to the traditional structures, presents pores with higher aspect ratio and less interconnectivity on the structure. The configuration with the proposed filling presented 27% less porosity and 55% reduction on permeability when compared to the traditional raster filling. Since this is an innovative strategy, which obtains a unique porous structure, the work opens field for new opportunities of studies and applications.

**Keywords:** Porous media. Additive Manufacturing. Process planning. Permeability. Segmented deposition.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de poros: (a) fechado; (b), (c), (d), (e) e (f) abertos; (g) rugosidade externa.....	18
Figura 2 – Poros de seção alongada.....	19
Figura 3 – Representação dos comprimentos envolvidos no cálculo da tortuosidade.....	21
Figura 4 – Representação esquemática da tortuosidade de um MP.....	21
Figura 5 – Representação das estruturas porosas obtidas variando o ângulo das barras .....	25
Figura 6 – <i>Scaffold</i> cerâmico com desalinhamento entre as fibras: (a) representação do desalinhamento com espaçamento de 1,1 mm entre as fibras e (b) imagem obtida por microscópio eletrônico da estrutura fabricada .....	25
Figura 7 – MP com porosidade planejada obtidos por jateamento de material	26
Figura 8 – Princípio de funcionamento da tecnologia de AM por extrusão de material .....	27
Figura 9 – Principais estratégias de preenchimento: (a) <i>raster</i> , (b) <i>contour</i> e (c) combinação <i>raster</i> e <i>contour</i> .....	28
Figura 10 – Outras estratégias de preenchimento .....	28
Figura 11 – Formação de vazios (poros) no preenchimento do tipo colmeia ( <i>honeycomb</i> ) .....	29
Figura 12 – Efeito da densidade de preenchimento na geometria <i>honeycomb</i>	29
Figura 13 – Geometria e parâmetros do filamento depositado .....	30
Figura 14 – Contorno e estratégia de preenchimento do tipo <i>raster</i> .....	31
Figura 15 – Camadas com rotação de 90° entre os ângulos de <i>raster</i> .....	31
Figura 16 – Redução dos vazios no preenchimento através do controle da trajetória .....	31
Figura 17 – Sistemas presentes no cabeçote extrusor .....	33
Figura 18 – Relação entre a velocidade de deslocamento do cabeçote extrusor (F) e a largura do filamento depositado (w).....	34
Figura 19 – Resultado da otimização do preenchimento com variação da largura extrudada .....	35
Figura 20 – Diagrama de geração do MP por AM utilizando estratégia de preenchimento.....	36
Figura 21 – Geometrias de poros obtidas variando o valor do ângulo de <i>raster</i> .....	37
Figura 22 – Parâmetro “ <i>build layer</i> ”.....	38
Figura 23 – Imagens dos MP mostrando em detalhe a distribuição das linhas de <i>raster</i> : (a) sem e (b) com desalinhamento lateral .....	39
Figura 24 – MP com gradiente de porosidade.....	40
Figura 25 – Diagrama esquemático de obtenção de difusividade de MP.....	40
Figura 26 – Configurações de estrutura porosa de <i>scaffolds</i> cerâmicos: A – <i>gap</i> constante na camada; B – dois valores de <i>gap</i> na camada; C – desalinhamento ( <i>stagger</i> ) entre as camadas e D – preenchimento “quadrifólio”.....	41

Figura 27 – Representação da estratégia (a) sem e (b) com agrupamento de dois filamentos .....	42
Figura 28 – Representação teórica da estratégia de deposição proposta .....	46
Figura 29 – Divisão das linhas de <i>raster</i> no preenchimento segmentado .....	47
Figura 30 – Representação da camada no teste de variação da velocidade de impressão.....	53
Figura 31 – Geometria esperada do filamento segmentado e dimensões a serem medidas no teste de variação da velocidade de impressão .....	55
Figura 32 – Representação da camada no teste de obtenção de filamentos segmentados repetidos .....	58
Figura 33 – Desenho esquemático do permeâmetro a ser utilizado .....	65
Figura 34 – (a) Adaptação realizada no permeâmetro para a utilização das amostras impressas e (b) amostra inserida na tampa do porta-amostra .....	66
Figura 35 – Largura dos filamentos contínuos da amostra em diferentes regiões após nivelamento da plataforma de construção .....	68
Figura 36 – Reduções de largura em amostra obtida no teste de variação da velocidade de impressão.....	70
Figura 37 – Aumentos de largura em amostra obtida no teste de variação da velocidade de impressão.....	71
Figura 38 – Reduções de largura em amostra obtida no teste de variação da taxa de extrusão.....	75
Figura 39 – Ausência de aumento de largura em amostra obtida no teste de variação da taxa de extrusão .....	76
Figura 40 – Microscopia da região do <i>raster link</i> dos filamentos segmentados com os menores valores de extrusão.....	77
Figura 41 – Amostras do teste de obtenção de filamentos segmentados repetidos.....	79
Figura 42 – Amostras impressas (acima) do teste de obtenção da estrutura porosa com uma camada, suas respectivas imagens ampliadas no microscópio (centro) e principais parâmetros das configurações (abaixo).....	83
Figura 43 – Imagens de microscópio das amostras com maior número de camadas.....	84
Figura 44 – Seção de corte vertical (X-Z) dos modelos $\mu$ CT: (a) Amostra I e (b) Amostra II.....	86
Figura 45 – Seções de corte dos modelos $\mu$ CT de cada configuração: plano X-Y (esquerda) e plano X-Z (direita), normal aos trechos finos (acima) e grossos (abaixo) .....	87
Figura 46 – MP cilíndrico impresso utilizando deposição segmentada .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do preenchimento segmentado.....	49
Tabela 2 – Parâmetros fixos de impressão .....	50
Tabela 3 – Velocidades de trecho fino aplicadas em cada filamento .....	54
Tabela 4 – Taxa de extrusão no trecho fino aplicada em cada filamento.....	56
Tabela 5 – Parâmetros das amostras do teste de obtenção de filamentos segmentados repetidos .....	58
Tabela 6 – Parâmetros ajustados das amostras do teste de obtenção de filamentos segmentados repetidos.....	59
Tabela 7 – Parâmetros das amostras do teste de formação dos poros em uma camada .....	60
Tabela 8 – Configurações dos MP fabricados.....	62
Tabela 9 – Valores de vazão utilizados nos ensaios de permeabilidade e suas respectivas velocidades de escoamento.....	67
Tabela 10 – Dados a serem utilizados nos ensaios experimentais de permeabilidade.....	67
Tabela 11 – Resultados das medições do teste de variação da velocidade de impressão.....	69
Tabela 12 – Resultados das medições do teste de variação da taxa de extrusão .....	74
Tabela 13 – Valores de largura dos trechos nas diferentes regiões de cada amostra .....	80
Tabela 14 – Valores de largura dos trechos nas diferentes regiões das amostras após ajuste .....	81
Tabela 15 – Valores de largura dos trechos nas diferentes regiões da amostra A125 após segundo ajuste.....	81
Tabela 16 – Resultados das medições das dimensões dos poros.....	83
Tabela 17 – Porosidade efetiva e permeabilidade dos MP fabricados.....	92
Tabela 18 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E100C1 .....	107
Tabela 19 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F2E100C1.....	108
Tabela 20 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E75C1.....	108
Tabela 21 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E125C1 .....	109
Tabela 22 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E100C2.....	109
Tabela 23 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E100C3.....	110
Tabela 24 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração Raster .....	110
Tabela 25 – Coeficientes $k_1$ e $k_2$ de permeabilidade das configurações .....	114

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

μCT	Microtomografia computadorizada por raios-X
AM	Manufatura Aditiva ( <i>Additive Manufacturing</i> )
CAD	Projeto Auxiliado por Computador ( <i>Computer-Aided Design</i> )
CLIP	Produção Contínua com Interface Líquida ( <i>Continuous Liquid Interface Production</i> )
DMD	Deposição Direta de Metal ( <i>Direct Metal Deposition</i> )
END	Ensaio Não Destrutivo
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição ( <i>Fused Deposition Modeling</i> )
FGM	Materiais com Gradação Funcional ( <i>Functionally Graded Materials</i> )
GDLSP	Porosidade de Estrutura <i>Lattice</i> Geometricamente Definida ( <i>Geometrically Defined Lattice Structure Porosity</i> )
GUP	Porosidade Geometricamente Indefinida ( <i>Geometrically Undefined Porosity</i> )
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada ( <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> )
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i>
LOM	Manufatura Laminar de Objetos ( <i>Laminated Object Manufacturing</i> )
MEV	Microscopia Eletrônica por Varredura
MJP	Impressão <i>MultiJet</i> ( <i>MultiJet Printing</i> )
MP	Meios Porosos
PLA	Poliácido Láctico
SLA	Aparato de Estereolitografia ( <i>Stereolithography Apparatus</i> )
SLM	Fusão Seletiva a Laser ( <i>Selective Laser Melting</i> )
SLS	Sinterização Seletiva a Laser ( <i>Selective Laser Sintering</i> )
STL	Estereolitografia ( <i>STereoLithography</i> )
UV	Luz ultravioleta
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 OBJETIVOS .....	13
1.1.1 Objetivo geral .....	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA .....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1 MEIOS POROSOS.....	16
2.1.1 Porosidade .....	16
2.1.2 Permeabilidade .....	19
2.1.3 Tortuosidade .....	20
2.1.4 Fabricação de meios porosos por processos tradicionais.....	22
2.2 MANUFATURA ADITIVA.....	22
2.3 PRODUÇÃO DE MEIOS POROSOS ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA .....	23
2.4 MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL E PARÂMETROS DE PROCESSO.....	27
2.4.1 Estratégias de preenchimento.....	27
2.4.2 Parâmetros de processo do preenchimento <i>raster</i> .....	29
2.4.3 Variação da largura de extrusão .....	32
2.5 OBTENÇÃO DE MEIOS POROSOS ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL.....	36
2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	43
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	45
3.1 DESENVOLVIMENTO DO PREENCHIMENTO SEGMENTADO .....	45
3.1.1 Algoritmo de preenchimento segmentado .....	46
3.1.2 Parâmetros a serem controlados .....	48
3.2 TESTES PRELIMINARES.....	50
3.2.1 Calibração da extrusão, altura do bico e nivelamento da plataforma .....	51
3.2.2 Teste de variação da velocidade de impressão .....	52
3.2.3 Teste de variação da taxa de extrusão .....	55
3.2.4 Obtenção de filamentos segmentados repetidos .....	57
3.2.5 Formação dos poros em uma camada por deposição segmentada.....	60
3.2.6 Obtenção da estrutura porosa tridimensional.....	61
3.3 FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS POROSOS .....	61
3.3.1 Caracterização geométrica por microtomografia computadorizada .....	63
3.3.2 Ensaio de porosidade e permeabilidade.....	64
3.4 ELABORAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO PARA O PREENCHIMENTO SEGMENTADO.....	67
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	68
4.1 RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES.....	68

4.1.1	Calibração da extrusão e nivelamento da plataforma .....	68
4.1.2	Teste de variação da velocidade de impressão .....	69
4.1.3	Teste de variação da taxa de extrusão .....	74
4.1.4	Obtenção de filamentos segmentados repetidos .....	78
4.1.5	Formação dos poros em uma camada .....	82
4.1.6	Obtenção da estrutura porosa tridimensional.....	84
4.2	<b>CARACTERIZAÇÃO POR MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA</b> ( $\mu$ CT).....	85
4.3	<b>ENSAIOS DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE</b> .....	90
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	94
	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	95
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	97
	<b>APÊNDICE A – Procedimento para a utilização da deposição segmentada</b> .....	103
	<b>APÊNDICE B – Resultados dos testes de permeabilidade</b> .....	107

## 1 INTRODUÇÃO

Meios porosos (MP) são materiais sólidos que apresentam certa rigidez estrutural e baixa densidade, devido à presença de vazios (poros) em seu interior (LIU; CHEN, 2014; NIELD; BEJAN, 2013). Dentre suas diversas aplicações em setores da indústria, podem ser citadas: geração de energia, isolamento térmico, filtragem de fluidos, engenharia biomédica, petróleo e gás, entre outros (SHIGUEOKA; VOLPATO, 2021). Em casos em que é analisada a dinâmica do escoamento no interior do MP, torna-se importante o estudo de características como a sua porosidade, tortuosidade e permeabilidade (LIU; CHEN, 2014). Entretanto, a fabricação de estruturas porosas de maneira controlada ainda apresenta desafios (SHIGUEOKA; VOLPATO, 2021).

A Manufatura Aditiva (AM - *Additive Manufacturing*) ou impressão 3D, através de seu princípio de fabricação por adição de material em camadas sucessivas, vem ganhando importância na área de MP, pois possibilita a produção de estruturas porosas de maneira planejada (GUDDATI *et al.*, 2019; ISHUTOV *et al.*, 2018; MICHAILIDIS *et al.*, 2014). Dentre as tecnologias disponíveis, a AM por extrusão de material destacou-se na produção de geometrias do tipo *lattice*, sendo uma de suas principais vantagens a possibilidade de gerar estruturas porosas apenas pela variação de maneira estratégica dos parâmetros de processo, sem a necessidade de modelar a estrutura em si em um software de CAD (KALITA *et al.*, 2003).

Diversos estudos, como os realizados por Too *et al.* (2001), Zein *et al.* (2002), Chin Ang *et al.* (2006), Sobral *et al.* (2011), Lee *et al.* (2012) e Shigueoka e Volpato (2021), utilizaram a tecnologia de extrusão de material para a obtenção de estruturas porosas de maneira planejada. Nesses estudos, os MP são obtidos aplicando-se a estratégia de preenchimento denominada *raster*, caracterizada pela deposição de filamentos paralelos na camada em uma trajetória zigue-zague. Os parâmetros mais básicos utilizados para controle da estrutura porosa são a largura dos filamentos depositados, o espaçamento entre eles (*gap*) e o ângulo de *raster* entre camadas. Os estudos também propõem estratégias avançadas para o controle das características do MP, como o desalinhamento lateral entre camadas (*stagger*), a repetição de camadas com mesmo ângulo

(*build layer*), a variação do *gap* na camada, camadas com diferentes valores de *gap* e o agrupamento de dois ou mais filamentos no preenchimento.

Apesar destes estudos propiciarem um avanço nas alternativas de geração de MP, uma característica comum que pode ser observada nas estruturas geradas pelo preenchimento *raster* é a baixa razão de aspecto (relação entre largura e comprimento) apresentada pelos poros. Com isso, os poros possuem uma alta interconectividade na camada e entre camadas.

Com um objetivo diferente, os trabalhos de Jin et al. (2017) e Wang et al. (2019) demonstraram que ao variar os parâmetros de velocidade de deslocamento do cabeçote e extrusor e/ou quantidade de material extrudado é possível gerar uma variação de largura no filamento depositado na tecnologia de extrusão de material. Com isso, os autores conseguiram otimizar o preenchimento de peças, reduzindo a incidência de vazios no interior das mesmas. Contudo, não foram identificados na literatura estudos que utilizam esta estratégia de variação de largura no filamento na produção de MP.

A principal hipótese deste trabalho era que seria possível obter MP variando a largura do filamento ao longo da deposição do material. A partir disso, esta pesquisa propôs o desenvolvimento de uma nova estratégia de deposição denominada preenchimento segmentado, aplicada ao preenchimento *raster*, que utiliza a deposição de filamentos com largura variada na geração de estruturas porosas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um método de fabricação de meios porosos por Manufatura Aditiva por extrusão de material baseado na variação da largura do filamento depositado em estratégia de preenchimento tipo *raster*, que permita a obtenção de uma estrutura porosa com características específicas de porosidade e permeabilidade.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar o comportamento da largura do filamento em função da variação dos parâmetros de velocidade de impressão e taxa de extrusão, para definir a variação dos mesmos ao longo do preenchimento para se obter a estrutura porosa idealizada;
- Analisar e comparar as características de diferentes configurações de estruturas porosas obtidas variando os parâmetros do preenchimento;
- Caracterizar experimentalmente a porosidade e permeabilidade dos MP fabricados com o preenchimento proposto;
- Elaborar um procedimento para calibração e definição dos parâmetros de deposição adequados à obtenção do preenchimento proposto em diferentes equipamentos de AM por extrusão de material.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Em algumas aplicações de MP, como nos setores de engenharia biomédica, petróleo e gás, aeroespacial, etc., torna-se importante o controle das propriedades fluido dinâmicas do material utilizado (como porosidade e permeabilidade). Devido a isso, é necessário que as estruturas porosas possam ser fabricadas de maneira planejada, garantindo que o MP atenda os seus requisitos específicos.

Os trabalhos já existentes de fabricação de MP por AM por extrusão de material contribuem com diversas estratégias que permitem o controle da geometria de estruturas do tipo *lattice*. Entretanto, os poros presentes nessas estruturas apresentam baixa razão de aspecto e alta conectividade na camada. A nova disposição do preenchimento proposta tende a apresentar poros com maior razão de aspecto e com menor interconectividade na estrutura, resultando em um MP com características de porosidade e permeabilidade que podem ser vantajosas para aplicações específicas. Por se tratar de uma forma de preenchimento não utilizada previamente, abrem-se várias oportunidades para novos estudos e também possibilidades de aplicação, até o momento ainda não identificadas.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo aponta o tema principal e o problema da pesquisa, definindo os objetivos e a justificativa para a realização deste estudo. No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, contendo os conceitos e estudos que embasaram este projeto. Já no terceiro capítulo, são apresentados os materiais e métodos necessários para o cumprimento dos objetivos. O quarto capítulo traz os resultados da pesquisa e as respectivas discussões. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões da pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, contendo os conceitos de meios porosos (MP) e suas principais características; manufatura aditiva (AM) e suas tecnologias; fabricação de MP através da AM; parâmetros de processo da tecnologia de extrusão de material e a obtenção de MP através da tecnologia de extrusão de material.

### 2.1 MEIOS POROSOS

Segundo Nield e Bejan (2013), um MP pode ser definido como um material de matriz sólida contendo vazios interconectados, pelos quais torna-se possível a passagem de fluídos. Existem ambos MP naturais e artificiais, com diferentes tamanhos, geometrias e distribuição de poros.

Os MP naturais, como por exemplo areia, madeira e o pulmão humano, costumam apresentar seus poros com distribuição e tamanhos irregulares. Os MP artificiais são fabricados a partir de materiais metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos.

Dentre as diversas aplicações de MP, podem ser citados a geologia, bioengenharia (*scaffolds*), geração de energia, supressão de vibrações, isolamento térmico, absorção sonora, filtragem de fluidos, entre outros (SHIGUEOKA; VOLPATO, 2021). Para a maioria dessas aplicações, torna-se necessário o entendimento das características de porosidade, permeabilidade e tortuosidade. Estes conceitos são apresentados nas seções seguintes.

#### 2.1.1 Porosidade

A porosidade ( $\phi$ ) de um meio pode ser definida como a fração do volume total do sólido que é ocupado pelos espaços vazios (NIELD; BEJAN, 2013; ROUQUEROL *et al.*, 1994). O seu valor pode ser calculado através da Equação 1, sendo  $V_p$  o volume ocupado pelos poros e  $V_t$  o volume total do MP (LIU; CHEN, 2014).

$$\varphi = \left( \frac{V_p}{V_t} \right) \times 100\% \quad (1)$$

A porosidade também pode ser obtida realizando uma Análise Microscópica em uma seção transversal do MP. Nesse caso, o seu cálculo é obtido conforme a Equação 2, sendo  $S_p$  a área total ocupada pelos poros e  $S_t$  a área total da seção transversal (LIU; CHEN, 2014).

$$\varphi = \left( \frac{S_p}{S_t} \right) \times 100\% \quad (2)$$

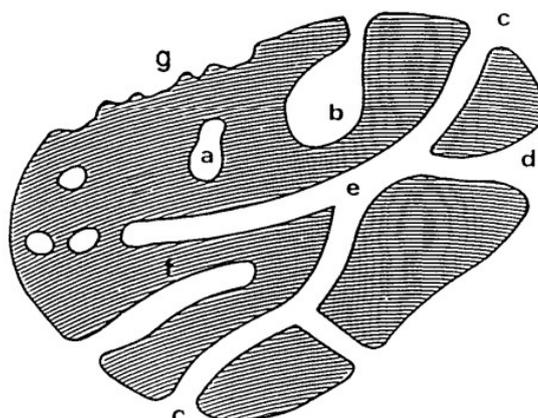
Uma outra maneira de se obter a porosidade é através da relação apresentada na Equação 3, que utiliza a massa ( $M$ ), volume ( $V$ ) e a massa específica ( $\rho_s$ ) do material (LIU; CHEN, 2014).

$$\varphi = \left( 1 - \frac{M}{V \times \rho_s} \right) \times 100\% \quad (3)$$

As Equações 1, 2 e 3 são utilizadas para o cálculo da porosidade chamada de absoluta, pois são considerados todos os poros presentes no volume do MP. Além da absoluta, existe também a porosidade efetiva (ou porosidade aberta). Na Figura 1 é apresentado um material com diferentes tipos de poros, destacando a diferença entre poros conectados (abertos) e não conectados (fechados). Caso um MP possua poros desconectados dos demais, o cálculo da porosidade efetiva considera apenas os poros abertos, pelos quais torna-se possível a passagem de fluidos (NIELD; BEJAN, 2013; PENNELLA *et al.*, 2013).

Quanto a geometria dos poros, Rouquerol *et al.* (1994) afirmam que a real forma dos poros é de difícil descrição, devido à: existência de poros de diferentes geometrias no mesmo material; conexões entre poros de diferentes tamanhos, formatos e localizações; e distribuição dos tamanhos de poros variada. Por esse motivo, procurando simplificar, os autores descrevem as formas dos poros como cilindros, prismas, cavidades e esferas.

Figura 1 – Tipos de poros: (a) fechado; (b), (c), (d), (e) e (f) abertos; (g) rugosidade externa

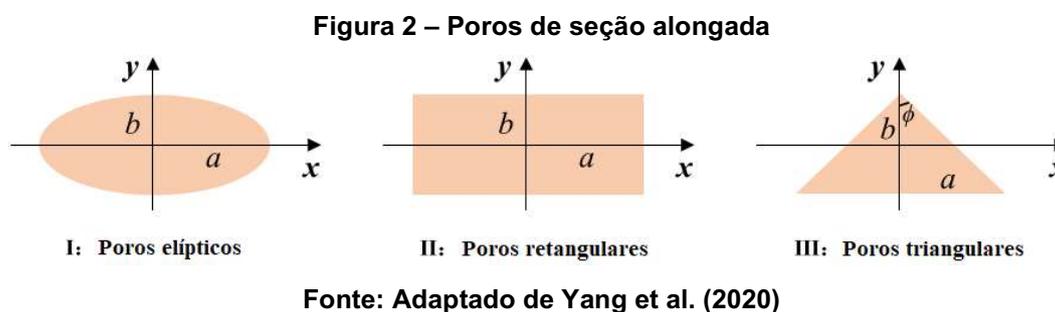


Fonte: Rouquerol et al. (1994)

O tamanho (ou largura) do poro é uma característica dos MP que pode ser definida como a distância entre duas paredes opostas, dependendo da sua geometria. Por exemplo, em um poro cilíndrico utiliza-se o diâmetro, em uma cavidade utiliza-se a largura, etc. Os poros podem ser classificados em três categorias quanto ao seu tamanho, de acordo com normas da IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry* - União Internacional de Química Pura e Aplicada): micro poros, com dimensões inferiores a 2 nm; meso poros, com dimensões entre 2 e 50 nm; e macro poros, com dimensões superiores a 50 nm (ROUQUEROL *et al.*, 1994). Entretanto, como os poros observados neste trabalho são muito maiores que 50 nm, a classificação proposta por Mays (2007) acaba se tornando mais adequada, sendo considerados: nano poros, entre 0,1 a 100 nm, micro poros, entre 0,1 e 100  $\mu\text{m}$  e mili poros, entre 0,1 e 100 mm.

Outro parâmetro que pode ser utilizado para avaliar a forma dos poros é a razão de aspecto. Quando os poros apresentam uma seção com formato mais alongado, os mesmos podem ser representados por duas dimensões (ou eixos), como mostra a Figura 2, sendo possível calcular a razão de aspecto, definida como a divisão entre o eixo menor (b) pelo eixo maior (a), variando entre 0 e 1. Quando a razão de aspecto se aproxima do valor 1, o formato dos poros se aproxima ao de um círculo (no caso de poros elípticos) ou um quadrado (poros retangulares), enquanto em um valor próximo de 0 o poro acaba apresentando

um formato de uma fenda, bastante fino e comprido (BRACE, 1977; CHENG; TOKSÖZ, 1979; YANG *et al.*, 2020).



Um dos métodos que possibilitam a caracterização geométrica dos poros é a microtomografia computadorizada por raios-X ( $\mu$ CT). Essa técnica consiste em irradiar por raios-X o corpo de prova em várias seções bidimensionais (2D), possibilitando a formação de um mapa de pixels 2D de cada fatia. Esses mapas são posteriormente processados obtendo-se a geometria 3D. A precisão desse método depende da resolução do equipamento utilizado para a aquisição das imagens e da capacidade de processamento do computador (HO; HUTMACHER, 2006). De acordo com Berg (2014), os avanços na área de MP estão atrelados ao progresso da computação, que vêm possibilitando simulações e reconstruções tridimensionais de MP reais ou modelados.

### 2.1.2 Permeabilidade

A permeabilidade pode ser definida como a facilidade de um fluido escoar através de um MP (KEEHM, 2003), sendo que esta característica depende apenas da estrutura porosa do MP, e não da natureza do fluido (NIELD; BEJAN, 2013). Devido à alta variabilidade nas geometrias dos MP, a constante de permeabilidade ( $k$ ), em  $m^2$ , costuma ser obtida de maneira empírica, através de métodos experimentais que utilizam medições diretas ou indiretas (PENNELLA *et al.*, 2013).

As medições indiretas utilizam técnicas de medição de tamanho de poro e porosidade conectada ou efetiva, como por exemplo, a intrusão de mercúrio, picnometria de hélio, entre outras. Já as medições diretas procuram obter a permeabilidade através da medição da queda de pressão e vazão volumétrica

de um fluido ao escoar por um MP. Para estas, o cálculo do valor de permeabilidade é dado a partir da Lei de Darcy, representada na Equação 4 (PENNELLA *et al.*, 2013).

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k} v_s \quad (4)$$

Sendo  $\Delta p$  o gradiente de pressão,  $L$  o comprimento do MP,  $\mu$  a viscosidade dinâmica,  $v_s$  a velocidade do fluido e  $k$  a constante de permeabilidade.

Uma outra maneira de se obter a constante de permeabilidade de um MP é utilizando a equação de Hazen-Darcy (Equação 5), que deriva da Lei de Darcy e utiliza a vazão volumétrica ( $q$ ) e a área da seção transversal do meio ( $A$ ) no cálculo (LAGE, 1998).

$$k = \frac{q}{A} \mu \frac{L}{\Delta p} \quad (5)$$

Para valores maiores de velocidade, Forchheimer observou que a relação entre velocidade e queda de pressão assume um comportamento parabólico, e não linear como nas Equações 4 e 5. Portanto, para esses casos, deve ser utilizada a equação de Dupuit-Forchheimer (Equação 6), que utiliza também a densidade do fluido ( $\rho$ ) no cálculo, e tem como resultado as permeabilidades Darciana  $k_1$  (referente à permeabilidade  $k$ ) e a não-Darciana  $k_2$  (INNOCENTINI; PANDOLFELLI, 1999).

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (6)$$

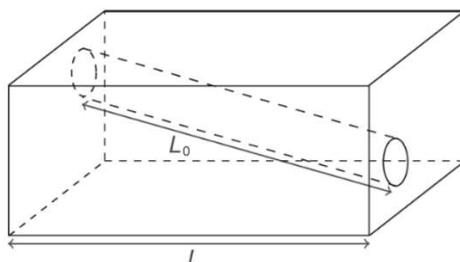
### 2.1.3 Tortuosidade

A tortuosidade ( $\tau$ ) é um parâmetro adimensional que afeta diretamente a resistência ao transporte de fluidos pelo MP (PENNELLA *et al.*, 2013). Pode ser definida como a razão entre o comprimento percorrido pelo fluido ( $L_0$ ) e a espessura do MP na direção do fluxo ( $L$ ), como mostrado na Equação 7

(KOPONEN; KATAJA; TIMONEN, 1997). Na Figura 3 é apresentada uma representação da tortuosidade e os parâmetros envolvidos no seu cálculo.

$$\tau = \frac{L_0}{L} \quad (7)$$

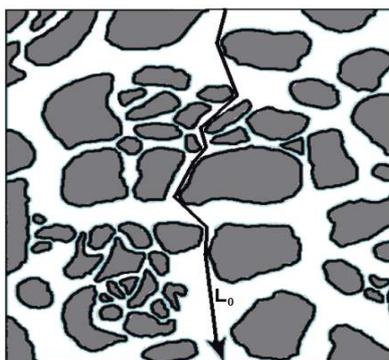
**Figura 3 – Representação dos comprimentos envolvidos no cálculo da tortuosidade**



Fonte: Adaptado de Berg (2014)

Contudo, essa representação (assim como a Equação 7) é bastante teórica, uma vez que, em um MP real, o escoamento geralmente não ocorre apenas por um caminho longo (como representado na Figura 4). Assim, a tortuosidade de um meio com geometria irregular é definida pela média dos comprimentos efetivos (GHANBARIAN *et al.*, 2013).

**Figura 4 – Representação esquemática da tortuosidade de um MP**



Fonte: Adaptado de Ghanbarian et al. (2013)

Na prática, a tortuosidade é calculada de forma indireta, através de equações que relacionam porosidade, permeabilidade e tortuosidade de um MP. Nos trabalhos de Berg (2014), Fu, Thomas e Li (2021) e Koponen, Kataja e Timonen (1997) são citadas referências de relações entre os parâmetros de porosidade,

permeabilidade e tortuosidade, pelas quais é possível determinar o valor de um dos parâmetros conhecendo-se os outros dois.

#### 2.1.4 Fabricação de meios porosos por processos tradicionais

A fabricação de MP através de processos convencionais pode ser dividida, quanto ao seu princípio, em três categorias: metais porosos, cerâmicas porosas e espumas poliméricas (LIU; CHEN, 2014). No caso dos metais, os processos utilizados são: sinterização do pó, sinterização de fibra metálica, fundição/infiltração, deposição metálica e solidificação direcional (COLOMBO; DEGISCHER, 2010). Para a geração de MP cerâmicos, Nishiora et al. (2018) citam quatro principais categorias: sinterização parcial, agentes de sacrifício, modelos de réplica e *direct foaming*. Por fim, para as espumas poliméricas, Wu et al. (2012) apresentam como principais métodos: *direct templating*, *block copolymer self-assembly*, *direct synthesis*, *high internal phase emulsion polymerization*, *interfacial polymerization* e *breath figures*.

Além dos processos tradicionais, a AM apresenta um potencial para a fabricação de MP com estrutura porosa controlada, utilizando materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos e compósitos (MICHAILIDIS *et al.*, 2014). Um maior detalhamento deste processo de fabricação é apresentado na seção seguinte.

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

Volpato e Carvalho (2017) definem a AM (também conhecida como Impressão 3D) como um processo de fabricação em que o material é adicionado sucessivamente na forma de camadas, a partir de um modelo geométrico 3D gerado em um sistema CAD (*Computer-Aided Design* – Projeto Auxiliado por Computador). Segundo os autores, devido ao seu princípio, a AM possibilita a fabricação de peças com geometrias complexas, que muitas vezes não poderiam ser fabricadas pelos processos tradicionais.

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2015, as tecnologias de AM podem ser classificadas em sete categorias ou grupos, que são apresentados e descritos no Quadro 1 (VOLPATO, N.; CARVALHO, 2017).

Uma das principais vantagens da AM é a possibilidade de fabricar peças com geometria complexa, uma vez que o seu princípio divide um modelo tridimensional em uma sequência de camadas 2D mais simples (ZHAI; CHEN, 2019). Devido a isso, os processos de AM permitem a inserção de porosidade em regiões específicas de uma peça fabricada, podendo gerar MP de diferentes configurações e para diversas aplicações (GUDDATI *et al.*, 2019).

**Quadro 1 – Classificação das tecnologias de AM**

<b>Classificação das tecnologias AM</b>	<b>Descrição do princípio e exemplos de tecnologias</b>
Fotopolimerização em cuba	Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz ultravioleta (UV). Como exemplos podem ser citados a Estereolitografia (SLA) e a produção contínua com interface líquida (CLIP).
Extrusão de material	Material é extrudado através de um bico e depositado de maneira seletiva. As tecnologias de FDM ( <i>Fused Deposition Modeling</i> ) são o principal exemplo desse grupo.
Jateamento de material	Deposição do material em pequenas gotas de forma seletiva. Podem ser citadas como exemplo as tecnologias <i>PolyJet</i> e <i>MJP (Multijet printing)</i> .
Jateamento de aglutinante	Material em forma de pó é unido seletivamente pela deposição de um agente aglutinante líquido. São exemplos dessa categoria as tecnologias de <i>ColorJet Printing</i> e <i>VoxelJet</i> .
Fusão de leito de pó	Energia térmica é utilizada para fundir seletivamente regiões de um leito de pó. As tecnologias de sinterização seletiva a laser (SLS) e fusão seletiva a laser (SLM) operam por esse princípio.
Adição de lâminas	União por colagem de lâminas recortadas sobrepostas. O principal exemplo de tecnologia é o LOM ( <i>Laminated Object Manufacturing</i> ).
Deposição com energia direcionada	Energia térmica é utilizada para fundir o material simultaneamente à sua deposição. Podem ser citadas como exemplos as tecnologias LENS ( <i>Laser Engineered Net Shaping</i> ) e DMD ( <i>Direct Metal Deposition</i> ).

**Fonte: Adaptado de Volpato e Carvalho (2017)**

### 2.3 PRODUÇÃO DE MEIOS POROSOS ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA

No trabalho de revisão de Guddati *et al.* (2019) são apresentados os avanços recentes nas tecnologias de AM no desenvolvimento de materiais porosos, destacando os processos SLA, extrusão de pasta cerâmica, jateamento de aglutinante, SLS/SLM e LENS. Também foram citadas diversas aplicações das estruturas porosas fabricadas por AM, como filtros, ferramental, medicamentos, implantes, trocadores de calor e baterias.

Stoffregen et al. (2011) dividiram os MP fabricados por esses processos em dois grupos: GDLSP (*Geometrically Defined Lattice Structure Porosity* – Porosidade de Estrutura *Lattice* Geometricamente Definida) e GUP (*Geometrically Undefined Porosity* – Porosidade Geometricamente Indefinida). Os MP do tipo GDLSP apresentam poros com tamanhos entre 100  $\mu\text{m}$  e 1 mm, enquanto os do tipo GUP podem possuir poros entre 1  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$  (GUDDATI et al., 2019).

Na área da geologia, Ishutov et al. (2018) discorrem sobre o uso da AM na fabricação de “*rock proxies*” – réplicas impressas em escala aumentada de rochas digitais (modelos 3D reconstruídos a partir de rochas). Essas réplicas permitem a validação de simulações numéricas de fluxo de fluido no interior das rochas, sem a necessidade da extração de rochas naturais (chamados de testemunhos).

Já na engenharia de tecidos, a AM é utilizada para a obtenção das estruturas de *scaffolds* – MP com porosidade controlada utilizados para cultura celular. Essas estruturas procuram mimetizar o osso humano, tanto em sua composição, resistência mecânica e escoamento de fluidos no seu interior, possibilitando o transporte de nutrientes para o crescimento das células (MONTAZERIAN et al., 2017).

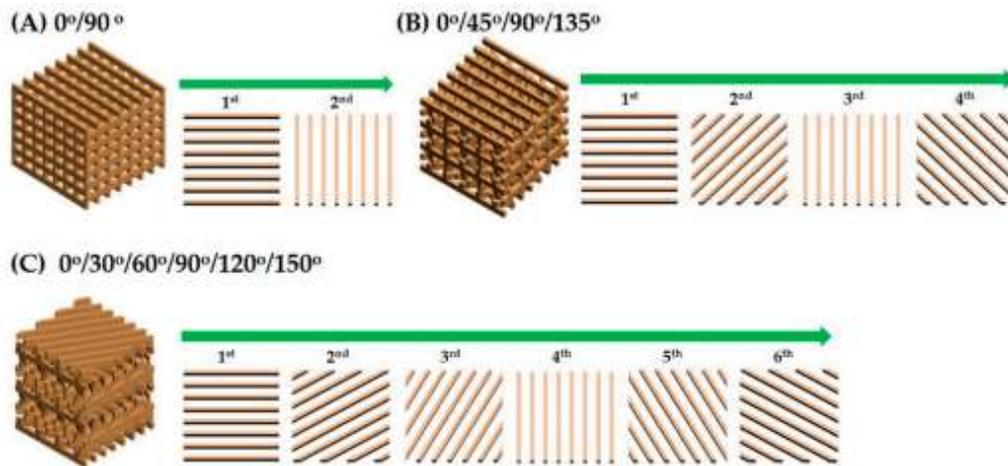
Os *scaffolds* costumam apresentar a estrutura do tipo *lattice*, formada por barras que são conectadas por nós, de maneira semelhante à uma treliça. Os processos de AM possuem a vantagem de permitir a fabricação de estruturas *lattice* com geometria complexa, sem grande aumento do custo, o que não é possível utilizando meios tradicionais de manufatura (DONG; TANG; ZHAO, 2017).

Lee et al. (2018) utilizaram a tecnologia de fotopolimerização em cuba na fabricação de *scaffolds* cerâmicos, gerando estruturas porosas com diferentes configurações através da variação do ângulo das barras nas amostras (Figura 5). Já no estudo de Malayeri et al. (2016) também foi utilizada a fotopolimerização em cuba para a produção de *scaffolds*, entretanto foi utilizada a estratégia de desalinhamento lateral (*stagger*) entre as fibras do material (Figura 6).

Também com o objetivo de obter *scaffolds* cerâmicos, Fielding e Bose (2013) utilizaram em seu estudo a tecnologia de jateamento de aglutinante para

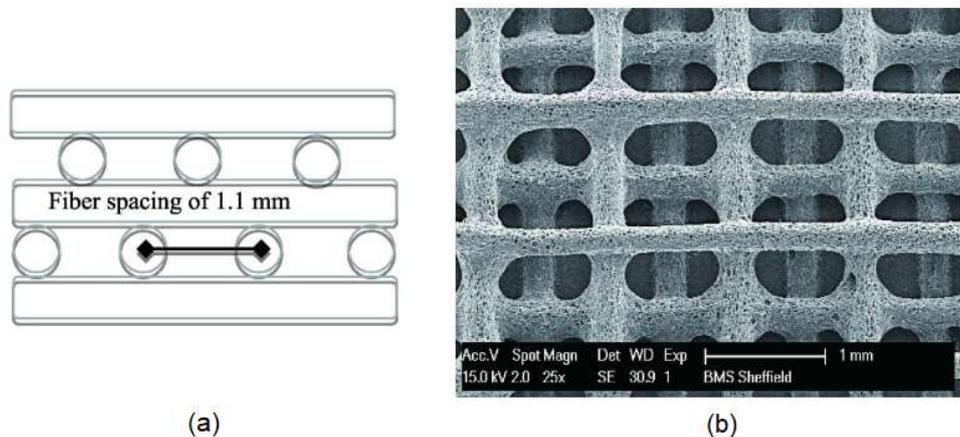
fabricar as estruturas porosas. Alterando a distância entre as barras no modelo tridimensional, foram obtidas estruturas com tamanhos de poros variando de 350  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$ .

Figura 5 – Representação das estruturas porosas obtidas variando o ângulo das barras



Fonte: Lee et al. (2018)

Figura 6 – Scaffold cerâmico com desalinhamento entre as fibras: (a) representação do desalinhamento com espaçamento de 1,1 mm entre as fibras e (b) imagem obtida por microscópio eletrônico da estrutura fabricada

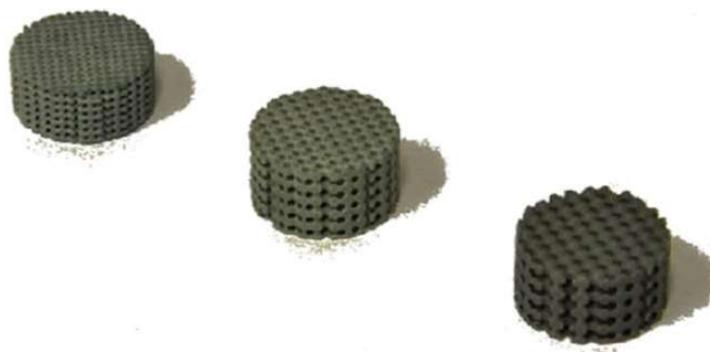


Fonte: Adaptado de Malayeri et al. (2016)

Dias et al. (2012), utilizando a tecnologia de jateamento de material com cera, fabricaram MP com diferentes tamanhos de poros e porosidades (Figura 7). Além disso, os autores realizaram a medição da permeabilidade em 9 amostras, tanto experimentalmente quanto através de simulação numérica. Demonstrou-se que mantendo a geometria do poro e aumentando o seu tamanho resulta em um aumento da permeabilidade do material.

Utilizando a tecnologia de jateamento de material denominada Polyjet, Egan et al. (2017) fixaram o parâmetro de tamanho de poro e exploraram a geração de estruturas *lattice* com diferentes geometrias de célula unitária. Os autores também realizaram simulações numéricas para avaliar a influência do tamanho de poro na porosidade, permeabilidade, área superficial e módulo de cisalhamento.

**Figura 7 – MP com porosidade planejada obtidos por jateamento de material**



**Fonte: Dias et al. (2012)**

Para uma diferente aplicação, Fogliatto (2018) utilizou a tecnologia de fusão de leito de pó para a obtenção de filtros metálicos, aplicando o conceito de gradação funcional (*Functionally Graded Materials – FGM*). Para isso, o autor variou os parâmetros de distância entre as linhas de varredura (*hatch distance*) e velocidade de varredura do laser, gerando vazios em regiões que o material não recebe energia suficiente para a fusão total das partículas metálicas. Além disso, o trabalho procurou analisar a influência desses parâmetros na porosidade dos filtros obtidos.

Os trabalhos de Dias et al. (2012), Egan et al. (2017) Fielding e Bose (2013) Lee et al. (2018) e Malayeri et al. (2016) podem ser classificados como GDSLP, e possuem como principal desvantagem a necessidade de modelar a estrutura *lattice* em um ambiente CAD para a sua fabricação. Já no estudo de Fogliatto (2018) não há essa necessidade, e as estruturas obtidas podem ser classificadas como GUP.

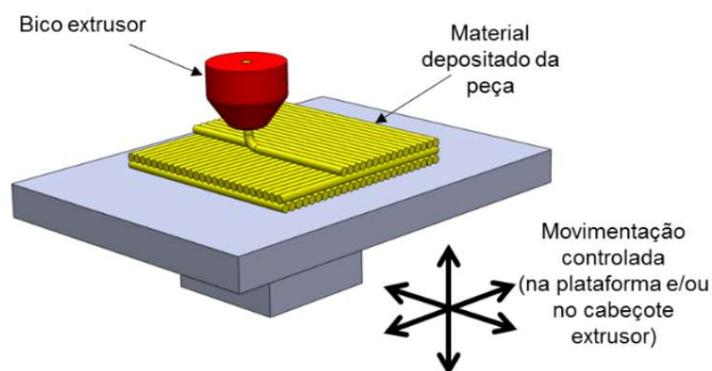
Outra alternativa para evitar a modelagem da estrutura porosa em um software é a utilização da tecnologia de extrusão de material para a geração de MP que permite fabricar estruturas *lattice* com diversas configurações através

apenas da variação dos parâmetros de processo. Um maior detalhamento dessa tecnologia e dos parâmetros envolvidos é realizado na seção a seguir.

## 2.4 MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL E PARÂMETROS DE PROCESSO

Uma representação do funcionamento da tecnologia de extrusão de material é apresentada na Figura 8. Nesse princípio, a matéria-prima pode ser encontrada inicialmente na forma de filamento (mais comum), particulado, ou pasta. Neste trabalho, o foco recai sobre equipamentos com alimentação por filamento, porém não limitando a proposta à apenas esse tipo de alimentação. O material é depositado na forma de um fino filamento através de um bico extrusor, gerando as camadas do sólido tridimensional. Esse material encontra-se, inicialmente, em um estado semissólido (pastoso), e é solidificado rapidamente após o contato com a plataforma de construção ou com os filamentos previamente depositados, aos quais ele se adere (VOLPATO, Neri, 2017).

**Figura 8 – Princípio de funcionamento da tecnologia de AM por extrusão de material**



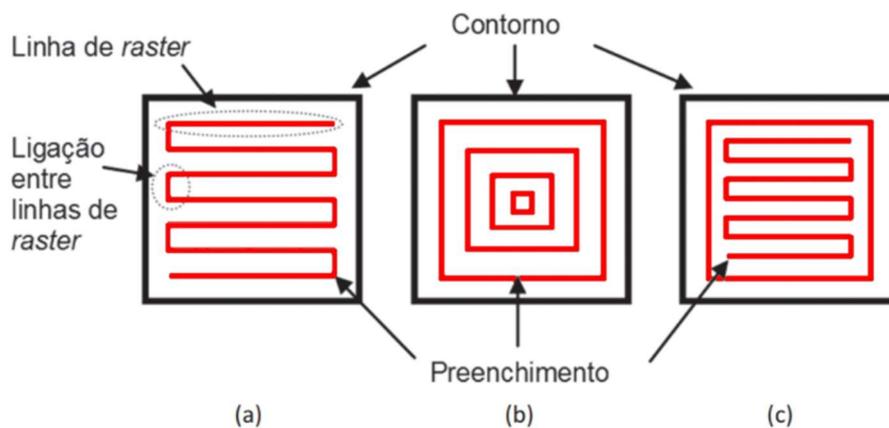
Fonte: Volpato (2017)

### 2.4.1 Estratégias de preenchimento

Durante a formação da camada é definido um perímetro externo chamado de contorno, delimitando a região em que ocorre o preenchimento. As estratégias de preenchimento mais comuns de serem empregadas são os preenchimentos do tipo *raster*, *contour* (contorno ou concêntrico) e a combinação desses dois (Figura 9). O preenchimento *raster* apresenta um padrão de ziguezague em sua

construção, enquanto o *contour* consiste em contornos equidistantes de acordo com a geometria 2D do modelo (VOLPATO, Neri, 2017).

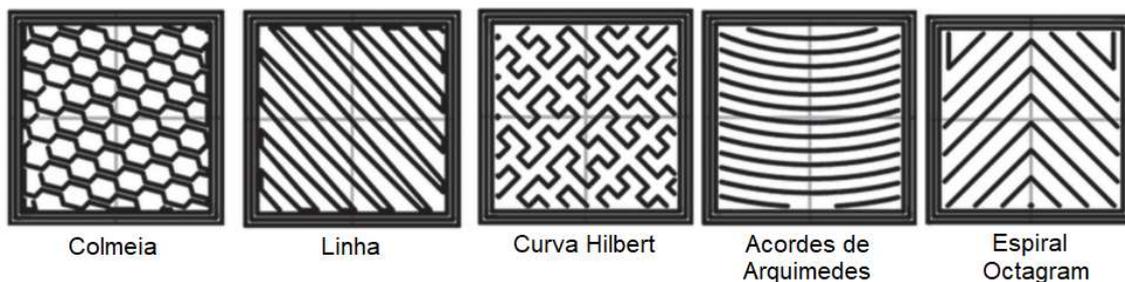
**Figura 9 – Principais estratégias de preenchimento: (a) *raster*, (b) *contour* e (c) combinação *raster* e *contour***



Fonte: Adaptado de Volpato (2017)

Além dessas estratégias, outros tipos de preenchimento podem ser utilizados no planejamento de processo, podendo-se citar: colmeia, linha, curva Hilbert, acordes de Arquimedes, espiral octagram, entre outras (VOLPATO, Neri, 2017). Essas estratégias são apresentadas na Figura 10.

**Figura 10 – Outras estratégias de preenchimento**

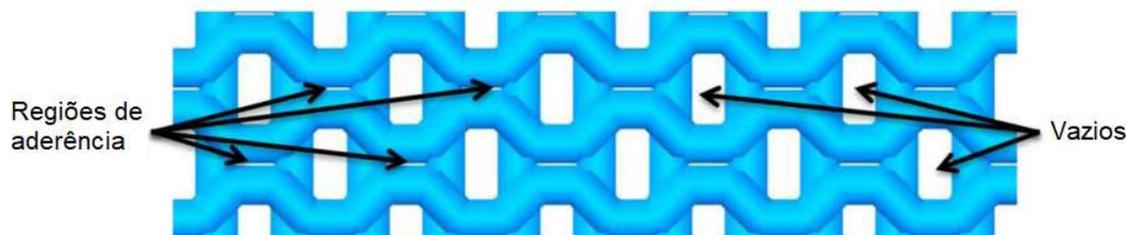


Fonte: Adaptado de Slic3r Manual (2021)

Dentre estas estratégias, o preenchimento do tipo colmeia (também chamada de *honeycomb*) é caracterizado pela formação de um padrão de células hexagonais. Akhouni e Behravesch (2019) discorrem, em seu trabalho, a formação de vazios no preenchimento *honeycomb* (Figura 11), o que ocorre até mesmo com o valor máximo de preenchimento (100%). No manual do software de planejamento de processo Slic3r é mostrado que o aumento da

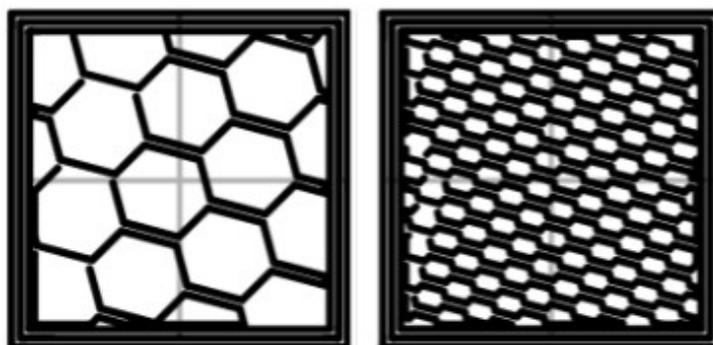
densidade de preenchimento reduz o tamanho das células hexagonais (Figura 12).

**Figura 11 – Formação de vazios (poros) no preenchimento do tipo colmeia (*honeycomb*)**



Fonte: Adaptado de Akhoundi e Behraves (2017)

**Figura 12 – Efeito da densidade de preenchimento na geometria *honeycomb***



Fonte: Adaptado de Slic3r Manual (2021)

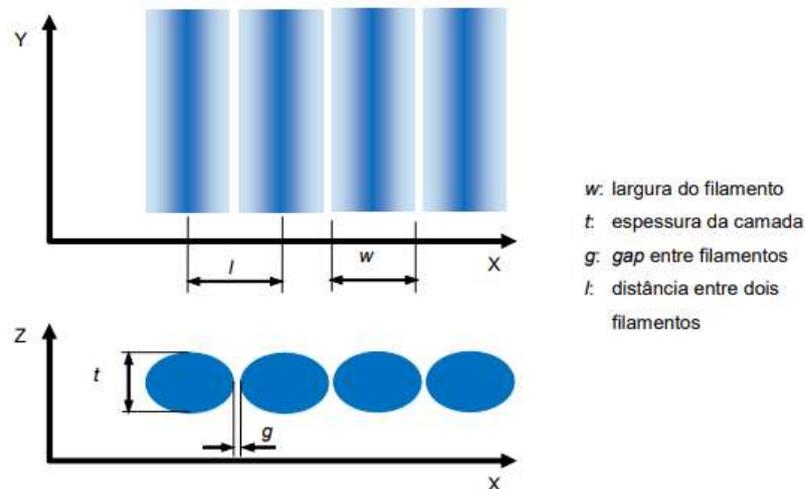
Apesar do potencial para a geração de estruturas porosas do preenchimento do tipo colmeia, não foram encontrados estudos na literatura de obtenção de MP com esta estratégia. Na prática, esses estudos costumam utilizar o preenchimento *raster* na fabricação dos MP, controlando as estruturas porosas através da variação dos parâmetros de processo que são detalhados na próxima seção.

#### 2.4.2 Parâmetros de processo do preenchimento *raster*

Para melhorar a adesão entre as camadas, o filamento extrudado, ao ser depositado, é pressionado contra a camada anterior, fazendo com que, geralmente, sua largura seja maior que a espessura. Dessa maneira, a seção transversal do filamento extrudado aproxima-se à de uma elipse. Na Figura 13

pode ser observada uma representação da geometria do filamento depositado, juntamente com alguns dos principais parâmetros que podem ser controlados.

**Figura 13 – Geometria e parâmetros do filamento depositado**



Fonte: Volpato (2017)

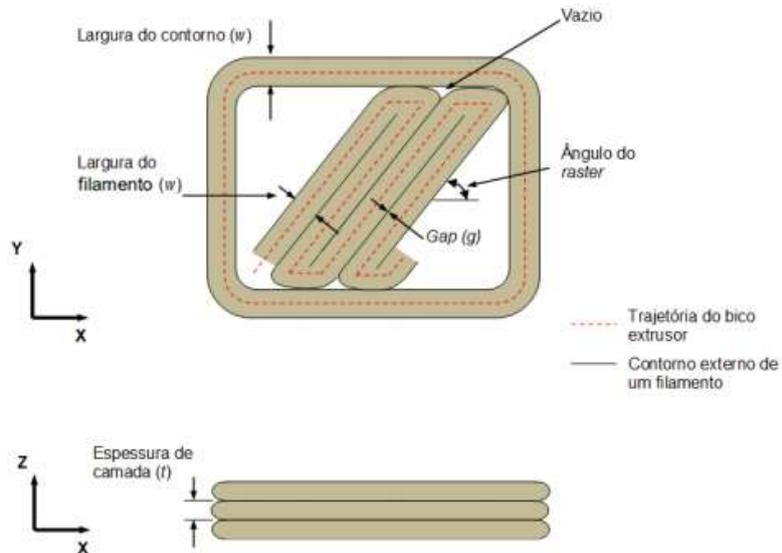
Dentre os parâmetros apresentados, o *gap* possui grande importância para a geração de estruturas porosas, uma vez que representa um vazio (fresta) entre dois filamentos adjacentes. Quando o seu valor é positivo, é gerado um espaçamento entre os filamentos, o que é interessante para a fabricação de estruturas porosas do tipo *lattice* (TOO *et al.*, 2001). Por outro lado, quando deseja-se obter um contato lateral entre os filamentos, o valor do *gap* deverá ser zero ou negativo (VOLPATO, Neri, 2017).

Além desses parâmetros, é possível controlar o ângulo de *raster*, ou seja, o ângulo em que as linhas do preenchimento são depositadas no plano X-Y (Figura 14). Esse parâmetro não é necessariamente constante em todas as camadas, podendo ser aplicado um ângulo de *raster* entre camadas, como por exemplo na Figura 15 em que as camadas apresentadas possuem uma rotação de 90°.

Na Figura 14 pode ser observado que o preenchimento *raster* acaba gerando pequenos vazios na camada. Esse efeito também pode ocorrer em outras estratégias de preenchimento e tecnologias de AM. Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2010), é possível reduzir a incidência desses vazios aproximando a trajetória de deposição do preenchimento ao contorno (Figura 16), obtendo um aumento na resistência da peça, porém diminuindo sua precisão

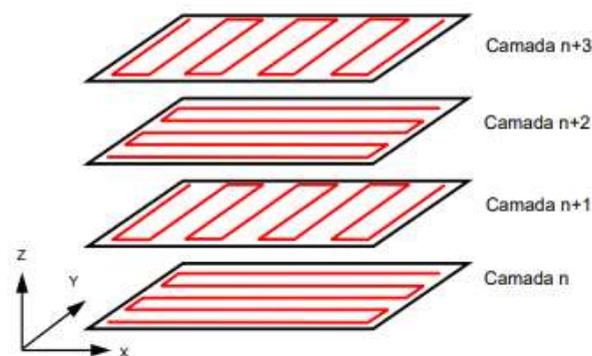
dimensional. Outra maneira de se obter a redução de vazios é aplicar nessas regiões um aumento na largura de extrusão, através da variação de parâmetros que são detalhados na seção seguinte.

**Figura 14 – Contorno e estratégia de preenchimento do tipo raster**



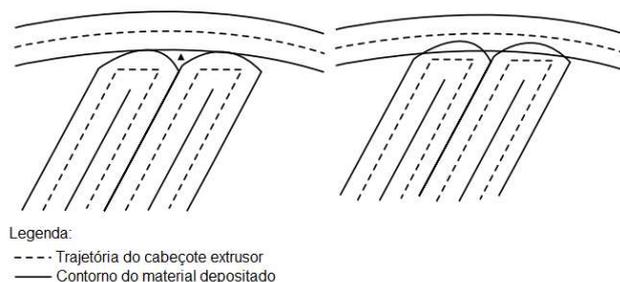
Fonte: Adaptado de Volpato (2017)

**Figura 15 – Camadas com rotação de 90° entre os ângulos de raster**



Fonte: Volpato (2017)

**Figura 16 – Redução dos vazios no preenchimento através do controle da trajetória**



Legenda:  
 - - - Trajetória do cabeçote extrusor  
 — Contorno do material depositado

Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2010)

### 2.4.3 Variação da largura de extrusão

Além dos parâmetros de processo já mencionados, a velocidade do movimento do bico extrusor e a quantidade de material extrudado também podem ser controlados. A velocidade do bico extrusor está diretamente relacionada com a velocidade dos motores que realizam o posicionamento nos eixos X e Y, enquanto a quantidade de material extrudado está relacionada com a velocidade de rotação do motor do sistema de alimentação (do filamento, rosca transportadora, embolo, outro) e, conseqüentemente, com a pressão aplicada no material dentro do cabeçote extrusor.

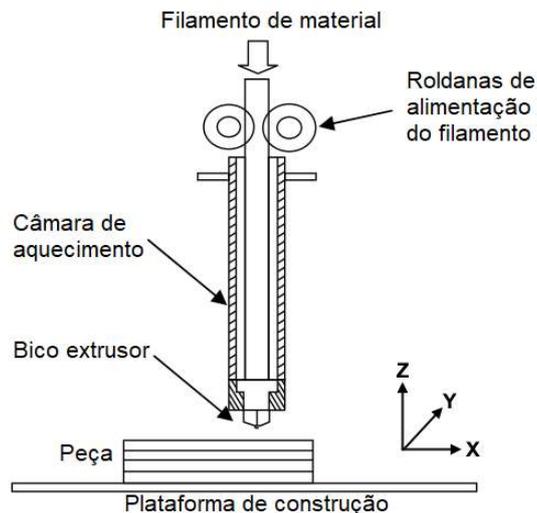
Para que o filamento depositado apresente um diâmetro (ou largura) constante, é necessário que a velocidade do bico extrusor e a pressão no material também sejam constantes (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010). Com isso, a variação desses parâmetros provoca uma variação na largura do filamento depositado.

A quantidade de material extrudado é controlada pelo parâmetro de taxa de extrusão (ou simplesmente extrusão). No caso de impressoras com alimentação por filamento, esse parâmetro está diretamente relacionado à velocidade que o motor de alimentação do filamento rotaciona durante a impressão (WANG, Jun *et al.*, 2019). Ao reduzir o seu valor durante a deposição, o motor deverá rotacionar mais lentamente, empurrando menos material para o cabeçote extrusor e, conseqüentemente, reduzindo a largura do filamento impresso (JIN *et al.*, 2017; TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

Contudo, há um atraso (*delay*) entre o comando de redução da extrusão e a redução efetiva da largura do material. Isso porque o cabeçote extrusor é formado por dois sistemas: um motor que controla a taxa de alimentação do material e um sistema de aquecimento responsável por controlar a temperatura e o fluxo de calor no material, que deve ser suficiente para fundi-lo ou amolecê-lo para sua extrusão. Na Figura 17 é apresentada uma representação destes sistemas presentes no cabeçote extrusor. A taxa de alimentação e fluxo de calor são responsáveis pela quantidade de material que sai do bico extrusor (TURNER; STRONG; GOLD, 2014). No momento em que a rotação do motor de alimentação é alterada, a quantidade de material que é empurrado para o cabeçote também se altera. Portanto, o fluxo de calor deve ser modificado de

acordo com essa variação. Embora o motor de alimentação apresente uma resposta rápida ao comando de alteração da sua rotação, o sistema de aquecimento opera de maneira mais lenta, ou seja, possui uma inércia térmica, resultando no *delay* da variação da taxa de extrusão.

**Figura 17 – Sistemas presentes no cabeçote extrusor**



**Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Strucker (2010)**

Já a velocidade do movimento do bico extrusor é controlada pelo parâmetro de velocidade de impressão, que está relacionado à velocidade de rotação dos motores que realizam os movimentos dos eixos X e Y do equipamento de AM. Dessa maneira, uma redução da velocidade fará o bico extrusor se deslocar mais lentamente na plataforma de construção, enquanto um aumento da velocidade fará com que o mesmo se desloque mais rapidamente.

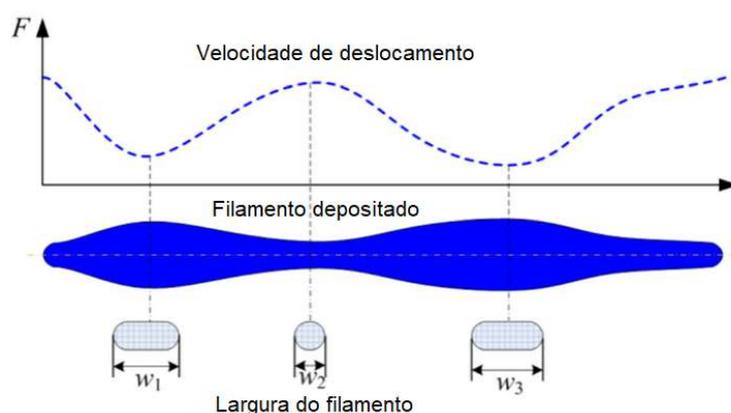
Teoricamente, quando há uma variação na velocidade de impressão, o motor de alimentação deverá variar sua rotação também para acompanhar o deslocamento e garantir que o material depositado permaneça com dimensões constantes (TURNER; STRONG; GOLD, 2014). Isso ocorre, pois o *firmware* das impressoras recebe do G-code as informações de quantidade de material a ser extrudado (E – em unidade de comprimento do filamento de alimentação) e velocidade de deslocamento (F – em mm/min), para cada segmento de linha a ser impresso. Quando apenas a velocidade de deslocamento (velocidade de impressão) é aumentada, o valor de E é mantido constante, e a impressora tem que extrudar o material mais rapidamente neste percurso (EXTRUDABLE.ME,

2013). Em outras palavras, isso implica que a rotação do motor de alimentação de material tem que ser constantemente ajustada de acordo com a velocidade de impressão. Porém, devido ao *delay* apresentado na extrusão, a variação da velocidade de impressão acaba gerando uma alteração na largura do filamento depositado (provocado pelo “esticamento” do filamento extrudado).

No trabalho de Tronvoll et al. (2019) é proposto o uso de “*pressure advance algorithms*” (algoritmos de avanço de pressão) para compensar o atraso do sistema de extrusão quando há uma variação da velocidade de impressão. Entretanto, neste estudo não será utilizado nenhum método similar, pois o *delay* existente será utilizado a favor das variações de largura do filamento depositado.

Procurando reduzir a formação de vazios no interior das peças, Jin et al. (2017) aplicaram uma otimização da trajetória de um preenchimento do tipo contorno juntamente com a variação da largura extrudada em regiões mais propensas à incidência desses vazios, como regiões com mudanças bruscas de direção de deslocamento do cabeçote extrusor. A variação da largura do filamento foi obtida através da variação do parâmetro de velocidade de deslocamento do bico extrusor, como apresentado na Figura 18. O resultado dessa otimização no preenchimento da peça é mostrado na Figura 19, onde observa-se a redução dos espaços sem preenchimento.

**Figura 18 – Relação entre a velocidade de deslocamento do cabeçote extrusor ( $F$ ) e a largura do filamento depositado ( $w$ )**

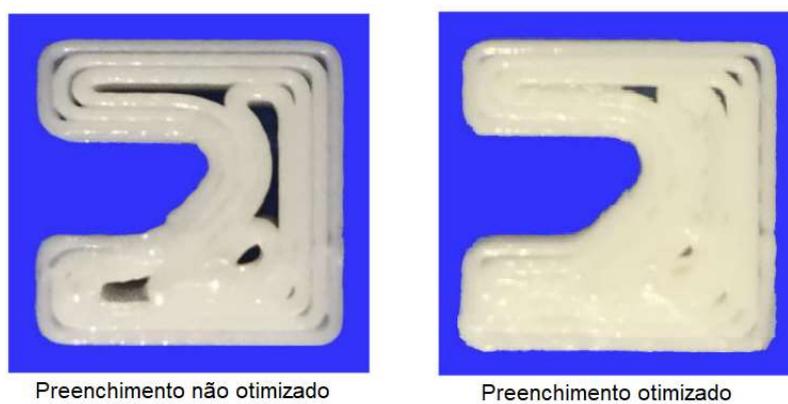


**Fonte: Adaptado de Jin et al. (2017)**

Já no trabalho de Wang et al. (2019), foi estudada a relação dos parâmetros de taxa de alimentação de material e velocidade de deslocamento

do cabeçote com a largura do filamento depositado. Foi concluído que a variação desses parâmetros era capaz de gerar uma largura de extrusão menor ou maior, mantendo todos os outros parâmetros constantes. Os autores também comentam que é mais adequado utilizar a variação da taxa de alimentação para este fim, uma vez que a alteração da velocidade de deslocamento gera frequentes acelerações/desacelerações nos motores do equipamento de AM, o que muitas vezes é indesejável.

**Figura 19 – Resultado da otimização do preenchimento com variação da largura extrudada**



**Fonte: Adaptado de Jin et al. (2017)**

Embora os estudos de Jin et al. (2017) e Wang et al. (2019) tenham analisado os efeitos da variação dos parâmetros de velocidade e extrusão na largura do filamento depositado, não houve um estudo sobre o *delay* ou tempo de resposta da máquina em relação à essas variações.

Assim como no estudo de Jin et al. (2017), Ding et al. (2016) e Xiong et al. (2019) utilizaram a variação da largura do filamento para obter um preenchimento com menor incidência de vazios. Entretanto, nesses estudos foi utilizada a tecnologia de *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), com um princípio que se assemelha ao processo de soldagem, e a largura do material depositado era controlada variando os parâmetros de taxa de alimentação de material e velocidade de deslocamento da tocha de soldagem.

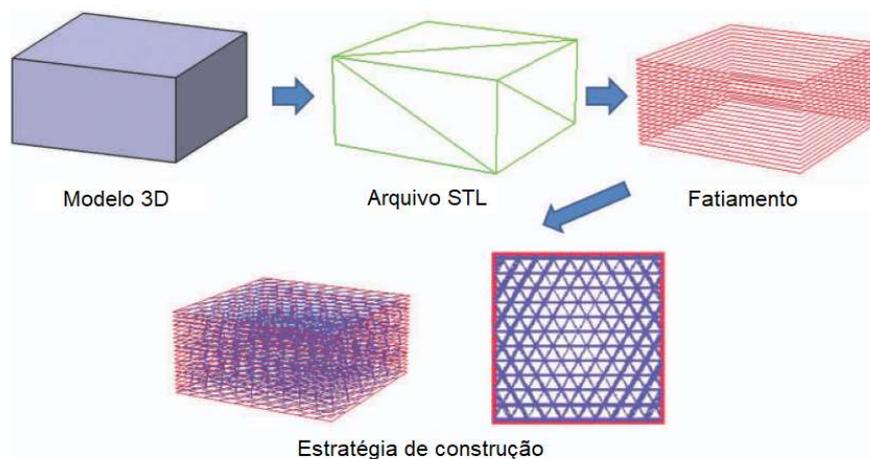
Os trabalhos recentes de Hornus et al. (2020) e Kuipers et al. (2020) procuraram propor melhorias para o método de Jin et al. (2017), obtendo-se

preenchimentos com menor incidências de vazios e, conseqüentemente, permitindo a fabricação de peças mais densas e resistentes.

## 2.5 OBTENÇÃO DE MEIOS POROSOS ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL

Dentre os princípios citados no Quadro 1, a AM por extrusão de material apresenta grande potencial para a fabricação de MP (CHIN ANG *et al.*, 2006; LEE, Jung Seob *et al.*, 2012; WANG, F. *et al.*, 2004). Como já foi comentado, ela é capaz de gerar a estrutura do tipo *lattice* sem a necessidade de modelar geometricamente a estrutura porosa, e sim utilizando estratégias de preenchimento e alterando os parâmetros de processo envolvidos. Dessa forma, se torna necessário apenas um modelo sólido 3D com a geometria externa do MP (conforme demonstrado na Figura 20).

**Figura 20 – Diagrama de geração de MP por AM utilizando estratégia de preenchimento**

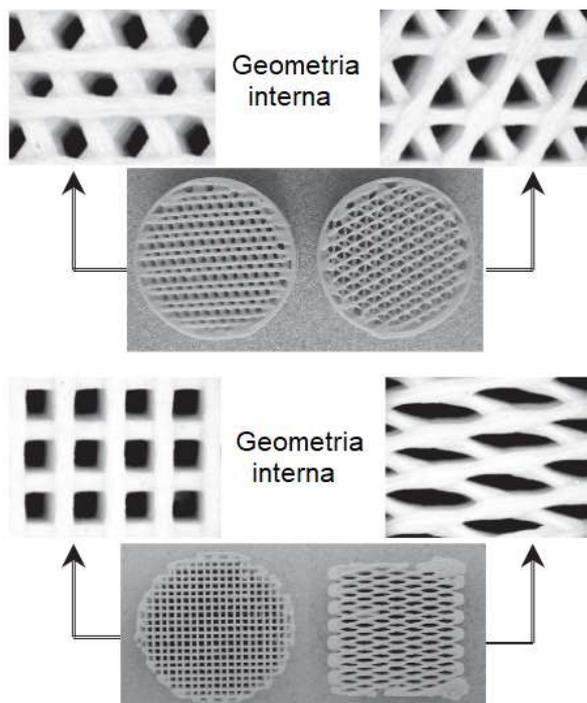


**Fonte: Adaptado de Lee et al. (2012)**

Too et al. (2001) desenvolveram um trabalho pioneiro na utilização da tecnologia de AM por extrusão de material para a fabricação de *scaffolds* com porosidade planejada. Variando o parâmetro *gap*, a largura dos filamentos e utilizando a rotação do preenchimento de 90° entre as camadas, os autores obtiveram estruturas *lattice* com diferentes valores de tamanho de poro, porosidade e resistência à compressão. A distância entre os filamentos (*gap*) foi definida como o fator com maior impacto nessas características.

Já os trabalhos de Kalita et al. (2003), Wang et al. (2004) e Zein et al. (2002) procuraram definir a relação da variação do ângulo de *raster* entre as camadas nas propriedades mecânicas das estruturas fabricadas. Alterando esse parâmetro, foi possível obter poros entre camadas com diferentes geometrias nas estruturas dos MP, como pode ser observado na Figura 21.

**Figura 21 – Geometrias de poros obtidas variando o valor do ângulo de *raster***



**Fonte: Adaptado de Kalita et al. (2003)**

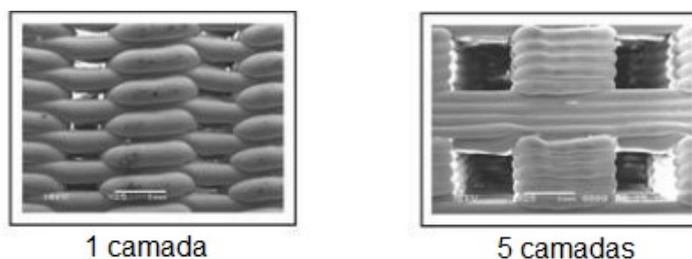
Nos resultados do estudo de Zein et al. (2002) foi possível observar uma correlação entre a porosidade com as propriedades mecânicas dos MP produzidos, sendo que a variação do ângulo de *raster* entre camadas apresentou menor impacto nessas características do que a variação do *gap* no preenchimento. Com o aumento do valor do *gap*, o material torna-se mais poroso, apresentando uma menor resistência mecânica.

No trabalho de Wang et al. (2004) foi utilizada a técnica de  $\mu$ CT para a caracterização de MP obtidos por extrusão de material. Analisando os resultados, foi verificado uma interconectividade de 98% dos poros, com tamanhos de poro variando de 200 a 300  $\mu$ m e foi demonstrado a capacidade de utilizar a  $\mu$ CT como ensaio não destrutivo (END) na caracterização dos MP. Ho e Hutmacher (2006) compararam a técnica de  $\mu$ CT com técnicas tradicionais,

como a microscopia eletrônica por varredura (MEV), na caracterização de *scaffolds*, sendo uma das principais vantagens apontadas da  $\mu$ CT a possibilidade de analisar a geometria dos poros e a seção transversal dos filamentos sem necessidade de alterar a integridade dos corpos de prova.

Chin Ang et al. (2006) também estudaram a porosidade e propriedades mecânicas de MP variando os parâmetros *gap*, ângulo de *raster* entre camadas e adicionando a estratégia de repetição de camadas (*build layer*), que permite empilhar uma quantidade de camadas com o mesmo ângulo de *raster* (Figura 22). Aplicando a repetição de camadas, os poros obtidos apresentaram dimensões maiores, mas ainda assim o *gap* demonstrou ser o parâmetro com maior impacto nas propriedades do MP. Moroni, de Wijin e van Blitterswijk (2006), em um trabalho similar, dobraram a quantidade de *build layers* e utilizaram ângulos de *raster* entre as camadas de 45° e 90°, mantendo fixo o valor de porosidade entre as amostras. O estudo apontou que o aumento da quantidade de camadas empilhadas e a redução da área de contato entre filamentos (devido à variação do ângulo de 45° para 90°) resultava em uma redução na resistência à compressão do MP.

**Figura 22 – Parâmetro “*build layer*”**



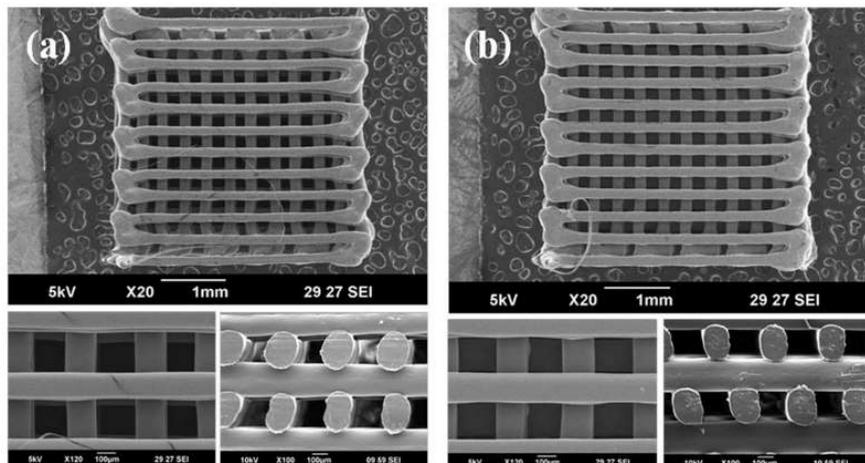
**Fonte: Adaptado de Moroni, de Wijin e van Blitterswijk (2006)**

No estudo de Lee et al. (2012) é proposta a utilização do parâmetro de desalinhamento lateral entre camadas (*stagger*) na obtenção de MP por extrusão de material. Essa estratégia consiste em adicionar um deslocamento entre as camadas que possuem o mesmo ângulo de *raster*, mas mantendo o mesmo *gap* definido inicialmente (Figura 23b). Os autores compararam a resistência à compressão de duas configurações com ângulo de *raster* de 90° entre camadas, sendo uma sem desalinhamento lateral e outra com, e uma configuração com ângulo de *raster* de 60° entre camadas. Foi demonstrado que a aplicação do

*stagger* causou um aumento na resistência do MP (de 6,05 Mpa para 7,43 Mpa), entretanto a variação do ângulo para 60° apresentou o maior valor de resistência (9,81 Mpa).

**Figura 23 – Imagens dos MP mostrando em detalhe a distribuição das linhas de *raster*:**

**(a) sem e (b) com desalinhamento lateral**



**Fonte: Adaptado de Lee et al. (2012)**

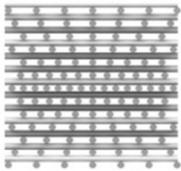
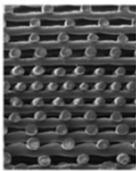
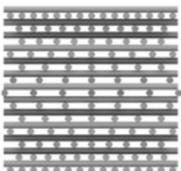
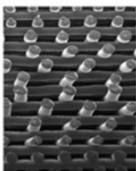
Uma outra possibilidade que pode ser aplicada à fabricação de MP é a utilização de um valor de *gap* que varia a cada camada, gerando uma estrutura com gradação na porosidade (FGM). Essa estratégia foi utilizada no estudo de Sobral et al. (2011) que gerou duas configurações com gradiente de *gap* (Grad 1 e 2 da Figura 24) procurando identificar a influência dessas variações na porosidade e resistência à compressão do material. Demonstrou-se que a utilização de um gradiente de distância entre filamentos (de 100 a 750  $\mu\text{m}$ ) resultava em valores de porosidade e resistência intermediários à configuração de *gap* constante de 100  $\mu\text{m}$  e a de 750  $\mu\text{m}$ . A inversão da gradação (entre Grad 1 e 2) não afetou significativamente os valores dessas propriedades.

É importante ressaltar que os trabalhos citados até o momento avaliaram apenas os impactos da variação dos parâmetros nas propriedades mecânicas dos MP, não abordando o tema de permeabilidade. Mesmo assim, eles contribuem com estratégias de formação de MP com diferentes configurações e controle da porosidade.

Woo Jung et al. (2013) procuraram analisar os impactos da espessura de camada e do desalinhamento lateral entre camadas na difusividade (que

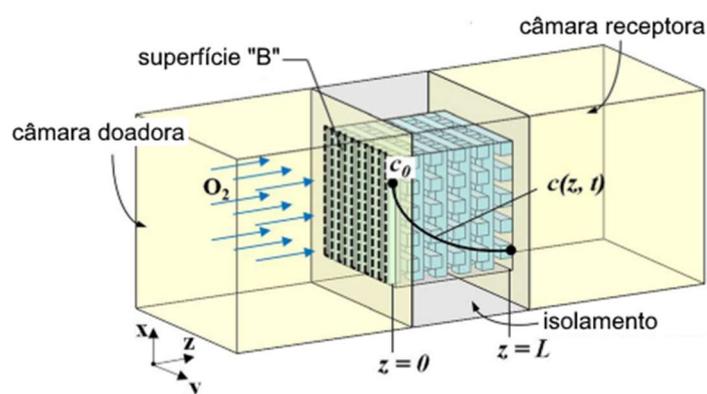
consiste na movimentação de partículas de um meio mais concentrado para um menos concentrado) de estruturas *lattice* obtidas por extrusão de material. Os valores de difusividade foram obtidos através de um método experimental que consiste na avaliação do tempo que o gás oxigênio atravessa de uma câmara doadora para uma câmara receptora, passando pelo interior do MP (Figura 25). Os autores também compararam os resultados experimentais com simulações numéricas. Foi observado que tanto a redução da espessura de camada como a utilização do desalinhamento entre camadas resultavam em uma diminuição na difusividade dos MP.

**Figura 24 – MP com gradiente de porosidade**

	Corte em seção 2D	Distância entre os filamentos ( <i>gap</i> )	Modelo CAD 3D	Corte em seção MEV
Grad 1		750 $\mu\text{m}$ ↓ 100 $\mu\text{m}$ ↓ 750 $\mu\text{m}$		
Grad 2		100 $\mu\text{m}$ ↓ 750 $\mu\text{m}$ ↓ 100 $\mu\text{m}$		

Fonte: Adaptado de Sobral et al. (2011)

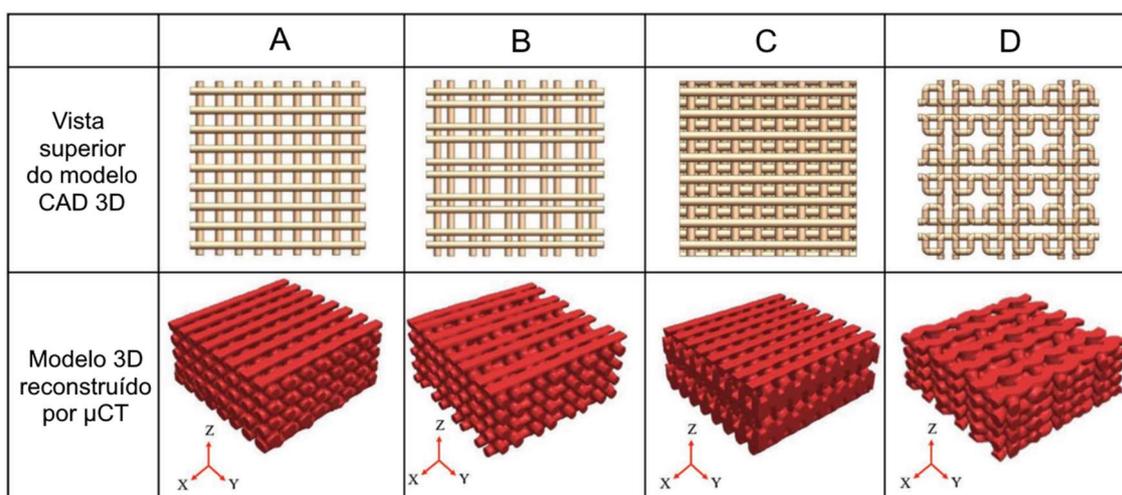
**Figura 25 – Diagrama esquemático de obtenção de difusividade de MP**



Fonte: Adaptado de Woo Jung et al. (2013)

No trabalho de Entezari et al. (2019) foram avaliados *scaffolds* cerâmicos obtidos por extrusão de material quanto à eficiência no cultivo de células ósseas, fixando o valor de porosidade e gerando quatro configurações de estruturas porosas, apresentadas na Figura 26. Nota-se que as configurações A, B e C foram geradas utilizando preenchimento *raster*, com ângulo entre as camadas de 90°, sendo a estrutura A com valor de *gap* constante e sem desalinhamento lateral (*stagger*), a B com dois valores de *gap* intercalados na camada, e a C com um *gap* constante e com desalinhamento lateral entre camadas. A configuração D foi gerada utilizando um preenchimento denominado “quadrifólio”, que se assemelha ao preenchimento colmeia, porém com uma distância entre os filamentos, não formando uma estrutura celular na camada.

**Figura 26 – Configurações de estrutura porosa de *scaffolds* cerâmicos: A – *gap* constante na camada; B – dois valores de *gap* na camada; C – desalinhamento (*stagger*) entre as camadas e D – preenchimento “quadrifólio”.**



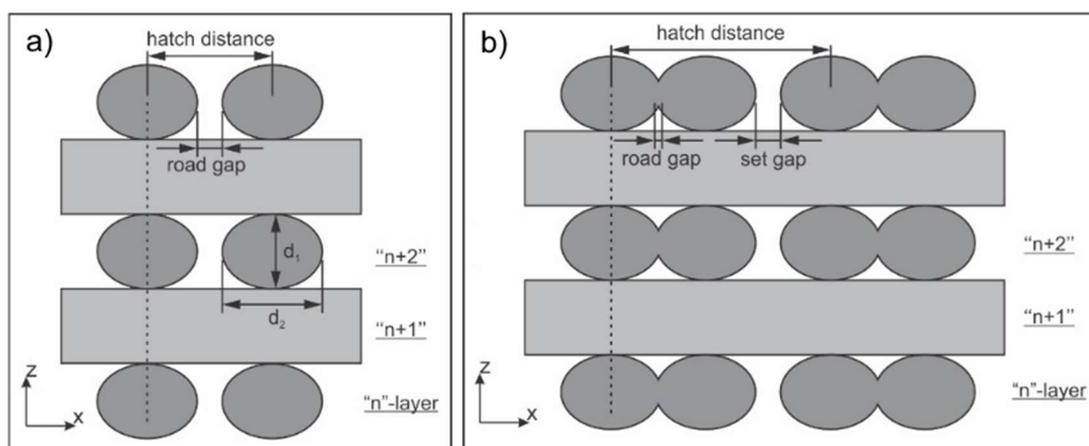
Fonte: Adaptado de Entezari et al. (2019)

Para cada uma das configurações fabricadas, foi obtido o valor de permeabilidade através de simulação numérica utilizando os modelos reconstruídos por  $\mu$ CT. Demonstrou-se que entre as estruturas A e B não houve uma variação significativa na permeabilidade, contudo o uso do desalinhamento lateral (estrutura C) reduziu o valor de permeabilidade em 57%, devido ao aumento da tortuosidade do MP. A estrutura do tipo D apresentou o maior valor de permeabilidade (aproximadamente o dobro da configuração A), devido ao seu elevado tamanho de poro.

No estudo de Walejewska et al. (2019) também foram comparados os valores de permeabilidades, obtidos por simulação numérica, de duas configurações de *scaffolds*, uma sem e outra com a aplicação do desalinhamento lateral, sendo ambas geradas utilizando preenchimento *raster* com ângulo de  $90^\circ$  entre as camadas. Observou-se que a estrutura com desalinhamento lateral apresentou permeabilidade 18,42% menor que a configuração sem a aplicação do desalinhamento.

Shigueoka et al. (2019), em seu estudo, analisaram os valores de permeabilidade obtidos experimentalmente em diferentes configurações de MP poliméricos fabricados por extrusão de material. Neste trabalho, foi introduzida uma nova estratégia para controle da estrutura dos MP: a possibilidade de agrupar filamentos no preenchimento (Figura 27). As estruturas porosas foram geradas por preenchimento *raster* com ângulo de  $90^\circ$  entre as camadas, variando a distância de desalinhamento lateral e aplicando ou não o agrupamento de dois filamentos. Os autores optaram por fixar porosidade dos MP em todas as configurações. Portanto, no caso da utilização de filamentos agrupados, o valor do *gap* foi significativamente aumentado para manter o valor de porosidade na amostra.

**Figura 27 – Representação da estratégia (a) sem e (b) com agrupamento de dois filamentos**



**Fonte: Adaptado de Shigueoka et al. (2019)**

Nos resultados, foi observado que ao agrupar dois filamentos sem a utilização de desalinhamento lateral resultou em um aumento da permeabilidade

de aproximadamente 160% (devido ao aumento do *gap*). Já quanto ao uso do desalinhamento, notou-se que quanto maior a distância de *stagger*, maior era a redução da permeabilidade do MP. Entretanto, esse efeito foi muito mais significativo na configuração com agrupamento de filamentos, chegando a uma redução de 76% quando aplicada a distância máxima de desalinhamento.

Em trabalho recente, Shigueoka e Volpato (2021) descrevem a possibilidade de controlar as estruturas de MP utilizando o preenchimento *raster* juntamente com os parâmetros avançados: variação do ângulo de *raster* entre camadas, agrupamento de filamentos, desalinhamento lateral entre camadas, repetição de camadas (*build layers*), variação do *gap* em uma camada de acordo com uma função e a combinação destas estratégias. Além de imagens de  $\mu$ CT das amostras fabricadas, o estudo realizou uma análise geométrica dos poros presentes nas diferentes configurações de estrutura porosa, demonstrando o potencial da tecnologia AM por extrusão de material na obtenção de MP de maneira planejada.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como foi mostrado no decorrer desse capítulo, diversos estudos foram realizados aplicando tecnologias de AM na fabricação de MP com o controle da porosidade e estrutura porosa. Os trabalhos que utilizam o princípio de extrusão de material apresentam como uma vantagem não necessitar modelar a estrutura porosa em ambiente CAD, pois a mesma pode ser gerada apenas variando os parâmetros de processo referentes ao preenchimento da peça.

Nota-se que a maioria dos trabalhos citados na seção 2.5 utilizam a estratégia de preenchimento *raster* na formação das estruturas porosas – sendo a única exceção o uso do preenchimento quadrifólio no estudo de Entezari et al. (2019). Uma das características do preenchimento *raster* nos MP é a baixa razão de aspecto apresentada pelos poros, devido à formação da estrutura *lattice*. Isto pode ser observado pois a geometria do poro na camada é formada pelo *gap* (referente à largura do poro) e pelo comprimento total da linha de *raster*. Com isso, os poros acabam apresentando uma elevada conectividade lateral na camada e entre camadas (geradas pelo ângulo de *raster* entre camadas). Além disso, o tamanho do *gap* (e conseqüentemente do poro) depende da resolução

e precisão de posicionamento do equipamento de AM utilizado (NYBERG; O'SULLIVAN; GRAYSON, 2019).

Não foram encontrados na literatura estudos do uso do preenchimento tipo colmeia para a geração de MP. Os trabalhos existentes que utilizam essa estratégia procuram apenas estudar os efeitos do preenchimento nas propriedades mecânicas do objeto, geralmente comparando com outros tipos de preenchimento.

Também foram apresentados os trabalhos de Hornus et al. (2020), Jin et al. (2017), Kuipers et al. (2020) e Wang et al. (2019), que utilizaram uma largura variável no filamento depositado durante o preenchimento, com o intuito de eliminar os vazios presentes nas peças obtidas por AM por extrusão de material. Todavia, ainda existem poucos estudos acerca da variação da largura do filamento extrudado nos processos de AM. Além disso, não foi encontrado nenhum trabalho sobre a utilização dessa estratégia para a formação de estruturas porosas. Identificou-se então, a oportunidade de pesquisa que consiste em desenvolver uma nova estratégia de deposição de material que utiliza a variação da largura em segmentos do filamento extrudado para a fabricação de estruturas porosas. Essa variação pode ser obtida através do controle dos parâmetros de quantidade de material extrudado e velocidade de impressão em pequenas divisões das linhas de preenchimento *raster*. Dessa maneira, é possível a obtenção de uma estrutura porosa única e inovadora, que apresenta poros com maior razão de aspecto e com pouca ou sem ramificação lateral na camada, resultando em um caminho de fluxo preferencial na direção normal às camadas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada com abordagem qualitativa-quantitativa e de caráter exploratório, utilizando procedimentos técnicos experimentais. Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos empregados para o desenvolvimento de uma estratégia de deposição de material com variação da largura do filamento para se obter meio poroso.

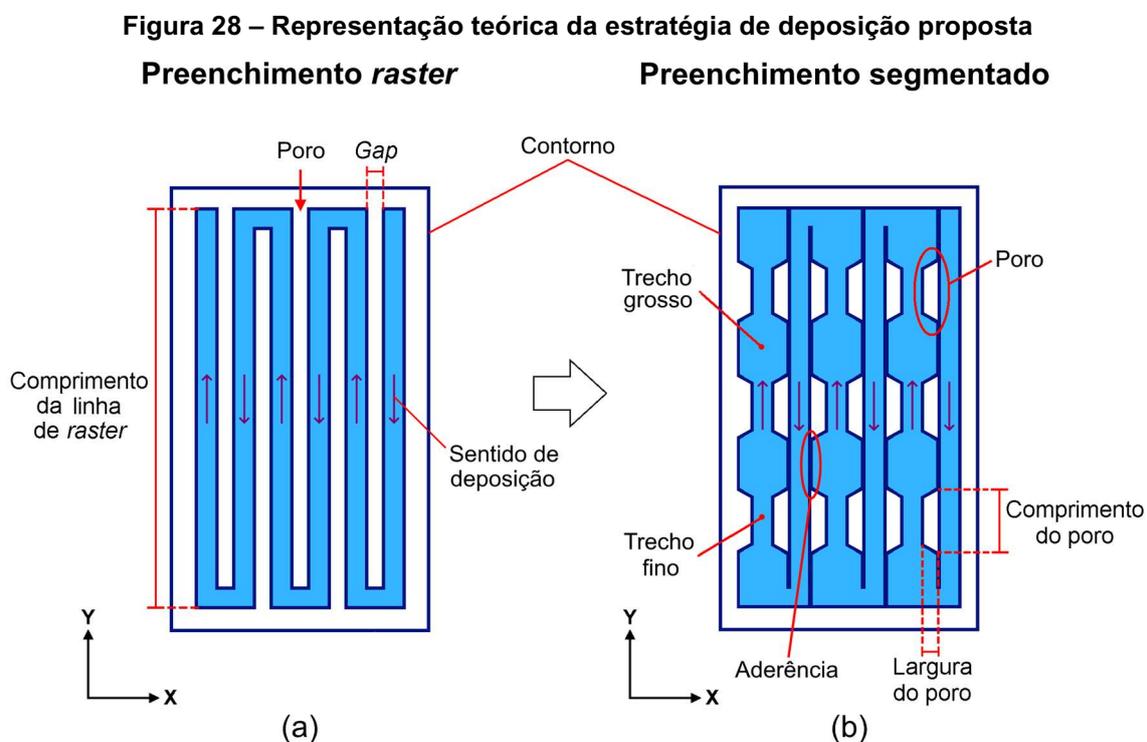
Para o desenvolvimento desta estratégia de deposição, torna-se necessário compreender a geometria da estrutura formada pelo método proposto, explorando os parâmetros de processo que deverão ser controlados e a resposta do equipamento sobre os mesmos. De início, é apresentado o conceito teórico da estrutura porosa idealizada e o algoritmo desenvolvido para a obtenção da mesma. Em seguida, são realizados testes preliminares para compreender os efeitos da variação de parâmetros durante a impressão, e, dessa maneira, elaborar o planejamento para a obtenção da estrutura porosa. Também são apresentados os ensaios de caracterização dos meios porosos (MP) fabricados. Por fim, um procedimento para a obtenção da estratégia proposta em diferentes equipamentos de AM é apresentado no Apêndice A.

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO PREENCHIMENTO SEGMENTADO

A estratégia de deposição proposta é denominada de preenchimento segmentado, e é aplicada, neste trabalho, ao preenchimento *raster* tradicional (Figura 28a). Ela consiste em intercalar, na mesma camada, linhas de preenchimento com largura constante (definidas como contínuas) com linhas de largura variável (segmentadas), como mostrado na Figura 28b. As linhas segmentadas são obtidas dividindo uma linha de preenchimento em trechos de maior e menor largura, denominados de trechos grossos e finos, respectivamente. Na região dos trechos finos ocorre a formação dos poros, enquanto nos trechos grossos ocorre a aderência com a linha contínua adjacente, delimitando lateralmente os poros formados na camada.

Na Figura 28b pode ser observado que a geometria esperada dos poros obtidos pelo preenchimento segmentado é alongada, mas com maior razão de

aspecto (largura do poro dividida pelo seu comprimento) quando comparada à estrutura *lattice* gerada pela estratégia *raster* tradicional (Figura 28a). Neste caso, os poros apresentam largura igual ao valor do *gap* entre filamentos e comprimento referente ao comprimento total de uma linha de *raster*.



A largura dos filamentos depositados será controlada pela variação dos parâmetros de velocidade de impressão e quantidade de material extrudado em segmentos da linha de *raster*. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo capaz de dividir (segmentar) as linhas de preenchimento em diferentes trechos, nos quais torna-se possível o controle desses parâmetros.

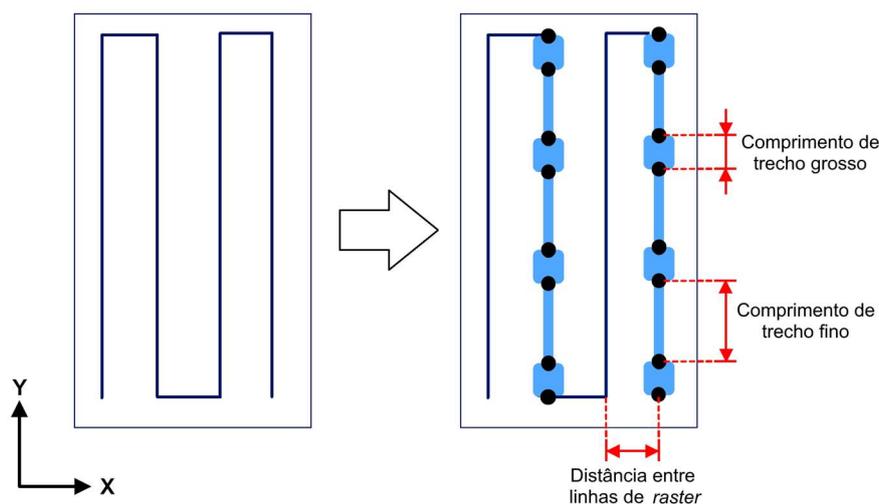
### 3.1.1 Algoritmo de preenchimento segmentado

O algoritmo foi implementado no software de planejamento de processo de manufatura aditiva (AM) denominado RP3 (*Rapid Prototyping Process Planning*), em desenvolvimento pelo NUFER - Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (VOLPATO, N.; FOGGIATTO, 2010).

O preenchimento segmentado diferencia-se da estratégia *raster* tradicional apenas pela presença das linhas de largura variável. Portanto, o preenchimento proposto é realizado utilizando uma trajetória *raster* previamente calculada, representada por uma série de pontos que indicam onde são iniciados e finalizados os movimentos lineares do bico extrusor durante a impressão.

A partir dessa trajetória calculada, o algoritmo recebe uma lista com pares de pontos que representam o início e fim de cada linha de preenchimento *raster*. O algoritmo então realiza a chamada da função que divide as linhas de preenchimento segmentado em uma série de pontos colineares, representando os inícios e fins dos trechos (finos e grossos). Essa divisão é realizada baseando-se no parâmetro de comprimento de cada trecho, informado pelo usuário. Na Figura 29 pode ser observada uma representação dessa segmentação.

**Figura 29 – Divisão das linhas de *raster* no preenchimento segmentado**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para evitar que haja formação de poros muito próximo aos contornos da peça, o algoritmo garante que os trechos inicial e final de cada linha segmentada sejam do tipo grosso.

O algoritmo retorna ao programa uma lista de pontos contendo as coordenadas em que se inicia cada trecho das linhas segmentadas. Além disso, cada ponto também armazena a informação do tipo do trecho (grosso ou fino) que será depositado. O programa então permite que o usuário defina os parâmetros de deposição do material desses trechos.

### 3.1.2 Parâmetros a serem controlados

O comprimento de trecho grosso (Figura 29), controla a distância entre cada poro na mesma linha de raster e, conseqüentemente, afeta a densidade de poros na camada. O comprimento de trecho fino está diretamente relacionado ao comprimento do poro obtido no preenchimento segmentado (como pode ser observado na Figura 28b).

Uma característica que pode ser observada no preenchimento segmentado é que, uma vez que a linha segmentada não possui uma largura constante, o espaçamento entre os filamentos depositados (*gap*) também não é constante. Deseja-se que na região dos trechos grossos o *gap* seja zero ou negativo para que haja aderência com a linha adjacente. Já na região dos trechos finos, o valor do *gap* deverá ser positivo (maior que zero) para que haja a formação do poro. Devido a isso, no lugar do *gap*, o parâmetro que deverá ser controlado é a distância entre centros das linhas de preenchimento *raster*, destacado na Figura 28. Juntos, esse parâmetro e a largura do trecho fino, definirão a largura dos poros obtidos (Figura 28b).

O algoritmo também permite controlar a quantidade de linhas contínuas posicionadas entre os filamentos segmentados. No caso de um preenchimento utilizando duas ou mais linhas contínuas, torna-se necessário definir dois parâmetros distintos de distância entre linhas de *raster*: uma entre as linhas segmentadas e contínuas e outra entre duas linhas contínuas adjacentes. O motivo desta separação é que os trechos grossos podem apresentar larguras diferentes dos filamentos contínuos. Neste trabalho serão utilizadas as notações S-C para distâncias entre linhas segmentadas (S) e contínuas (C) e C-C para distância entre duas linhas contínuas.

Por fim, para o controle da largura do filamento depositado, o programa RP3 permite definir os parâmetros de taxa de extrusão e velocidade de impressão. A Tabela 1 sumariza todos os parâmetros a serem controlados no preenchimento segmentado.

A taxa de extrusão será controlada no programa por um valor de porcentagem, sendo 100% a quantidade de material necessária para depositar um filamento de largura e altura de acordo com parâmetros previamente configurados. Por exemplo, em uma impressão com parâmetros de largura de

extrusão igual a 0,4 mm e altura de camada 0,3 mm, uma extrusão de 100% deve garantir que o filamento depositado possua estas dimensões. Uma redução desse parâmetro durante a deposição de um trecho irá diminuir a quantidade de material que extrudada pelo cabeçote, resultando em uma redução da largura do filamento. Contudo, espera-se que esse sistema apresente um atraso (*delay*), como já explicado na Seção 2.4.3.

**Tabela 1 – Parâmetros do preenchimento segmentado**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>
Comprimento de trecho grosso	mm
Comprimento de trecho fino	mm
Número de linhas contínuas entre as segmentadas	-
Distância entre as linhas <i>raster</i> S-C	mm
Distância entre as linhas <i>raster</i> C-C	mm
Extrusão no trecho grosso	%
Extrusão no trecho fino	%
Velocidade de impressão no trecho grosso	%(mm/s)
Velocidade de impressão no trecho fino	%(mm/s)

**Fonte: Autoria própria (2022)**

O parâmetro de velocidade de impressão dos trechos grossos e finos também será definido por um valor de porcentagem, sendo 100% o valor de velocidade definido no programa para a impressão dos contornos e das linhas de *raster* contínuas (chamada de velocidade de referência). Um aumento desse parâmetro durante a deposição de um trecho provocará um “esticamento” do filamento, reduzindo a sua largura. Isso ocorre devido ao *delay* presente no sistema de extrusão, como descrito na Seção 2.4.3.

Procurando investigar de que maneira os parâmetros deverão ser variados para se obter a estrutura porosa desejada, foram realizados os testes preliminares descritos na seção a seguir. Estes testes também permitirão confirmar se a variação da velocidade de impressão apresenta um tempo de resposta menor que a alteração da taxa de extrusão durante a impressão de um filamento, como foi constatado na revisão bibliográfica (Seção 2.4.3).

### 3.2 TESTES PRELIMINARES

A impressora 3D por extrusão de material utilizada neste estudo é do modelo Anet A8 (Anet Technology Co., Ltd.), com um bico extrusor de 0,4 mm de diâmetro. O material para impressão foi um filamento de poliácido láctico (PLA) preto, de diâmetro 1,75 mm, da marca 3D Lab (3D Lab Indústria Ltda.).

Procurando reduzir a quantidade de variáveis analisadas em cada teste, os G-codes das amostras foram gerados fixando alguns parâmetros de impressão recomendados para o PLA, apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Parâmetros fixos de impressão**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Altura da camada	0,3 mm
Largura de extrusão	0,4 mm
Temperatura de extrusão	200 °C
Temperatura da plataforma de construção	60 °C
Número de contornos (perímetros)	1
Ângulo de <i>raster</i> na camada	90°
Ângulo de <i>raster</i> entre camadas	0°
Velocidade de impressão (referência)	15 mm/s

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para este trabalho, o ângulo de *raster* entre camadas será de 0°, ou seja, não haverá rotação entre as camadas. Dessa maneira, todas as camadas da peça são idênticas e alinhadas. Entretanto, a proposta do preenchimento segmentado não se limita apenas à essa opção, sendo necessários mais estudos para a utilização da estratégia com rotação entre camadas.

Embora a velocidade de impressão de 15 mm/s seja considerada baixa para a impressão do PLA, a mesma foi escolhida para evitar problemas com os motores de passo do equipamento, pois estes variam frequentemente a sua velocidade de rotação durante a impressão das linhas segmentadas. Além disso, essa velocidade baixa permite uma melhor qualidade nas amostras impressas, tornando os resultados mais fáceis de serem observados e analisados.

Para melhorar a adesão das amostras na plataforma de construção, foi utilizado uma fita azul para mascaramentos especiais, da marca 3M – técnica bastante comum de ser aplicada nas impressoras de extrusão não-industriais.

As amostras impressas foram observadas em um microscópio óptico digital USB, com aproximação de 500 a 1600x. Através do programa próprio do microscópio (HiView 1.4 - Microscope, 2019) foram realizadas medições das dimensões dos filamentos extrudados (principalmente largura e comprimento dos trechos). Esse equipamento possui uma resolução de medição de 0,01 mm.

### 3.2.1 Calibração da extrusão, altura do bico e nivelamento da plataforma

Anterior à impressão das amostras, foi realizada uma etapa de calibragem da extrusão do equipamento, procurando garantir que o filamento depositado apresente precisão dimensional de acordo com os parâmetros selecionados. Essa calibração consiste em definir o valor do parâmetro “*flow*” da impressora (em porcentagem), responsável por controlar a quantidade de material que é extrudado.

Para isso, um procedimento comumente aplicado em impressoras 3D por extrusão de material foi executado. Este consiste em imprimir um paralelepípedo com as dimensões de 20 x 20 x 10 mm sem preenchimento, apenas contendo 2 contornos (ou perímetros) adjacentes e medir a espessura do filamento. A espessura das paredes da amostra foi medida utilizando um paquímetro digital com resolução 0,01 mm. Como a largura de extrusão está definida para 0,4 mm, cada parede da amostra deve apresentar uma espessura de 0,8 mm (dois filamentos adjacentes). Caso a média das medições apresente valor diferente de 0,8 mm, o parâmetro *flow* deve ser ajustado e o processo repetido até ser definida uma porcentagem que garanta a largura nos filamentos depositados de  $0,4 \pm 0,01$  mm (levando em consideração a resolução de equipamento).

Com a extrusão calibrada, torna-se necessário o nivelamento da plataforma de construção da impressora. Nesta etapa se define também a distância entre o bico e a plataforma (altura do bico). Isso significa que o bico extrusor não deverá estar posicionado nem muito próximo e nem muito afastado da plataforma, o que poderia alterar as dimensões dos filamentos depositados, especialmente na primeira camada. Na impressão 3D por extrusão de material, é bastante comum a prática de achatar a primeira camada para melhorar a adesão da peça na plataforma. Porém, no preenchimento segmentado esse achatamento deve ser mais brando, pois o mesmo poderia aumentar muito a

largura dos trechos, fechando os poros na primeira camada. Como já é de conhecimento geral na área de AM por extrusão, a primeira camada costuma apresentar diferenças geométricas em relação as subsequentes. Isso porque ela é a única que é depositada sobre a plataforma de construção, enquanto as outras são impressas sobre uma camada já depositada. Por esse motivo, o nivelamento da plataforma e a definição da altura do bico tornam-se bastante importantes neste trabalho, uma vez que diversas medições a serem realizadas durante os testes preliminares ocorrerão em impressões de uma única camada. Portanto, a altura do bico deve garantir que os filamentos depositados na camada possuam a mesma largura definida no planejamento de processo (através do parâmetro largura de extrusão), e o nivelamento da plataforma deve garantir que a altura do bico permaneça o mesmo em diferentes regiões da peça.

Com esse objetivo, foi fabricada uma amostra de uma camada (dimensões 100 x 100 mm) contendo apenas filamentos contínuos (preenchimento *raster* tradicional), distanciados de 5 mm entre si, posicionada no centro da plataforma de construção. Após impressa, a amostra foi observada no microscópio, onde foram realizadas medições da largura do filamento depositado em diferentes regiões da peça. Como o valor ideal do parâmetro *flow* já foi definido (na etapa de calibração), os filamentos devem apresentar largura bastante próxima à 0,4 mm. As medições de largura são comparadas com esse valor, e, caso necessário, a plataforma é ajustada novamente e o processo repetido, até que os filamentos apresentem a largura de  $0,4 \pm 0,01$  mm em todas as regiões observadas.

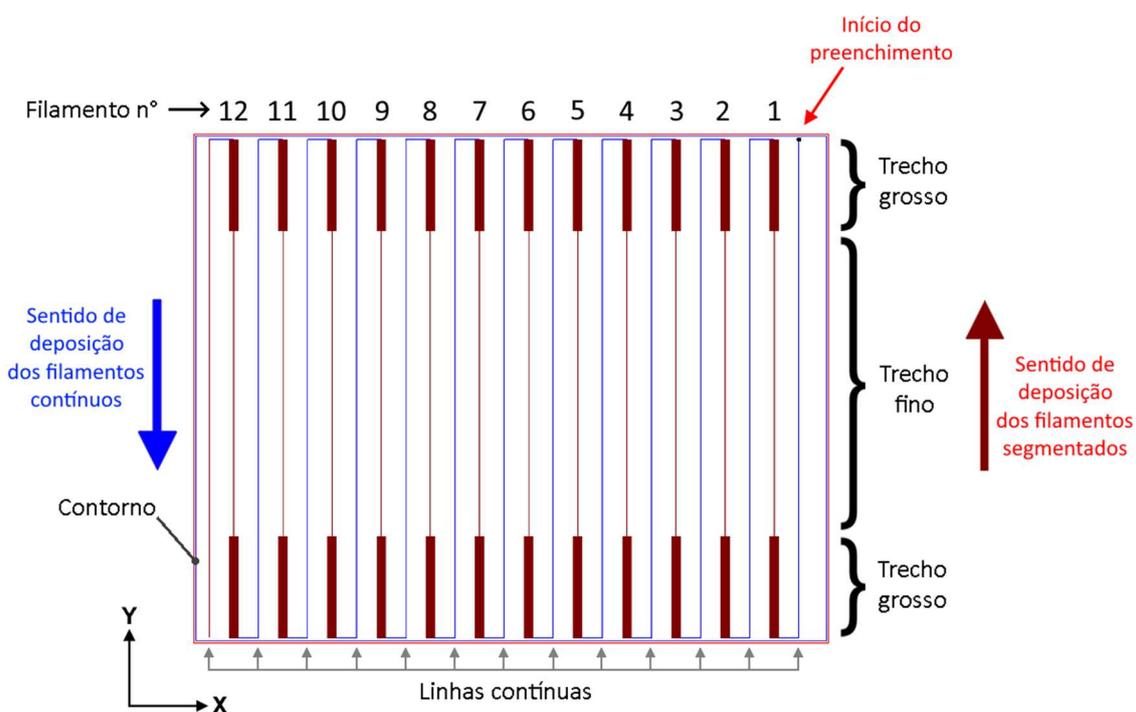
Com a extrusão do equipamento já calibrada e a plataforma de construção nivelada, os primeiros testes realizados procuram compreender como a máquina responde à variação dos parâmetros de deposição em uma linha de preenchimento *raster*, observando o resultado nas dimensões do filamento depositado. Foram feitos dois testes separados: um para a variação da velocidade de impressão e outro para a variação da extrusão.

### 3.2.2 Teste de variação da velocidade de impressão

Para o primeiro teste, um arquivo STL (*STereoLithography*) de um paralelepípedo com as dimensões de 62 x 50 x 0,3 mm foi processado no RP3

para a geração do G-code da peça. Foi realizada a impressão de apenas uma camada, utilizando o preenchimento segmentado com uma linha contínua entre as segmentadas e com distância entre as linhas de *raster* S-C de 2 mm, gerando um total de 12 filamentos segmentados na camada, como mostrado na Figura 30. Nesta configuração, as linhas contínuas foram inseridas para garantir que o sentido de deposição das linhas segmentadas seja sempre o mesmo e a distância de 2 mm foi selecionada para facilitar a visualização dos filamentos e a sua medição no microscópio. Cada um dos filamentos segmentados foi dividido da seguinte maneira: 10 mm de trecho grosso inicial, 30 mm de trecho fino e mais 10 mm de trecho grosso final.

**Figura 30 – Representação da camada no teste de variação da velocidade de impressão**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os trechos grossos foram configurados com velocidade de impressão de 15 mm/s e extrusão de 100%, ou seja, foram mantidos com a mesma configuração que as linhas contínuas. Como nesse teste procurou-se analisar apenas a variação da velocidade de impressão, a extrusão foi mantida constante em todos os trechos, portanto a extrusão dos trechos finos é de 100%. Já a velocidade dos trechos finos, foi definida variando-se de 18,75 (125%) a 60 mm/s

(400%) de acordo com a Tabela 3. O número dos filamentos se refere aos indicados na Figura 30.

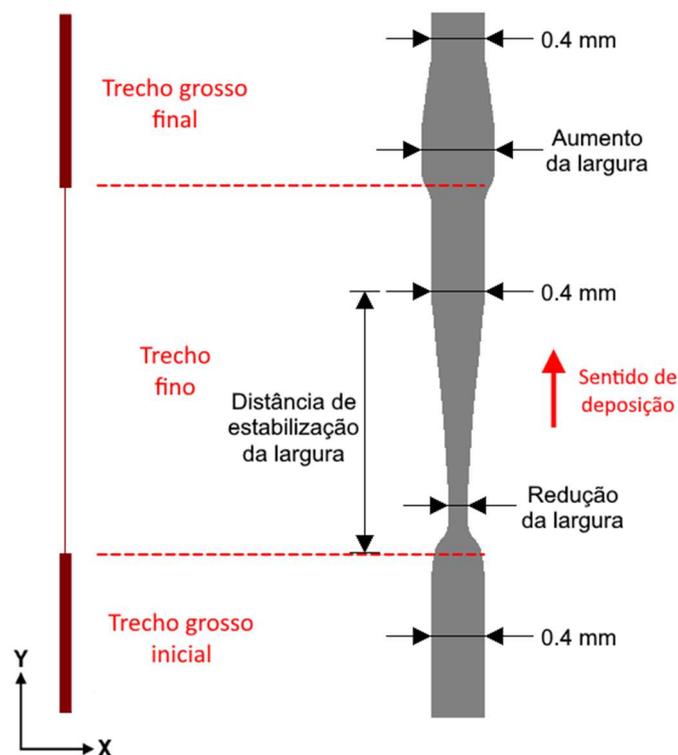
**Tabela 3 – Velocidades de trecho fino aplicadas em cada filamento**

Número do filamento	Velocidade de trecho fino	
	[mm/s]	[%]
1	18,75	125
2	22,5	150
3	26,25	175
4	30	200
5	33,75	225
6	37,5	250
7	41,25	275
8	45	300
9	48,75	325
10	52,5	350
11	56,25	375
12	60	400

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Espera-se que com essa configuração de parâmetros ocorra uma redução rápida de largura no início dos trechos finos, sendo que esse deve ir aumentando de acordo com a resposta do sistema de aquecimento. Também é esperado um aumento da largura no início do trecho grosso seguinte, uma vez que a velocidade de impressão retornará ao valor de 15 mm/s, ocorrendo o atraso entre o motor de alimentação e o sistema de aquecimento do material. A Figura 31 mostra em detalhe o comportamento esperado do filamento segmentado e as dimensões que serão medidas. Para se avaliar a redução de largura obtida no filamento, a medição foi realizada na largura mínima do trecho fino, enquanto a medição da largura máxima do trecho grosso possibilitou a análise do aumento de largura. Também foi medida a distância de estabilização da largura do filamento no trecho fino, sendo o seu início no começo do trecho fino e o seu fim no ponto em que a largura do filamento atinge o valor definido (0,4 mm). Os pontos em que ocorrem as variações de largura foram observados e confrontados com os valores teóricos de início e fim dos trechos no G-code.

**Figura 31 – Geometria esperada do filamento segmentado e dimensões a serem medidas no teste de variação da velocidade impressão**



Fonte: Autoria própria (2022)

Procurando garantir a repetibilidade dos resultados, foi realizada a impressão de três amostras com essa configuração. Os filamentos segmentados de cada amostra foram analisados em microscópio, realizando as medições de largura e distância já descritas. A partir da média dos valores de largura foram calculados valores de porcentagem que representam a redução e aumento da largura para cada valor de velocidade utilizado.

### 3.2.3 Teste de variação da taxa de extrusão

Para este teste foi utilizado o arquivo STL de um paralelepípedo com dimensões 48 x 50 x 0,3 mm, também aplicando o preenchimento segmentado com uma linha contínua entre as segmentadas e distância de 2 mm entre as linhas de *raster*. A configuração da camada é similar à apresentada na Figura 30, com a única diferença de possuir 9 filamentos segmentados ao invés de 12. Neste teste, a velocidade de impressão permaneceu constante, em 15 mm/s

(100%), por todo o preenchimento, e a extrusão variou apenas nos trechos finos, como apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4 – Taxa de extrusão no trecho fino aplicada em cada filamento**

Número do filamento	Taxa de extrusão no trecho fino [%]
1	90
2	80
3	70
4	60
5	50
6	40
7	30
8	20
9	10

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Diferente da variação da velocidade, espera-se que a redução de largura causada pela variação da extrusão ocorra de forma mais lenta devido ao *delay* presente nesse sistema. Além disso, acredita-se que não ocorrerá um aumento da largura no trecho grosso final. Logo, o filamento segmentado impresso neste teste pode apresentar uma geometria diferente da mostrada na Figura 31. Porém, da mesma forma, foram realizadas as medições da largura mínima no trecho fino e da sua distância de estabilização da largura. Também foi observado se os pontos de variação da largura coincidem com os comprimentos dos trechos definidos no G-code.

Assim como no teste de variação de velocidade, na extrusão também foram impressas três amostras, que tiveram os seus filamentos segmentados medidos. A partir das médias dos valores de largura foram calculadas as porcentagens de redução da largura obtidas para cada valor de extrusão aplicado.

As variações de velocidade e taxa de extrusão foram comparadas, e com base nos resultados obtidos foi definido o parâmetro a ser controlado para obter-se as diferentes larguras nos filamentos do preenchimento segmentado.

### 3.2.4 Obtenção de filamentos segmentados repetidos

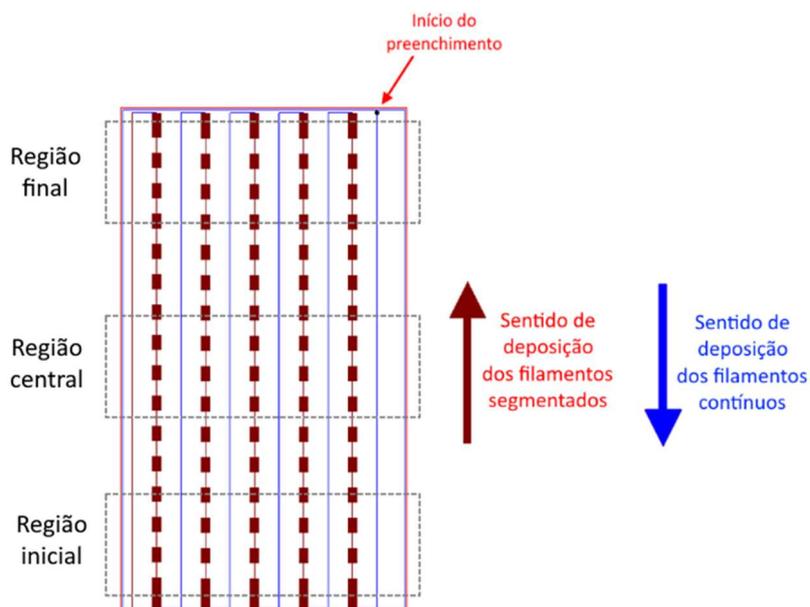
Este teste visou a obtenção de várias linhas de preenchimento segmentado, também isolados (sem contato com os filamentos adjacentes), mas com uma maior quantidade de trechos finos e grossos e com repetição desses trechos. O objetivo principal foi observar se a estrutura porosa obtida apresentaria uma geometria uniforme e estável, ou seja, se todos os trechos do mesmo tipo (finos ou grossos) apresentariam a mesma largura em todas as regiões da peça. Isso garantiria que a estrutura porosa final obtida com o preenchimento segmentado possuía poros com dimensões uniformes em toda a peça.

Com base nos resultados dos testes anteriores, decidiu-se que o controle do parâmetro de velocidade de impressão seria utilizado para gerar os trechos com diferentes larguras no filamento depositado (os trechos finos serão impressos com uma velocidade maior que os grossos). Além disso, o parâmetro de taxa de extrusão pode ser combinado à variação da velocidade para se obter larguras menores ou maiores nos trechos. A variação desse parâmetro ocorre em todo o comprimento das linhas segmentadas (incluindo trechos finos e grossos). Portanto, a variação da taxa de extrusão ocorre entre o filamento contínuo e o segmentado, e não entre os trechos.

Para tanto, nessa etapa foram fabricadas três amostras com filamentos segmentados de diferentes larguras. Cada amostra é denominada de Axx, sendo xx referente ao valor de extrusão utilizado nas linhas segmentadas, dentre os valores de 75%, 100% e 125%. Para isso, um paralelepípedo com dimensões 50 x 28 x 0,3 mm foi processado no RP3, e os G-codes foram gerados utilizando o preenchimento segmentado, com trechos grossos e finos de comprimento 1,5 mm e distância entre as linhas de *raster* de 2 mm. A Figura 32 apresenta a representação da trajetória deste teste, onde se destacam o ponto de início da deposição e o sentido de deposição de cada tipo de filamento (segmentado e contínuo). Esse sentido é importante quando da análise dos resultados. Novamente foi realizada a impressão de uma única camada com uma linha contínua entre as segmentadas. A velocidade dos trechos finos foi fixada em 30 mm/s (200%) e os trechos grossos foram depositados com uma velocidade de

15 mm/s (100%), em um primeiro momento. A Tabela 5 sumariza os parâmetros aplicados às três amostras desse teste.

**Figura 32 – Representação da camada no teste de obtenção de filamentos segmentados repetidos**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 5 – Parâmetros das amostras do teste de obtenção de filamentos segmentados repetidos**

Amostra	Taxa de extrusão na linha segmentada [%]	Tamanho dos trechos (grossos e finos) [mm]	Velocidade de trecho fino [mm/s] (%)	Velocidade de trecho grosso [mm/s] (%)	Distância entre as linhas de raster [mm]
A75	75	1,5	30 (200)	15 (100)	2
A100	100	1,5	30 (200)	15 (100)	2
A125	125	1,5	30 (200)	15 (100)	2

Fonte: Autoria própria (2022)

Após impressas, em cada amostra foram medidas as larguras dos trechos finos, grossos e das linhas contínuas em três regiões diferentes da peça indicadas na Figura 32. A denominação das regiões (inicial, central e final) foi feita de acordo com o sentido de deposição das linhas segmentadas. Para cada tipo de trecho (fino, grosso e contínuo) foi feita a medição de largura em cinco pontos por região, para a obtenção de um valor médio. Com os valores médios de largura em diferentes regiões, foi calculado o desvio máximo de largura

apresentado por cada amostra. Esse desvio é determinado pela maior diferença de largura entre duas regiões da peça. Um alto valor de desvio significa que a largura dos trechos está variando pela peça, enquanto um desvio baixo demonstra que a amostra apresentou uma estrutura mais uniforme e estável.

A análise das medidas obtidas (ver Capítulo 4), mostrou que as amostras A100 e A125 apresentaram variação significativa da largura entre as regiões. De forma experimental observou-se que a redução do parâmetro de velocidade de trecho grosso tinha um efeito de diminuir ou até corrigir esse problema. Portanto, essas duas amostras foram reimpressas utilizando uma velocidade de trecho fino de 11,25 mm/s (75%). Uma nova medição mostrou que essa redução foi suficiente para a amostra A100, porém a amostra A125 ainda apresentou um alto desvio entre as regiões. Logo, esta última sofreu mais um ajuste, sendo reimpressa com velocidade de trecho fino de 7,5 mm/s (50%), resultando em uma variação aceitável da largura entre as regiões. Dessa maneira, foi definido que, para cada valor de extrusão utilizado, há uma velocidade de trecho grosso que garante a formação de trechos com largura uniforme, apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6 – Parâmetros ajustados das amostras do teste de obtenção de filamentos segmentados repetidos**

<b>Amostra</b>	<b>Extrusão na linha segmentada [%]</b>	<b>Velocidade de trecho grosso [mm/s] (%)</b>
A75	75	15 (100)
A100	100	11,25 (75)
A125	125	7,5 (59)

**Fonte: Autoria própria (2022)**

As medições de larguras dos trechos obtidas nas amostras ajustadas também foram utilizadas para prever qual a distância ideal entre as linhas de preenchimento que garanta a formação dos poros na estrutura porosa, como é detalhado na seção seguinte.

### 3.2.5 Formação dos poros em uma camada por deposição segmentada

Com os parâmetros de velocidade e extrusão ajustados no preenchimento segmentado com filamento isolado, tornou-se possível a geração de uma estrutura porosa aproximando as linhas de *raster*, de maneira que os trechos grossos apresentem agora adesão com a linha contínua e na região dos trechos finos ocorra a formação dos poros (de acordo com o modelo teórico estabelecido na Figura 28b). Portanto, o objetivo deste teste foi visualizar a formação dos poros e da estrutura porosa obtida através do preenchimento segmentado em uma camada.

Para isso, foram impressas três amostras com apenas uma camada de preenchimento segmentado utilizando o mesmo arquivo STL do teste anterior. Seguindo os resultados do teste anterior, cada uma das amostras foi fabricada com um valor de extrusão aplicado à linha segmentada. Estas amostras são denominadas de Bxx, sendo xx referente ao valor de extrusão utilizado, em porcentagem. Ambos os trechos foram feitos com 1,5 mm de comprimento, a velocidade de trecho fino foi fixada em 200% e a velocidade de trecho grosso variou para cada valor de extrusão, de acordo com os resultados do teste de obtenção do filamento segmentado isolado. Além disso, a partir das medições de largura do filamento realizadas no teste anterior, foram calculados valores de distância entre linhas de *raster* S-C que resultem em um *gap* nulo entre os trechos grossos e as linhas contínuas. Os valores dos parâmetros de cada uma das configurações são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Parâmetros das amostras do teste de formação dos poros em uma camada**

Amostra	Extrusão na linha segmentada [%]	Tamanho dos trechos (grossos e finos) [mm]	Velocidade de trecho fino [mm/s] (%)	Velocidade de trecho grosso [mm/s] (%)	Distância entre as linhas de <i>raster</i> S-C [mm]
B75	75	1,5	30 (200)	15 (100)	0,40
B100	100	1,5	30 (200)	11,25 (75)	0,43
B125	125	1,5	30 (200)	7,5 (50)	0,49

Fonte: Autoria própria (2022)

Cada uma das amostras impressas foi observada no microscópio, procurando evidenciar a formação dos poros na camada e comparando a geometria obtida com a apresentada na Figura 28b.

Esse teste também possibilitou a medição das larguras e comprimentos dos poros gerados em uma camada. Com esses valores, é possível ter uma noção do tamanho dos poros obtidos pela estratégia proposta. Em cada amostra foram realizadas medições dessas dimensões em 10 poros em diferentes regiões da camada, para o cálculo de um valor médio e desvio. Nesse momento, também foi calculada a razão de aspecto apresentada por cada configuração, dividindo o valor médio das larguras pelo dos comprimentos.

### 3.2.6 Obtenção da estrutura porosa tridimensional

Como comentado anteriormente, a primeira camada da peça impressa pode apresentar alterações dimensionais em relação as demais. Uma vez que os testes realizados anteriormente garantem a formação da estrutura porosa em apenas uma camada, tornou-se necessário um teste que aplique a estratégia de deposição proposta com um maior número de camadas, garantindo que seja possível a obtenção de MP tridimensionais.

Foram impressas as mesmas configurações utilizadas no teste anterior, apresentadas na Tabela 7. Para cada configuração foram fabricadas duas amostras: uma com 5 e outra com 10 camadas, escolhidas para observar se haveria alteração perceptível na estrutura impressa com o aumento de camadas. Lembrando que todas as camadas possuem o mesmo valor de ângulo de *raster*, ou seja, não há rotação entre camadas. As amostras foram então observadas no microscópio, procurando analisar se a estrutura porosa permanece com uma geometria constante ao longo das camadas.

## 3.3 FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS POROSOS

Com os resultados dos testes preliminares tornou-se possível definir as configurações dos parâmetros necessários para a geração da estrutura porosa proposta. A partir disso, MP impressos utilizando o preenchimento segmentado foram caracterizados quanto à sua porosidade, permeabilidade e geometria da

estrutura interna. Foram utilizadas configurações com diferentes parâmetros, procurando definir a influência da variação do preenchimento nas características do MP.

Apesar dos experimentos preliminares terem analisados o emprego de uma única linha contínua entre as segmentadas, seguindo a proposta de Shigueoka (2019), quando se deseja reduzir a porosidade do MP, mais de um filamento contínuo pode ser empregado.

Os parâmetros selecionados para estudar variações de MP foram: comprimento do trecho fino, extrusão na linha segmentada e número de linhas contínuas entre as segmentadas. Para facilitar a identificação das amostras, cada configuração recebeu uma nomenclatura do tipo FxxEyyCzz, sendo Fxx referente ao comprimento de trecho fino (em mm), Eyy à extrusão aplicada na linha segmentada e Czz à número de linhas contínuas entre as segmentadas. A Tabela 8 apresenta as configurações escolhidas para fabricação das amostras e os parâmetros do preenchimento aplicados.

**Tabela 8 – Configurações dos MP fabricados**

Configuração	Comprimento de trecho fino [mm]	Extrusão na linha segmentada [%]	Velocidade de trecho grosso [mm/s] (%)	Linhas contínuas entre segmentadas	Distância entre as linhas de raster S-C [mm]	Distância entre as linhas de raster C-C [mm]
F1,5E100C1	1,5	100	11,25 (75)	1	0,43	-
F2E100C1	2	100	11,25 (75)	1	0,44	-
F1,5E75C1	1,5	75	15 (100)	1	0,40	-
F1,5E125C1	1,5	125	7,5 (50)	1	0,49	-
F1,5E100C2	1,5	100	11,25 (75)	2	0,43	0,40
F1,5E100C3	1,5	100	11,25 (75)	3	0,43	0,40

**Fonte: Autoria própria (2022)**

O parâmetro de comprimento de trecho grosso foi fixado em 1,5 mm. Embora esse parâmetro possa ser variado para se obter diferentes densidades de poros na camada, esta opção não foi explorada neste trabalho pois o foco principal foi observar a formação dos poros através do método proposto. Entretanto, uma variação da densidade de poros pode ser observada nas configurações com mais de uma linha contínua (F1,5E100C2 e F1,5E100C3).

A distância entre as linhas de raster S-C foi obtida para as configurações F1,5E100C1, F1,5E75C1, F1,5E125C1, F1,5E100C2 e F1,5E100C3 nos

resultados dos testes preliminares. Para as configurações F1,5E100C2 e F1,5E100C3 também foi necessário determinar o valor da distância entre duas linhas contínuas adjacentes (C-C), através das medições de largura dos filamentos contínuos realizadas nos testes preliminares. Para a configuração F2E100C1, foi necessária realização da etapa de obtenção de filamentos segmentados repetidos, possibilitando a medição da largura dos trechos para o cálculo do valor adequado de distância entre linhas de preenchimento.

### 3.3.1 Caracterização geométrica por microtomografia computadorizada

Procurando realizar uma análise dimensional e geométrica das estruturas porosas obtidas pelo preenchimento proposto, foram realizadas análises de microtomografia utilizando um tomógrafo por raios-X do modelo Skyscan 1172, com as suas especificações descritas no Quadro 2. A análise de  $\mu$ CT foi realizada pelo Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da UFPR.

**Quadro 2 – Especificações técnicas do microtomógrafo**

<b>Modelo:</b>	Skyscan 1172
<b>Fabricante:</b>	Bruker
<b>Volume de medição:</b>	(50 x 50 x 50) mm <sup>3</sup>
<b>Potência máxima:</b>	100 kV

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para otimizar esse recurso, as seis configurações propostas na Tabela 8 foram divididas em duas amostras (cada uma com três configurações). A Amostra I apresenta as configurações F1,5E100C1, F2E100C1 e F1,5E75C1, enquanto a Amostra II possui as configurações F1,5E125C1, F1,5E100C2 e F1,5E100C3. Seguindo as recomendações do técnico responsável pelos ensaios no LAMIR, ambas amostras foram fabricadas em formato cilíndrico, com 15 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento. Cada configuração testada apresenta 9 camadas, sem rotação do ângulo de *raster* entre camadas. Entre as configurações foi adicionada uma única camada densa (sem *gap* entre os filamentos), utilizando a estratégia *raster* tradicional e com ângulo de 90° em

relação às camadas com preenchimento segmentado. Esta camada foi incluída para facilitar a separação e distinção das configurações durante a visualização do resultado das microtomografias.

As amostras tiveram suas geometrias reconstruídas digitalmente no equipamento de  $\mu$ CT, gerando modelos geométricos 3D que foram visualizados no software CTvox versão 3.3.1 (Bruker microCT, 2021), no qual as estruturas porosas internas foram analisadas.

### 3.3.2 Ensaio de porosidade e permeabilidade

Além das configurações obtidas utilizando o preenchimento segmentado (Tabela 8), foi fabricada uma amostra de MP com a estratégia *raster* tradicional, para que houvesse comparação entre as propriedades obtidas com e sem o preenchimento proposto. Essa configuração, denominada Raster, apresenta apenas filamentos de largura constante (0,4 mm) e ângulo de *raster* entre as camadas de 90°. O valor do *gap* é de 0,12 mm, definido de maneira que os poros obtidos possuam a mesma largura que os poros formados na configuração F1,5E100C1. Esse valor foi obtido durante os testes preliminares, na etapa de formação dos poros em uma camada, através da medição da largura dos poros da amostra B100 (resultados apresentados na Tabela 16 da Seção 4.1.5).

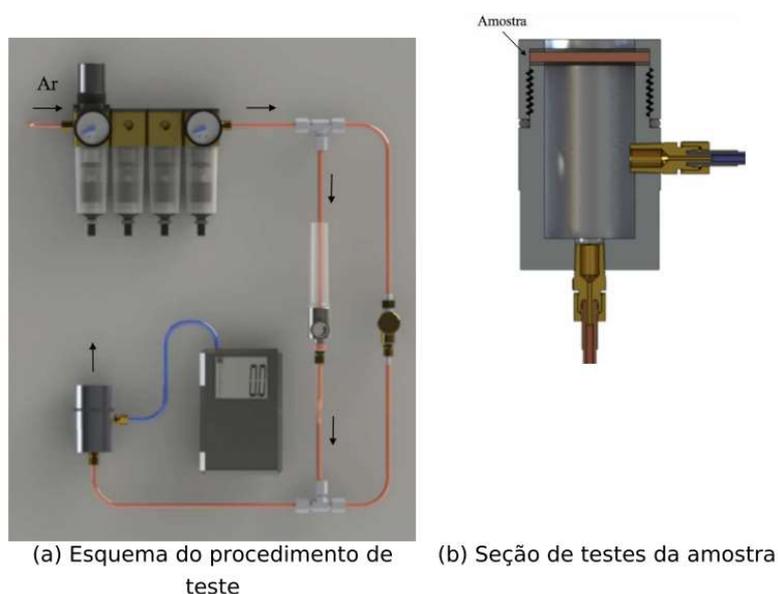
Para estes estudos, novo MP foram fabricados em formato cilíndrico, agora com diâmetro 25,4 mm e comprimento 25,4 mm, totalizando 85 camadas. Para cada configuração da Tabela 8 e para a configuração Raster, foram impressas 5 amostras que foram caracterizadas quanto à sua porosidade e permeabilidade.

Para a obtenção do valor de porosidade efetiva, foi utilizado um porosímetro a gás HEP-P, da marca Vinci Technologies, instalado no laboratório do CERNN - Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos da UTFPR. Nesse equipamento, a porosidade efetiva de um MP é calculada através da obtenção de volume de poros por expansão isotérmica de gás hélio na amostra.

Os valores de permeabilidade das amostras foram obtidos pelo método experimental direto, através da medição da queda de pressão devido à alteração na vazão volumétrica do fluido escoado através do MP, baseando-se na norma

MPIF Standard 39 (KRAMBECK *et al.*, 2018). Para isso, foi utilizado o permeâmetro desenvolvido no trabalho de Krambeck et al. (2018), localizado no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética da UTFPR Campus Ponta Grossa. A Figura 33 mostra uma representação do permeâmetro. O ar é injetado no equipamento por um compressor (com um reservatório de 30 L e pressão máxima de 5,5 bar) e a vazão volumétrica que escoar pelo MP é controlada por um fluxômetro (com vazão de até 30 l/min). Para as medições de pressão, foi utilizado um manômetro digital da marca Omega, modelo HHP886U, com precisão de leitura de 0,01 mbar.

**Figura 33 – Desenho esquemático do permeâmetro a ser utilizado**



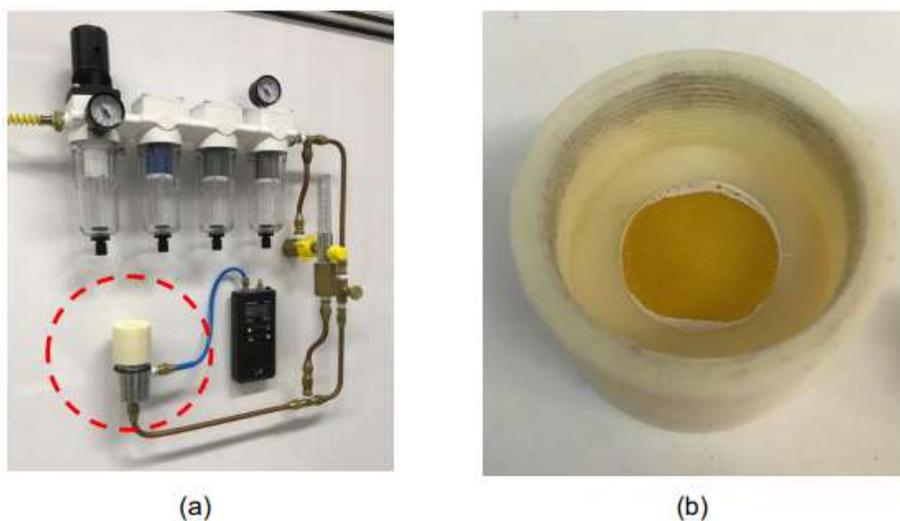
**Fonte: Krambeck et al. (2018)**

Como as dimensões dos MP fabricados neste estudo são diferentes dos utilizados por Krambeck et al. (2018), tornou-se necessária uma adaptação para alojar as amostras no equipamento. Para isso, foi utilizada a modificação da tampa do porta amostras fabricada em ABS para o estudo de Shigeoka (2019). A Figura 34 mostra em detalhe a adaptação inserida no permeâmetro.

Para evitar que houvesse vazamentos nessa adaptação, as suas superfícies foram cobertas por uma camada de esmalte/verniz de unha e foram utilizados anéis retentores de borracha nas interfaces da tampa com o porta-amostra e do MP com a tampa. Para garantir que o escoamento ocorresse apenas no interior do MP, e não na sua interface com a tampa, as amostras

também foram cobertas por uma camada de esmalte em suas superfícies laterais e foram envolvidas com fita veda rosca (conforme NBR 16368).

**Figura 34 – (a) Adaptação realizada no permeômetro para utilização das amostras impressas e (b) amostra inserida na tampa do porta-amostra**



Fonte: Shigueoka (2019)

Para cada amostra, foram realizadas as medições de queda de pressão para seis valores diferentes de vazão, variando de 4 a 24 L/min, em intervalos de 4 L/min. Para cada amostra montada no permeômetro, foi realizada a medição seguindo a sequência dos valores de vazão (4, 8, 12, 16, 20 e 24 L/min) e então o processo foi repetido até que se totalizasse três medições por vazão (totalizando 630 medições nas 35 amostras).

Para cada valor de vazão, foi calculada a velocidade do escoamento utilizando a área da seção transversal dos MP. Como as amostras foram fabricadas utilizando um contorno (perímetro), foram descontados 0,8 mm (largura de dois filamentos) do diâmetro das peças para o cálculo da área de seção. Os valores de velocidade utilizados para o cálculo de permeabilidade encontram-se na Tabela 9.

O cálculo do coeficiente de permeabilidade foi realizado através das equações de Dupuit-Forchheimer (Equação 6), utilizando as quedas de pressão medidas, as velocidades de escoamento e os dados presentes na Tabela 10. Os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  foram obtidos a partir de uma regressão linear das funções quadráticas de 2ª ordem dos valores mensurados. O coeficiente  $k_1$

(permeabilidade Darciana) foi definido como o valor de permeabilidade das configurações, apresentado na unidade de D (Darcy).

**Tabela 9 – Valores de vazão utilizados nos ensaios de permeabilidade e suas respectivas velocidades de escoamento**

Vazão volumétrica [L/min]	Velocidade de escoamento [m/s]
4	0,143
8	0,286
12	0,428
16	0,671
20	0,714
24	0,857

**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Tabela 10 – Dados a serem utilizados nos ensaios experimentais de permeabilidade**

Dado	Valor
Pressão de entrada (P1)	35000 Pa
Pressão atmosférica (Patm)	102600 Pa
Viscosidade dinâmica do ar ( $\mu$ )	0,0000187 Pa.s
Densidade do ar ( $\rho$ )	998,2 kg/m <sup>3</sup>
Comprimento do MP (L)	0,0255 m
Diâmetro do MP (D)	0,0254 m

**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 3.4 ELABORAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO PARA O PREENCHIMENTO SEGMENTADO

Os testes preliminares foram capazes de definir os parâmetros ideais para a obtenção de um MP aplicando a estratégia de deposição proposta, como equipamento de AM utilizado. Porém, sabe-se que diferentes impressoras podem apresentar variações em seus mecanismos e, conseqüentemente, nos seus comportamentos de acordo com os parâmetros definidos.

Como deseja-se que o preenchimento segmentado possa ser utilizado em outras máquinas de AM por extrusão de material, foi elaborado um procedimento para a utilização do mesmo, contendo, de maneira resumida, as etapas necessárias para configurar a impressora e os parâmetros de deposição. Este documento é apresentado no Apêndice A deste trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos aplicando-se a metodologia descrita no Capítulo 3, divididos nas seções: resultados dos testes preliminares, caracterização por microtomografia computadorizada ( $\mu$ CT) e ensaios de porosidade e permeabilidade.

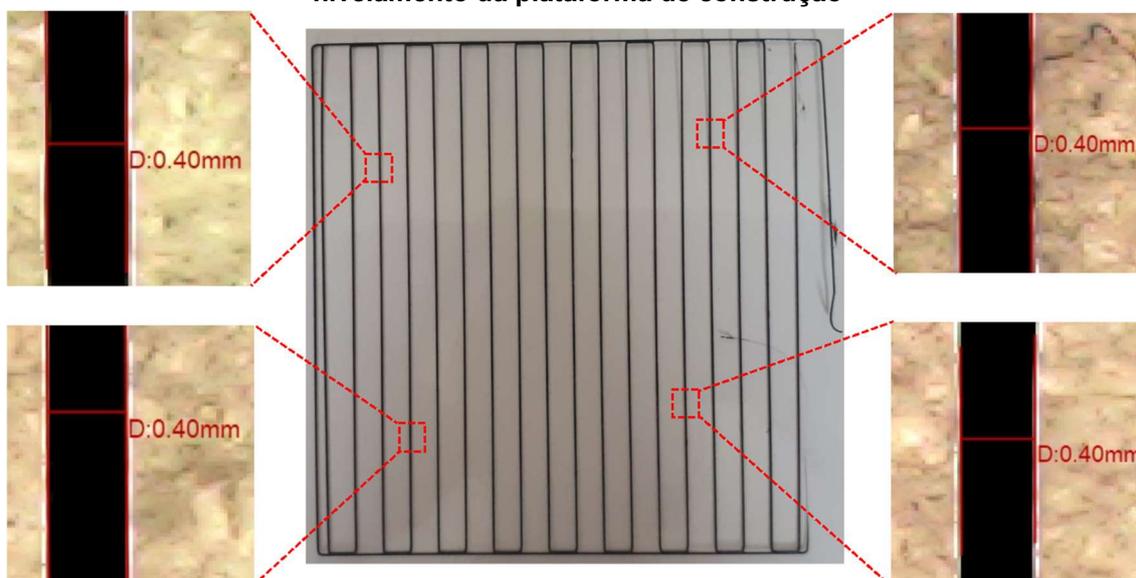
### 4.1 RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES

#### 4.1.1 Calibração da extrusão e nivelamento da plataforma

A etapa de calibração da extrusão apontou que o valor ideal do parâmetro *flow* do equipamento seria de 85%, resultando na obtenção de filamentos contínuos extrudados com aproximadamente 0,4 mm de largura.

Nesse momento, a plataforma de construção da impressora foi nivelada e a distância entre bico e a plataforma definida de uma maneira que os filamentos contínuos gerados achatavam pouco durante a deposição, porém ainda com uma distância que garantisse a adesão do material à mesa. A Figura 35 mostra que os filamentos contínuos da amostra com uma única camada apresentaram medição de largura igual a 0,4 mm em diferentes regiões da peça.

**Figura 35 – Largura dos filamentos contínuos da amostra em diferentes regiões após nivelamento da plataforma de construção**



Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.1.2 Teste de variação da velocidade de impressão

Na Tabela 11 encontram-se os resultados das medições realizadas no teste de variação da velocidade de impressão em cada um dos 12 filamentos segmentados das amostras. Os valores de distância e largura apresentados referem-se às médias das medições obtidas nas três amostras e seus respectivos desvios.

**Tabela 11 – Resultados das medições do teste de variação da velocidade de impressão**

Número do filamento	Velocidade de trecho fino [mm/s] (%)	Largura mínima do trecho fino [mm]	Distância de estabilização da largura [mm]	Largura máxima do trecho grosso [mm]
1	18,75 (125)	0,31 ± 0,01	1,05 ± 0,22	0,45 ± 0,08
2	22,5 (150)	0,27 ± 0,01	2,25 ± 0,50	0,50 ± 0,03
3	26,25 (175)	0,26 ± 0,02	3,50 ± 0,69	0,53 ± 0,03
4	30 (200)	0,21 ± 0,02	4,45 ± 0,68	0,57 ± 0,02
5	33,75 (225)	0,19 ± 0,01	5,20 ± 0,33	0,60 ± 0,01
6	37,5 (250)	0,17 ± 0,01	5,75 ± 0,53	0,64 ± 0,01
7	41,25 (275)	0,17 ± 0,01	6,95 ± 0,35	0,66 ± 0,01
8	45 (300)	0,15 ± 0,03	7,45 ± 0,33	0,70 ± 0,02
9	48,75 (325)	0,17 ± 0,03	8,02 ± 0,38	0,74 ± 0,01
10	52,5 (350)	0,16 ± 0,03	8,80 ± 0,57	0,76 ± 0,01
11	56,25 (375)	0,16 ± 0,02	9,40 ± 0,75	0,76 ± 0,01
12	60 (400)	0,12 ± 0,02	9,80 ± 0,76	0,79 ± 0,01

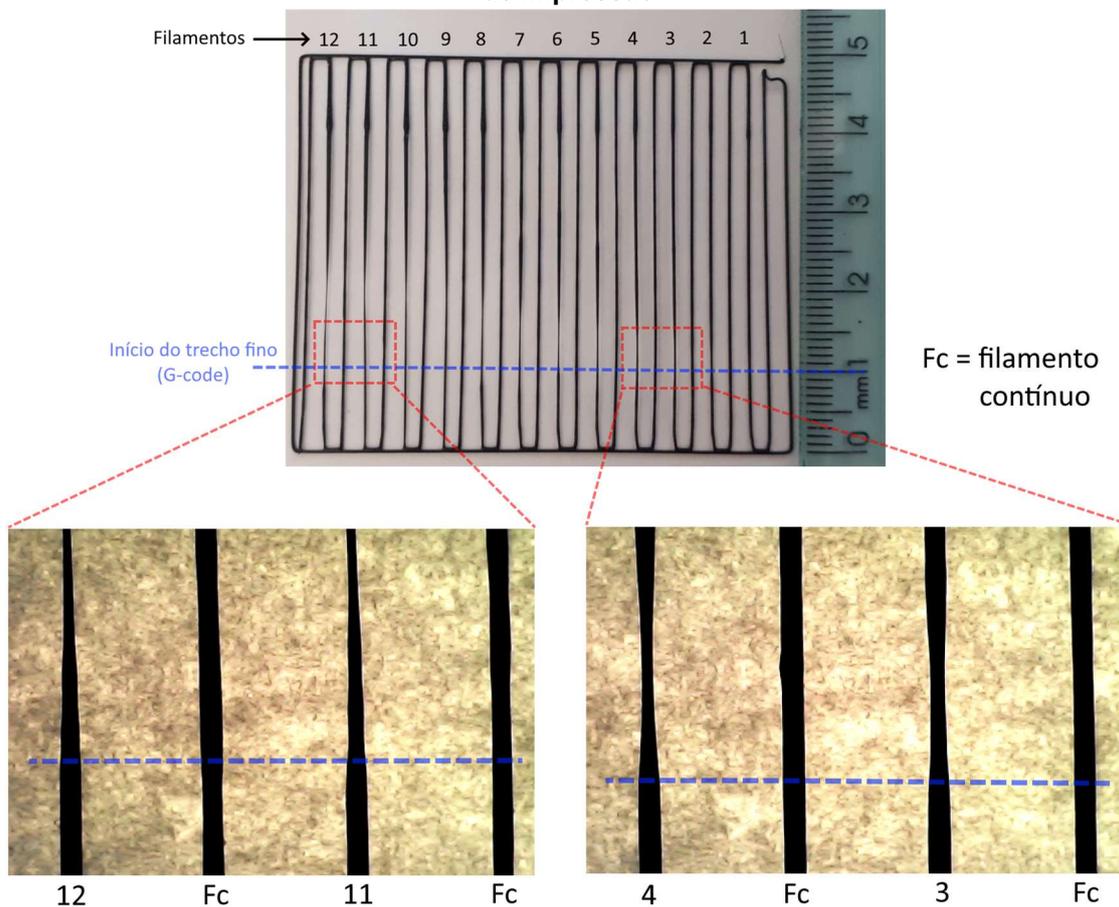
Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 36 apresenta uma amostra obtida nesse teste, com a posição dos filamentos segmentados de acordo com a Figura 30 e os valores de velocidade de trecho fino de acordo com a Tabela 2. As imagens de microscópio apresentadas foram obtidas nas regiões de início do trecho fino, demonstrando que o aumento da velocidade foi capaz de causar reduções na largura do filamento extrudado, sendo mais acentuado nos filamentos com maiores valores de velocidade (filamentos com número de identificação maiores).

Foi observado em todos os 12 filamentos que a redução da largura se iniciou em aproximadamente 10 mm de comprimento da linha (ponto definido pelo G-code como o início do trecho fino da amostra). No microscópio foi possível

notar que essas reduções ocorreram de maneira bastante rápida no início do trecho fino, e em seguida o filamento seguiu estabilizando lentamente até uma largura próxima de 0,4 mm (comportamento esperado conforme Figura 31 esquemática do Capítulo 3).

**Figura 36 – Reduções de largura em amostra obtida no teste de variação da velocidade de impressão**



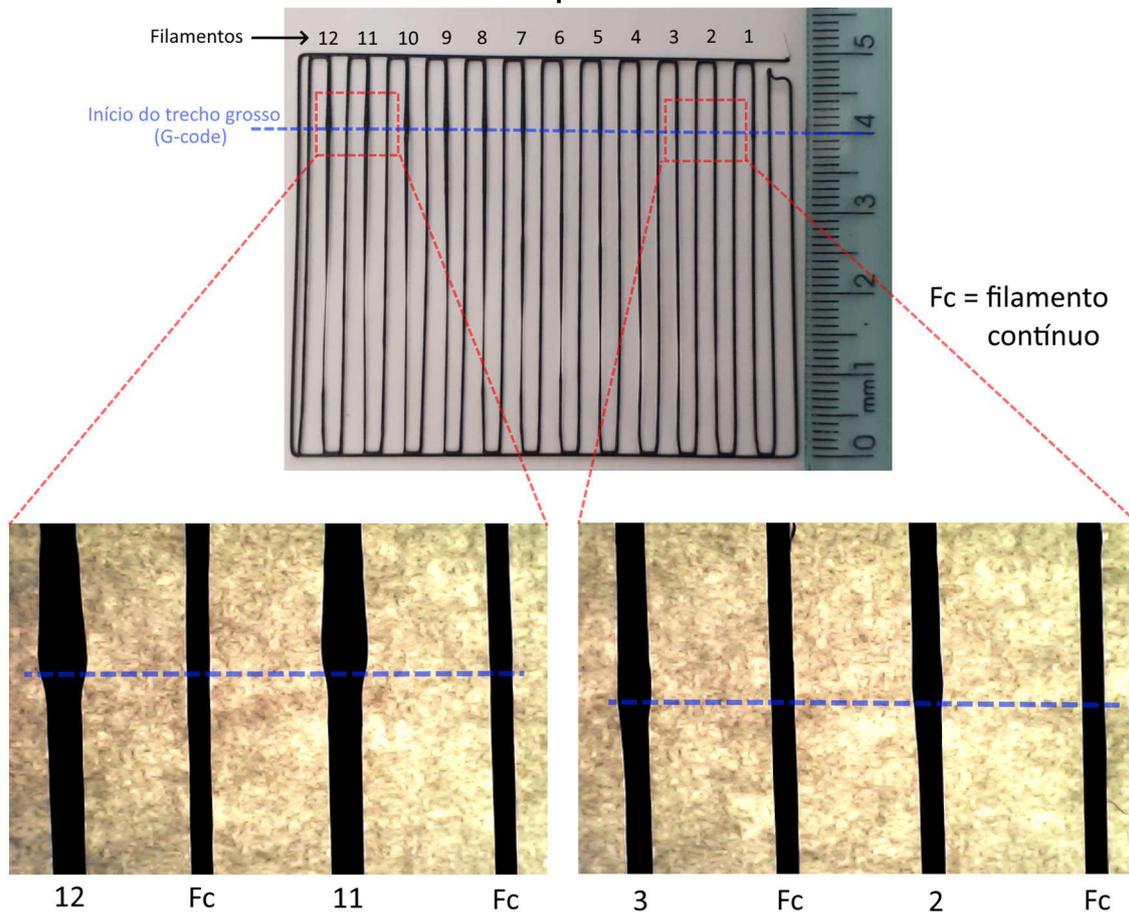
Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 37 apresenta a mesma amostra da Figura 36, porém as imagens de microscópio destacam a região em que se iniciam os trechos grossos, após a finalização dos finos. Como esperado, pode ser observado que a redução da velocidade de impressão causou um aumento da largura do filamento nestas regiões, sendo mais intenso nos filamentos de índices maiores.

No microscópio foi observado que o aumento de largura ocorreu na posição exata em que se inicia o trecho grosso, devido à redução da velocidade que ocorre nesse ponto (passagem do trecho fino ao grosso). Assim como no caso da redução, o aumento da largura também aconteceu de maneira imediata

no início e o filamento foi reduzindo lentamente a sua largura até o fim da linha de preenchimento.

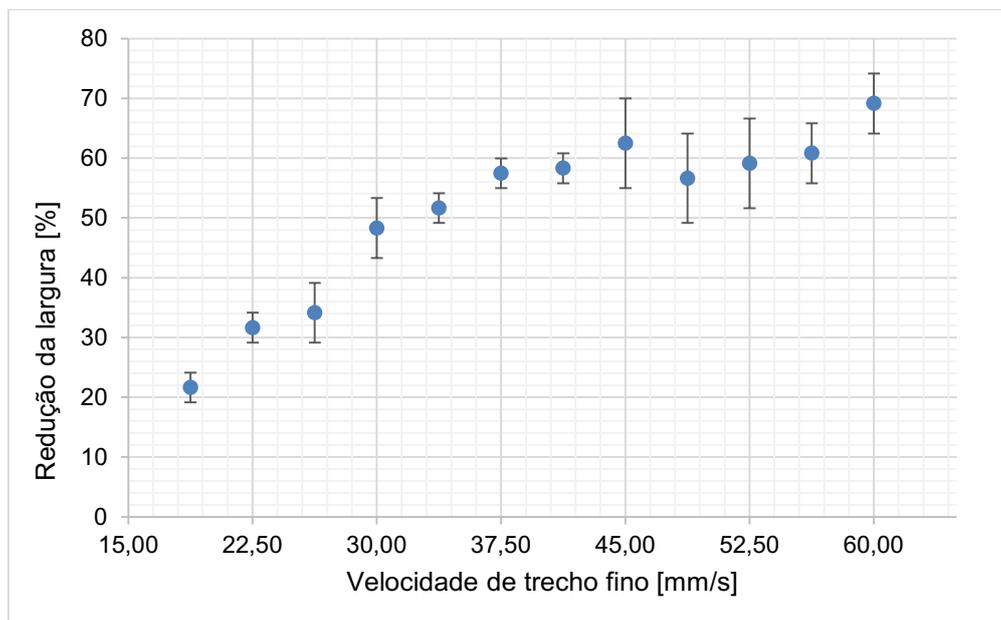
**Figura 37 – Aumentos de largura em amostra obtida no teste de variação da velocidade de impressão**



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir das larguras mínimas dos trechos finos presentes na Tabela 11, foram calculadas as porcentagens de redução da largura em relação à um trecho contínuo (0,4 mm de largura), tornando-se possível a construção do Gráfico 1. Este gráfico relaciona a redução de largura com a velocidade de trecho fino aplicada. As barras de erro do gráfico representam a variação da medição entre as diferentes amostras. Embora não apresente um comportamento tão linear, pode-se observar pelo gráfico que, quanto maior a velocidade aplicada ao trecho fino, maior é a redução de largura durante a impressão do filamento.

**Gráfico 1 – Redução das larguras dos filamentos no teste de variação da velocidade de impressão**



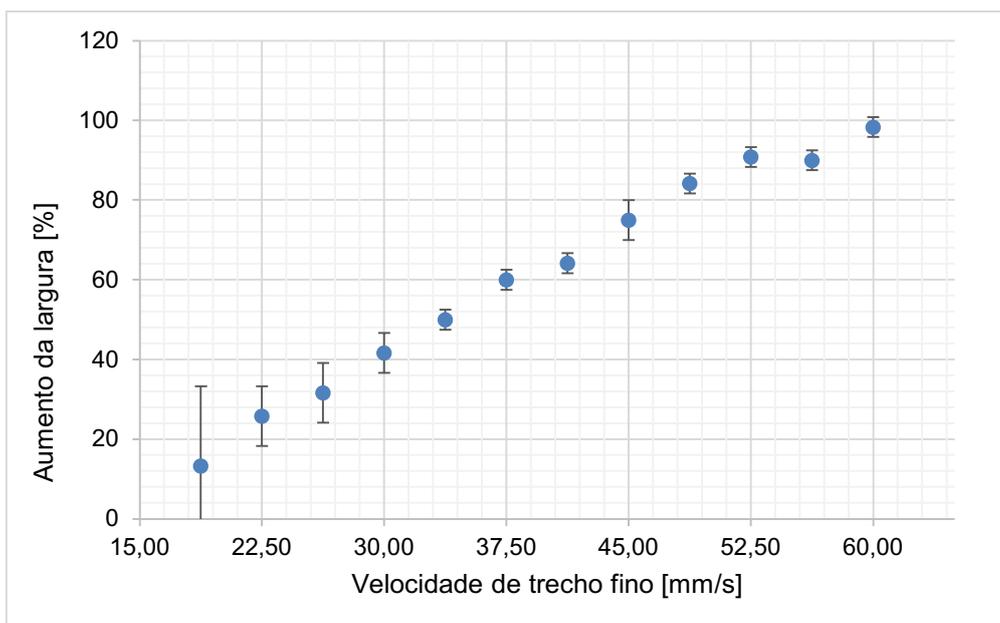
**Fonte: Autoria própria (2022)**

Com os valores de largura máxima dos trechos grossos da Tabela 11, foram calculadas as porcentagens de aumento da largura (novamente em relação à largura de 0,4 mm), que são apresentadas no Gráfico 2. Assim como no caso da redução da largura, o aumento ocorreu com maior intensidade nas maiores velocidades de trecho fino, com um comportamento bastante linear. Embora o aumento de largura ocorra nos trechos grossos, cada ponto do gráfico se relaciona com a velocidade de impressão aplicada aos trechos finos. Lembrando que quanto maior o valor de velocidade nos trechos finos, maior é a redução de velocidade que ocorre no início dos trechos grossos, quando a velocidade retorna à 15 mm/s (100%).

Os resultados dos Gráficos 1 e 2 e da Tabela 11 mostram que a variação da velocidade de impressão durante a deposição de um filamento gera alterações na sua largura, com uma resposta bastante rápida do equipamento. Isso ocorre pois, quando a velocidade de deslocamento do cabeçote aumenta, o motor do sistema de alimentação do filamento também recebe o sinal para aumentar sua rotação visando aumentar a pressão no material para manter a largura constante. Um maior fluxo de material sendo forçado para o interior da câmara do cabeçote significa que o sistema de aquecimento terá de fornecer calor mais rapidamente para fundir o material extra. Porém, como já foi

comentado, esse sistema possui um atraso (*delay*) que faz com que a quantidade de material extrudado não aumente imediatamente, e, portanto, a largura é reduzida inicialmente e tende a ir aumentando até a estabilização do sistema. Depois disso, quando a velocidade de deslocamento do cabeçote é reduzida, um menor fluxo de material é direcionado para a câmara. Como a velocidade havia aumentado anteriormente, esse material estava recebendo uma maior quantidade de calor, e por mais que o sistema de aquecimento receba um sinal para reduzir o fluxo de calor, a pressão interna no cabeçote leva um tempo para ser reduzida, resultando no aumento de largura do material. Em outras palavras, o sistema acaba compensando o material que não foi possível de ser depositado com a alta velocidade do trecho fino, e deposita na região de menor velocidade (trecho grosso).

**Gráfico 2 – Aumento das larguras no teste de variação da velocidade**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Embora nesse teste tenham sido usados valores relativamente altos de velocidade de impressão, uma variação muito brusca desse parâmetro com certa frequência pode causar danos ao equipamento, uma vez que os motores necessitam alterar muito sua velocidade de rotação, aplicando várias acelerações e desacelerações (WANG, Jun *et al.*, 2019). Devido a isso e observando os resultados, a velocidade de 200% (30 mm/s) torna-se um valor

adequado para a formação dos trechos, podendo gerar uma redução na largura de até 51%.

Na Tabela 11 pode ser observado que a distância de estabilização da largura para a velocidade de 200% é de aproximadamente 4,5 mm. Esse valor pode ser compreendido como um limite do comprimento de trecho fino gerado com esse aumento da velocidade de impressão. Isso porque um trecho fino com comprimento maior que 4,5 mm iria, eventualmente, igualar a sua largura às linhas contínuas, causando um fechamento dos poros nessa região.

#### 4.1.3 Teste de variação da taxa extrusão

A Tabela 12 traz os resultados de medição da largura dos filamentos no teste de variação da taxa de extrusão. São apresentadas as médias de largura mínima do trecho fino das três amostras e seus desvios.

**Tabela 12 – Resultados das medições do teste de variação da taxa de extrusão**

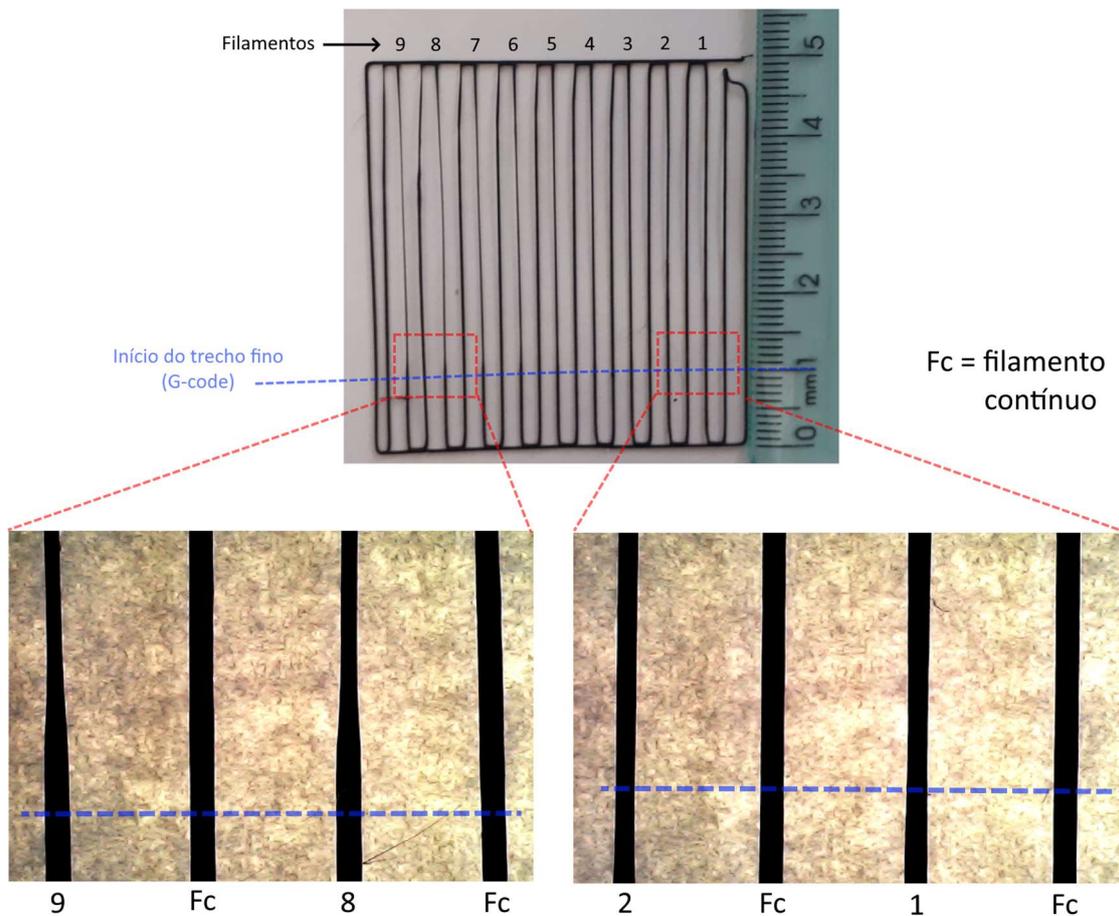
Número do filamento	Taxa de extrusão no trecho fino [%]	Largura mínima do trecho fino [mm]
1	90	0,37 ± 0,01
2	80	0,33 ± 0,01
3	70	0,31 ± 0,01
4	60	0,29 ± 0,01
5	50	0,27 ± 0,01
6	40	0,24 ± 0,01
7	30	0,21 ± 0,01
8	20	0,19 ± 0,01
9	10	0,16 ± 0,01

**Fonte: Autoria própria (2022)**

A Figura 38 apresenta uma amostra impressa do teste de variação da extrusão, sendo que a taxa de extrusão aplicada no trecho fino dos filamentos indicados encontra-se de acordo com a Tabela 3. As imagens de microscópio apresentadas destacam a região de início do trecho fino. Nota-se que, assim como a velocidade de impressão, a variação de extrusão causou uma redução

na largura do filamento depositado, sendo mais visível nos filamentos 6 em diante (onde foram aplicados menores valores de extrusão). Já a Figura 39 mostra imagens de microscópio das regiões de início do trecho grosso seguinte ao trecho fino, demonstrando que não ocorreu nenhum aumento da largura nas amostras.

**Figura 38 – Reduções de largura em amostra obtida no teste de variação da taxa de extrusão**

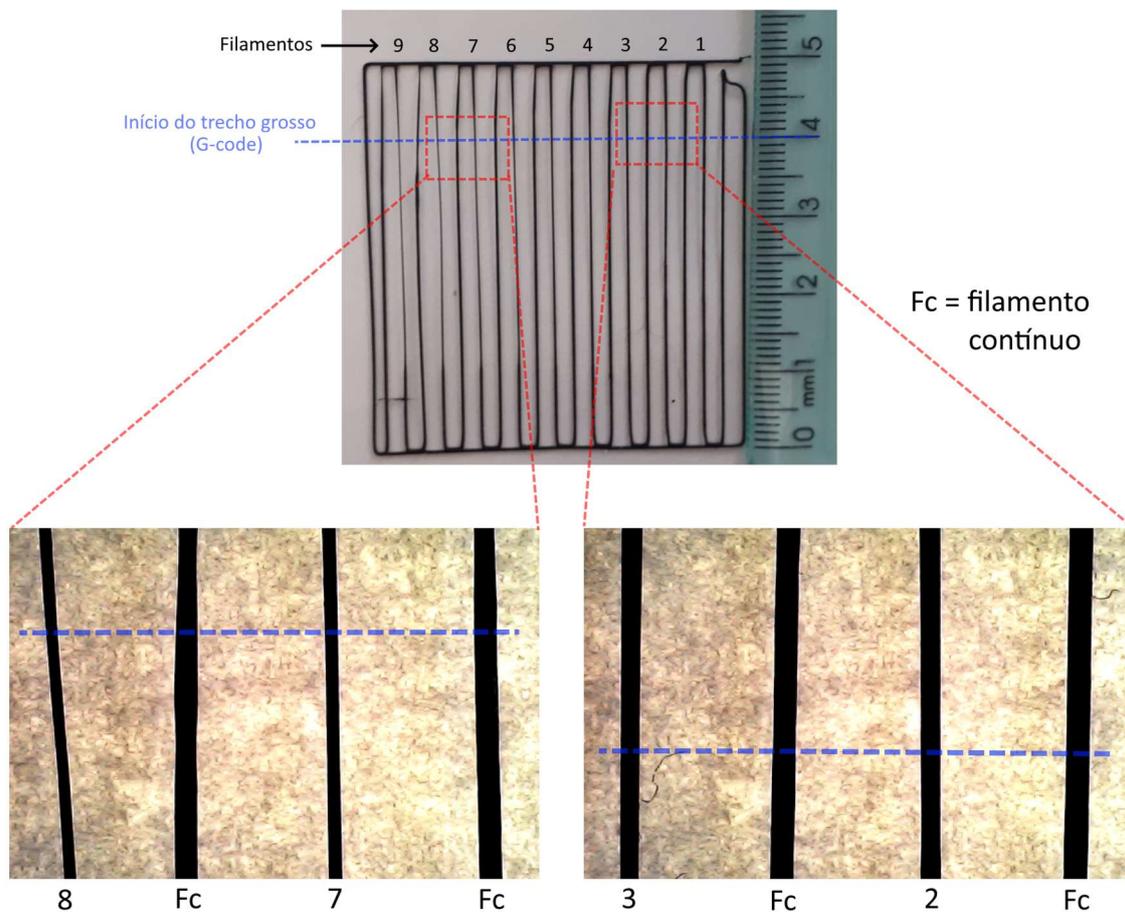


Fonte: Autoria própria (2022)

No microscópio foi observado que, diferente da velocidade de impressão, a variação da extrusão gerou uma redução de largura mais lenta e sutil, que se iniciou cerca de 1 mm depois do ponto em que começa o trecho fino de acordo com o G-code. Após os filamentos atingirem a largura mínima (valores da Tabela 12), os mesmos permaneceram com largura constante por todo o comprimento do trecho fino. Nos casos de aplicação de menores valores de extrusão, a redução de largura continuou mesmo após o início do trecho grosso seguinte, ou

seja, não houve um aumento de largura nesse momento (como pode ser observado na Figura 39). Além disso, nesses casos, o início da linha contínua seguinte também apresentou um pequeno afinamento. Esse efeito pode ser observado em detalhe na Figura 40, na qual são mostradas as regiões do *raster link* (filamento que une duas linhas de *raster* adjacentes) nos filamentos de extrusão de 10 e 20% (filamentos 9 e 8).

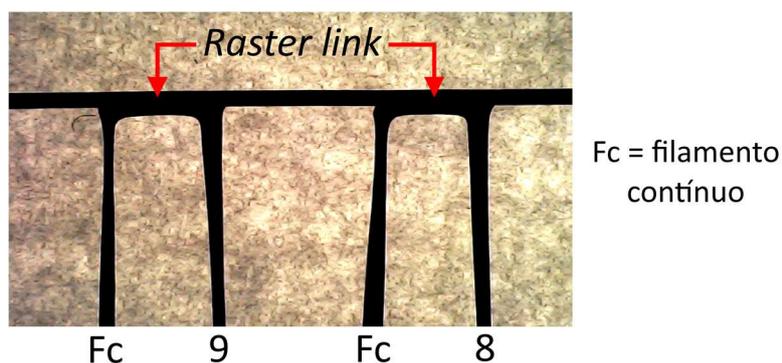
**Figura 39 – Ausência de aumento de largura em amostra obtida no teste de variação da taxa de extrusão**



Fonte: Autoria própria (2022)

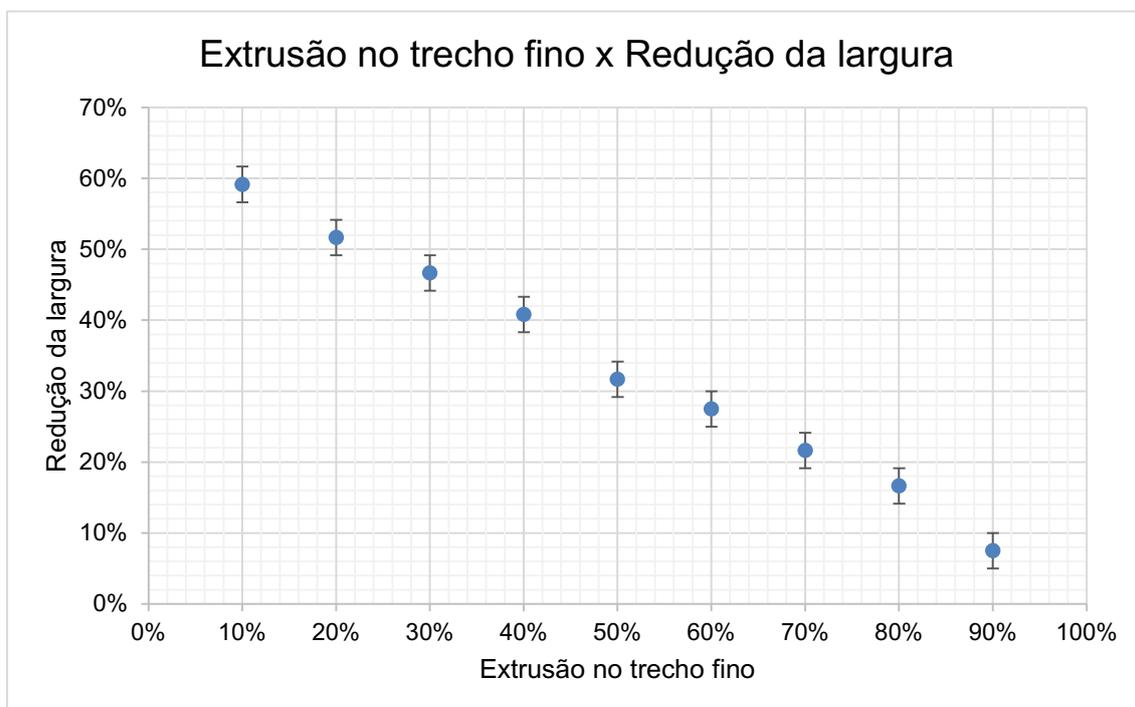
No Gráfico 3 são apresentadas as porcentagens de redução da largura do filamento segmentado para cada valor de extrusão, em relação à largura de um trecho contínuo. Como esperado, o gráfico mostra que quanto menor a taxa de extrusão menor a largura do filamento depositado. Nota-se que esse teste apresentou um comportamento mais linear na redução da largura em comparação à variação da velocidade de impressão.

Figura 40 – Microscopia da região do *raster link* dos filamentos segmentados com os menores valores de extrusão



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 3 – Redução das larguras no teste de variação da taxa de extrusão



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 39 pode ser notado que nesse teste não houve aumento da largura dos filamentos nos trechos grossos, não sendo possível realizar uma medição da largura máxima nessas regiões. Além disso, devido ao efeito apresentado na Figura 40 e à sutileza no afinamento causado pela variação da taxa de extrusão, também não foi possível realizar uma medição da distância de estabilização da largura nesse teste.

Os resultados desse teste também demonstram o *delay* presente no sistema de extrusão, uma vez que as variações de largura ocorreram com um certo atraso quando comparado ao sinal enviado pelo G-code. Nos menores valores de extrusão esse atraso foi ainda mais intenso no início dos trechos grossos. Isso ocorre porque, por mais que o motor de alimentação do filamento empurre mais material para a câmara do cabeçote nesse momento, o sistema de aquecimento não é capaz de aumentar o fluxo de calor rapidamente para fundir o material extra. Assim, a largura do filamento depositado demora para se estabilizar, em alguns casos ocorrendo apenas no filamento contínuo seguinte.

Comparando os resultados dos testes de variação da velocidade de impressão e da extrusão pode-se concluir que a alteração do parâmetro de velocidade de impressão durante a deposição de uma linha de preenchimento apresenta uma resposta mais rápida do sistema do que a extrusão. Além disso, as reduções de largura obtidas pela variação de velocidade apresentaram maiores valores do que a variação da extrusão. Portanto, a velocidade de 30 mm/s (200%) foi selecionada como a configuração a ser utilizada para gerar os trechos finos do preenchimento segmentado.

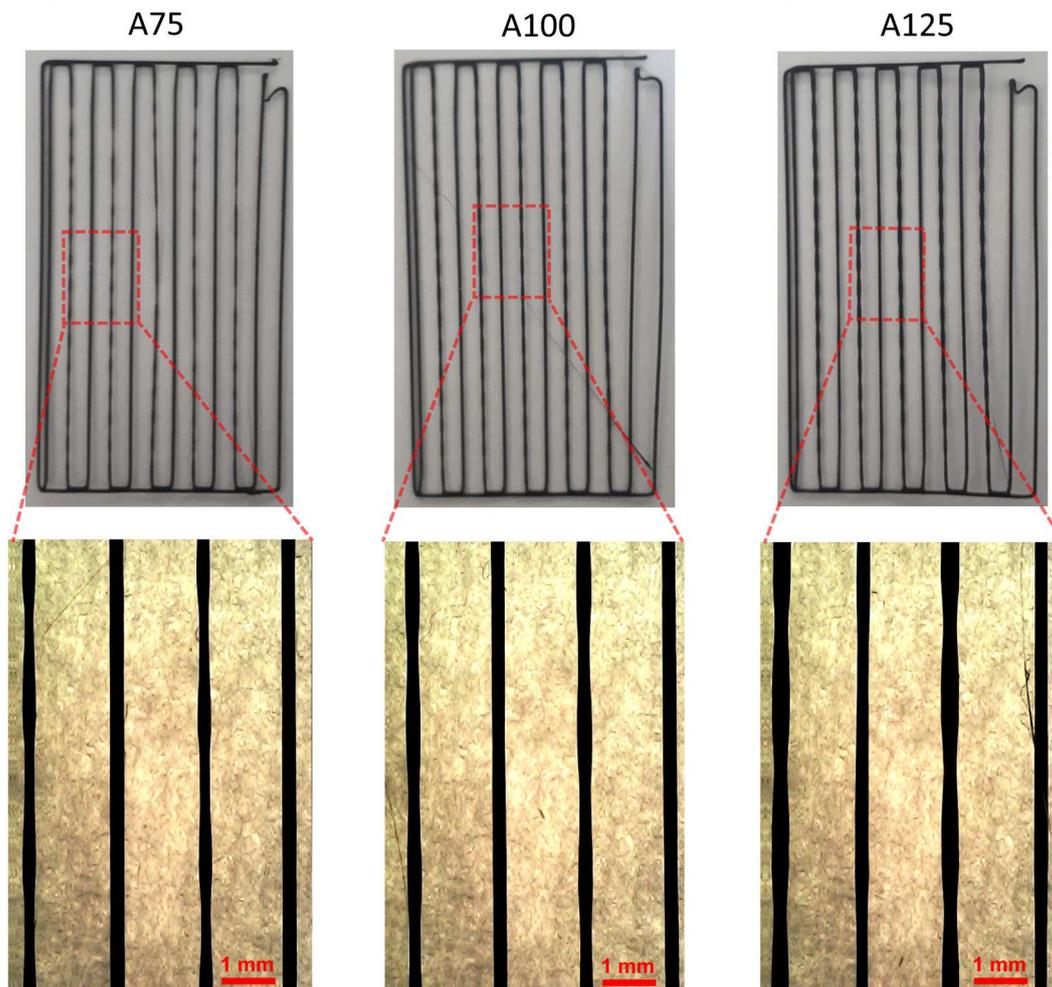
Por mais que a extrusão não será utilizada para a formação dos trechos, esse parâmetro apresenta grande potencial para o controle da largura do filamento depositado. Portanto, a extrusão poderá ser utilizada com um valor fixo em toda a linha de preenchimento segmentado, sem a variação do parâmetro entre os trechos. Dessa maneira, uma alteração da taxa de extrusão causará, teoricamente, uma variação na largura dos trechos finos e grossos simultaneamente.

#### 4.1.4 Obtenção de filamentos segmentados repetidos

Na Figura 41 são apresentadas as amostras obtidas utilizando as configurações de parâmetros definidos na Tabela 4. As imagens de microscópio das regiões centrais destacam a formação dos filamentos segmentados. Como esperado, a variação da velocidade na linha de preenchimento foi capaz de gerar trechos com diferentes larguras durante a sua deposição. Devido aos pequenos valores de comprimento dos trechos utilizados, nota-se que as variações de largura são bastante sutis, sendo mais visíveis no microscópio. Além disso, é

possível notar a presença de pequenas regiões de transições de afinamento e engrossamento entre os trechos. Também pode ser observada a diferença de largura obtida nos filamentos segmentados para cada valor de extrusão utilizado (A75 com extrusão de 75%, A100 com 100% e A125 com 125%).

**Figura 41 – Amostras do teste de obtenção de filamentos segmentados repetidos**



Fonte: Autoria própria (2022)

Em cada uma das amostras foram realizadas as medições de largura nas regiões inicial, central e final (indicadas na Figura 32). As médias dos valores de largura dos trechos são apresentadas na Tabela 13.

Analisando os resultados é possível notar que um mesmo tipo de trecho pode apresentar diferentes valores de largura dependendo da região da linha de preenchimento (inicial, central e final). Nas linhas contínuas também pode ser observada uma variação da largura em diferentes regiões da peça. Comparando as regiões de cada amostra, nota-se que a região inicial da amostra A75 possui

valores de largura maiores que as demais regiões, enquanto nas outras duas amostras o que ocorre é o inverso, sendo as regiões finais mais espessas. Nas amostras A100 e A125 há um alto desvio na largura dos trechos grossos entre as regiões inicial e final, com os valores de 0,03 mm e 0,1 mm, respectivamente. Já a amostra A75 apresentou um desvio máximo de 0,01 mm, que pode ser considerado um valor baixo levando-se em conta a precisão/resolução do modelo da impressora (aproximadamente 0,012 mm, segundo o fabricante).

**Tabela 13 – Valores de largura dos trechos nas diferentes regiões de cada amostra**

Amostra	Região	Média das larguras [mm]			Desvio máximo de largura [mm]
		Trechos grossos	Trechos finos	Linhas contínuas	
A75	Final	0,38	0,28	0,40	0,01
	Central	0,39	0,28	0,40	
	Inicial	0,39	0,29	0,40	
A100	Final	0,45	0,34	0,41	0,03
	Central	0,43	0,33	0,39	
	Inicial	0,42	0,32	0,39	
A125	Final	0,54	0,40	0,42	0,10
	Central	0,51	0,40	0,39	
	Inicial	0,44	0,34	0,38	

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os valores maiores de desvio máximo apresentados nas amostras A100 e A125 também podem ser explicados pelo *delay* do sistema de extrusão. Ao alterar o valor de extrusão em uma linha de preenchimento, a taxa de alimentação do material em todo o filamento será alterada, e para maiores valores de extrusão se torna necessário um tempo maior para o sistema de aquecimento ser capaz de fundir o material para a deposição. Como os sentidos de deposição das linhas segmentadas são sempre os mesmos nas peças (Figura 30), o material acaba se acumulando apenas nas regiões finais das amostras, e a estabilização da largura ocorre apenas nas linhas contínuas.

As amostras A100 e A125 de extrusão foram reimpressas com um ajuste na velocidade de trecho grosso. O novo valor desse parâmetro foi de 11,25 mm/s (75%). Após a fabricação das amostras, as larguras dos trechos nas três regiões foram medidas, e os valores médios são apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14 – Valores de largura dos trechos nas diferentes regiões das amostras após ajuste**

Amostra	Região	Média das larguras [mm]			Desvio máximo de largura [mm]
		Trechos grossos	Trechos finos	Linhas contínuas	
A100	Final	0,45	0,31	0,39	0,01
	Central	0,45	0,32	0,39	
	Inicial	0,44	0,31	0,40	
A125	Final	0,55	0,37	0,40	0,05
	Central	0,53	0,36	0,39	
	Inicial	0,50	0,35	0,38	

Fonte: Autoria própria (2022)

Embora a diferença de valor de largura entre regiões tenha diminuído em ambas as configurações, as regiões finais ainda continuam apresentando trechos mais espessos que as regiões iniciais. Os novos valores de desvio da largura de trecho grosso são de 0,01 mm na amostra A100 e 0,05 mm na amostra A125. Esta última passou por um novo ajuste e foi reimpressa com uma velocidade de trecho grosso de 7,5 mm/s (50%). Os resultados das medições de largura desta nova configuração encontram-se na Tabela 15.

**Tabela 15 – Valores de largura dos trechos nas diferentes regiões da amostra A125 após segundo ajuste**

Amostra	Região	Média das larguras [mm]			Desvio máximo de largura [mm]
		Trechos grossos	Trechos finos	Linhas contínuas	
A125	Final	0,59	0,32	0,40	0,01
	Central	0,58	0,32	0,39	
	Inicial	0,58	0,31	0,39	

Fonte: Autoria própria (2022)

Os valores de largura mostram que a região final continua sendo um pouco mais espessa. Contudo, nota-se que a variação das medidas entre as regiões diminuiu, sendo que o desvio de largura dos trechos grossos foi de 0,01 mm. Com isso, pode-se concluir que para diferentes valores de extrusão aplicados na linha segmentada existe um valor ideal de velocidade de trecho

grosso (encontrados na Tabela 6), uma vez que ambos os parâmetros influenciam na uniformidade dos trechos na camada.

A partir dos valores de largura medidos nas amostras já ajustadas (as que apresentaram menor valor de desvio), foram calculadas as distâncias de linhas de *raster* S-C que, teoricamente, geram um *gap* nulo entre os trechos grossos e as linhas contínuas. Os valores desse parâmetro encontram-se na Tabela 7 (Capítulo 3), e foram utilizados para a fabricação das amostras do teste seguinte.

#### 4.1.5 Formação dos poros em uma camada

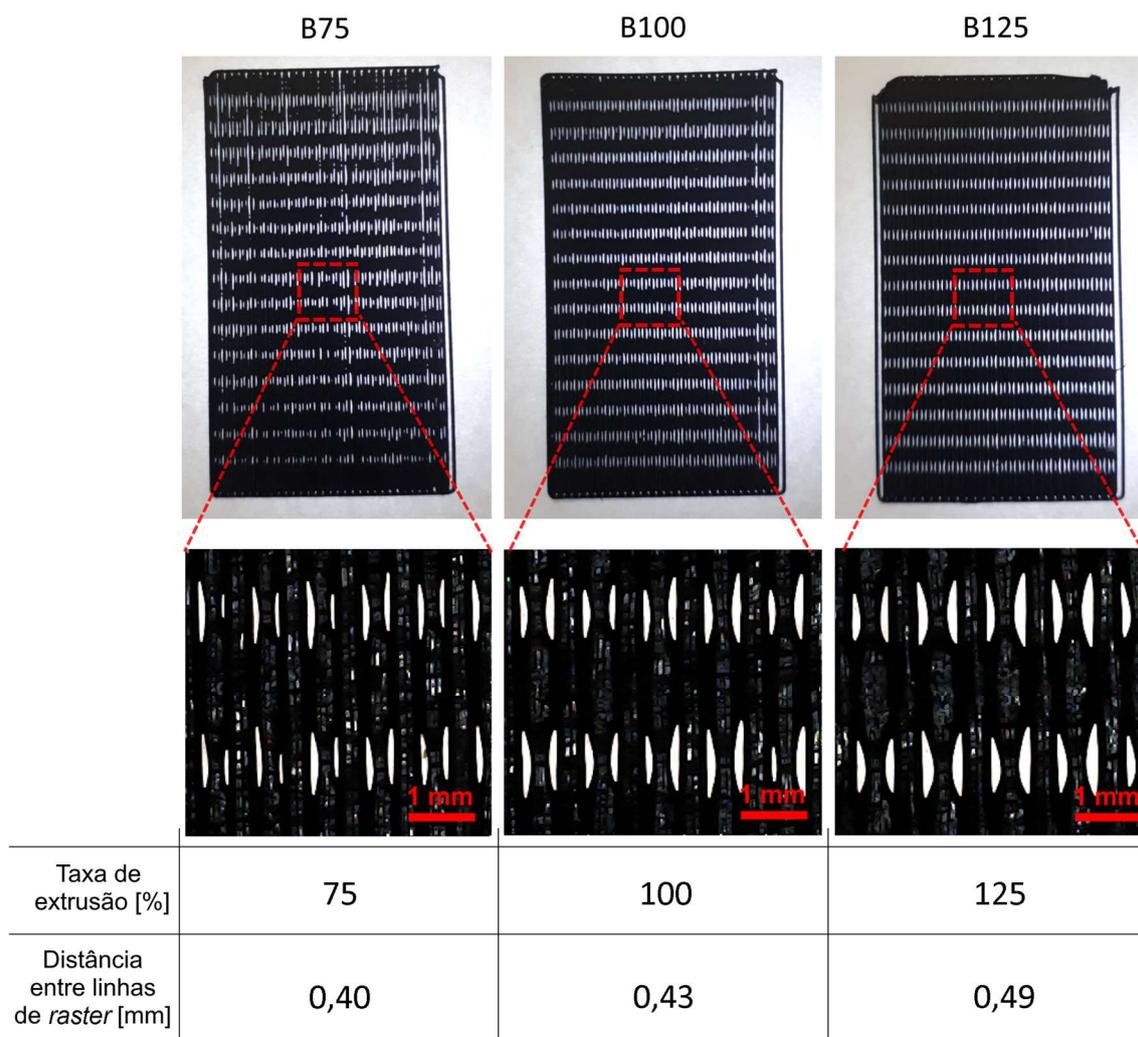
A Figura 42 apresenta as amostras de uma camada obtidas com as configurações do preenchimento segmentado descritas na Tabela 7. As três configurações foram capazes de gerar estruturas porosas na camada. A formação dos poros pode ser observada em maior detalhe nas imagens de microscópio.

A Tabela 16 apresenta os resultados das medições dos poros nas três amostras. Nota-se que, embora os trechos finos tenham sido configurados com comprimento de 1,5 mm, os poros apresentam um comprimento médio de 0,92 mm entre as configurações. Isso provavelmente ocorre, pois, no início e fim dos trechos finos existem as transições entre as variações de largura, ocorrendo aderência com o filamento adjacente em uma pequena porção dessas transições. Outra explicação poderia ser devido ao fato que os trechos grossos são depositados mais lentamente, dando tempo para esse material se espalhar na camada e “invadir” uma pequena região dos trechos finos, reduzindo ligeiramente a área dos poros.

Como esperado, a principal diferença entre as configurações aplicadas é a largura do poro obtido, sendo menores com a diminuição do valor de extrusão e da distância entre linhas de preenchimento. Nota-se, também, que a amostra B75 apresentou menos uniformidade nas dimensões dos poros (maiores desvios na Tabela 16) e nos formatos apresentados por eles (observado na Figura 42). Um possível motivo para isso é devido às pequenas dimensões envolvidas na fabricação desta amostra (menor valor de extrusão e distância entre as linhas), que acabam se aproximando do limite de resolução da máquina. Um

equipamento de AM com maior precisão provavelmente poderia realizar a geração de poros menores de maneira mais uniforme.

**Figura 42 – Amostras impressas (acima) do teste de obtenção da estrutura porosa com uma camada, suas respectivas imagens ampliadas no microscópio (centro) e principais parâmetros das configurações (abaixo).**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 16 – Resultados das medições das dimensões dos poros...**

Amostra	Comprimento médio dos poros [mm]	Largura média dos poros [mm]	Razão de aspecto dos poros
B75	0,86 ± 0,24	0,10 ± 0,04	0,12
B100	0,91 ± 0,11	0,12 ± 0,02	0,13
B125	0,98 ± 0,12	0,14 ± 0,01	0,14

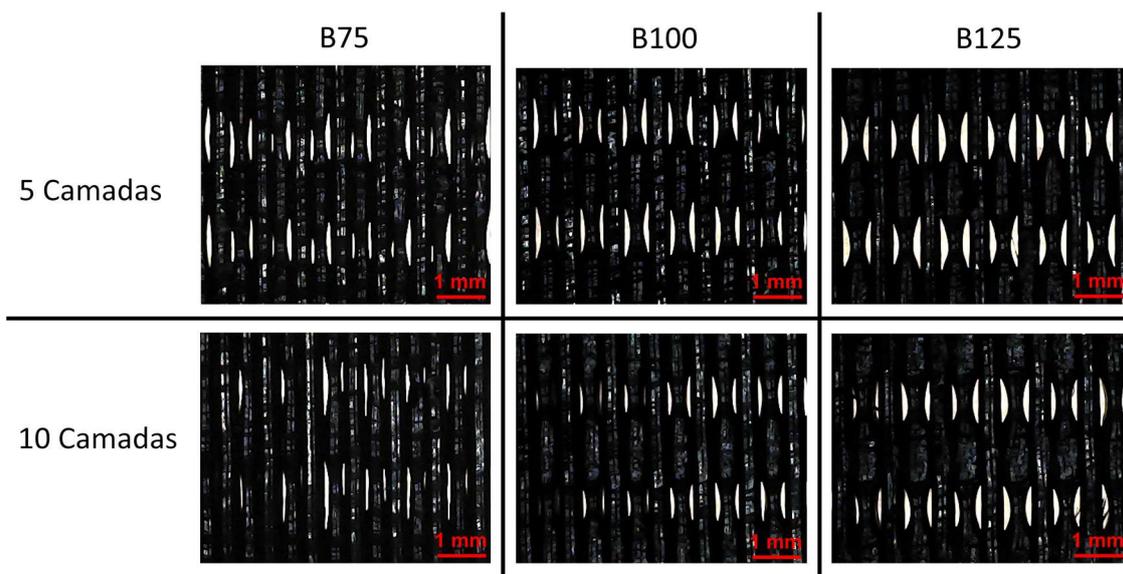
Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se que a deposição do material e a geometria dos poros obtidos é bastante condizente com o modelo teórico apresentado na Figura 28b. Os poros formados na camada possuem uma razão de aspecto maior que os obtidos pelas estratégias tradicionais de preenchimento *raster* e não possuem ramificações laterais, ou seja, não são conectados entre si no plano da camada. Dessa maneira, é gerado um caminho de fluxo preferencial através das conexões dos poros entre camadas, no sentido normal às mesmas.

#### 4.1.6 Obtenção da estrutura porosa tridimensional

As imagens de microscópio das amostras impressas com 5 e 10 camadas com as configurações presentes na Tabela 7 estão apresentadas na Figura 43.

**Figura 43 – Imagens de microscópio das amostras com maior número de camadas**



Fonte: Autoria própria (2022)

Pode ser observado que, aparentemente, houve o fechamento de alguns poros na amostra B75 com 5 camadas e nas amostras com 10 camadas (mais evidente nas configurações B75 e B100). Porém, ao analisar os MP visualmente, foi possível concluir que isso ocorria devido à pequenos desalinhamentos na região dos trechos finos, sendo que quanto maior o número de camadas, mais visível seria a soma dos desalinhamentos. Isso pode ser compreendido como uma pequena tortuosidade dos poros entre camadas. Como o microscópio utiliza

uma luz artificial abaixo das amostras, a luz não consegue atravessar os poros que estão muito desalinhados, portanto os mesmos não podem ser observados no equipamento. Por esse motivo, torna-se necessária a caracterização da estrutura porosa do preenchimento segmentado por  $\mu$ CT, o que possibilitará a visualização de toda estrutura independentemente da quantidade de camadas da amostra.

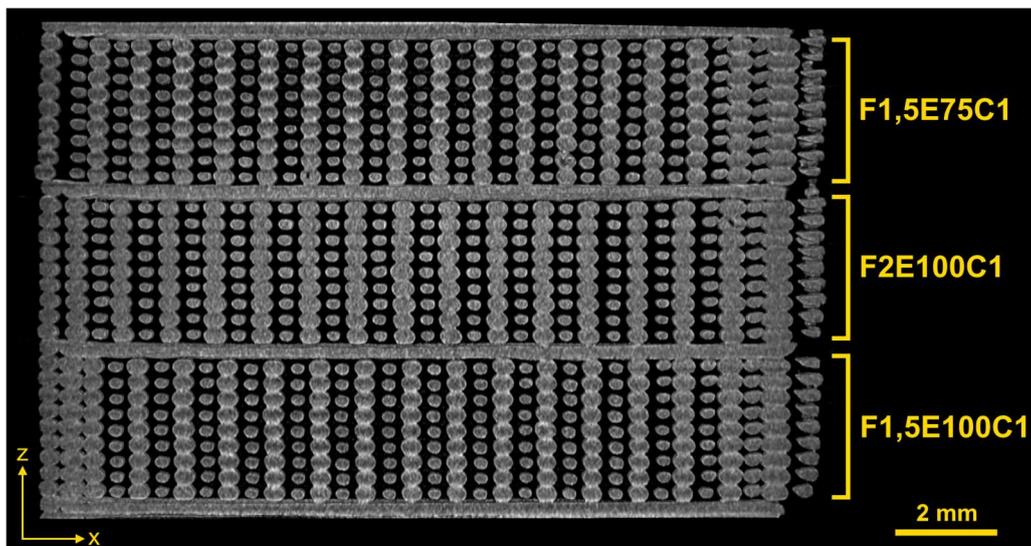
#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO POR MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA ( $\mu$ CT)

Na Figura 44 são apresentadas as imagens das seções de corte vertical (X-Z) dos modelos  $\mu$ CT das duas amostras, sendo Z a direção de construção. O plano de corte foi posicionado normal à e no meio dos trechos finos. A camada densa posicionada entre as configurações facilitou a visualização das mesmas.

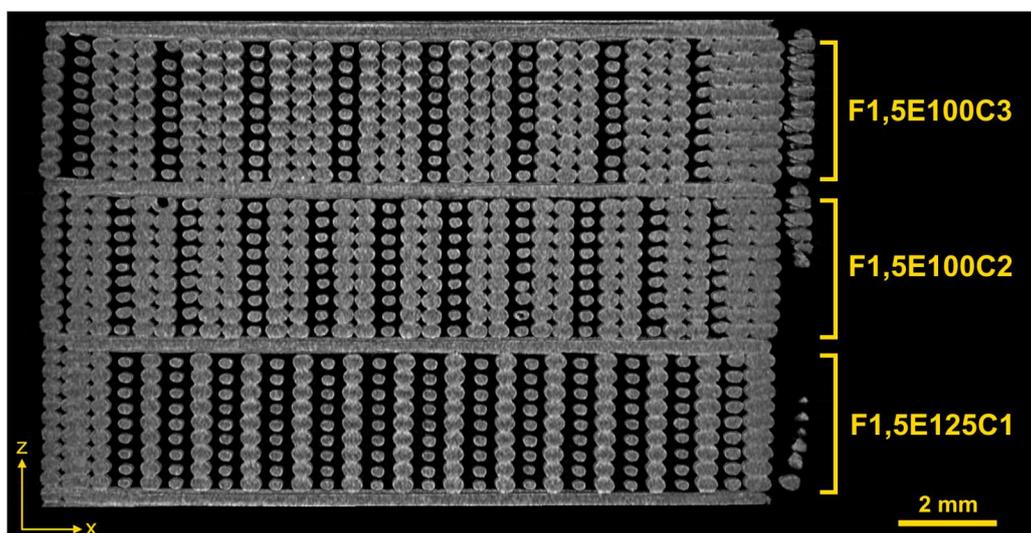
Uma visão mais detalhada da estrutura porosa interna de cada configuração pode ser observada na Figura 45, que apresenta planos de corte nas direções horizontal (X-Y) e vertical (X-Z). As seções de corte horizontais (X-Y), apresentadas no lado esquerdo da Figura 45, foram extraídas, aproximadamente, no meio da espessura da camada, representando a largura máxima dos filamentos. Nesse momento, tomou-se cuidado para que a camada da configuração a ser representada no plano X-Y estivesse o mais próximo possível do centro das configurações. Ou seja, evitou-se que a camada representada nesse corte fosse uma das primeiras ou últimas entre as 9 existentes. Os dois planos de corte verticais (X-Z), apresentados do lado direito da figura, foram posicionados normais aos trechos finos e grossos, como indicado pelas linhas amarelas tracejadas.

Nota-se que as seções de corte horizontais (X-Y) apresentadas na Figura 45 são bastante similares às estruturas mostradas nas Figuras 42 e 43, e estão de acordo com o modelo teórico da Figura 28b. Contudo, a visualização dos MP por microtomografia permitiu observar de maneira mais detalhada a formação dos poros e as adesões entre filamentos, quando comparada às imagens obtidas pelo microscópio.

Figura 44 – Seção de corte vertical (X-Z) dos modelos  $\mu$ CT: (a) Amostra I e (b) Amostra II



(a)



(b)

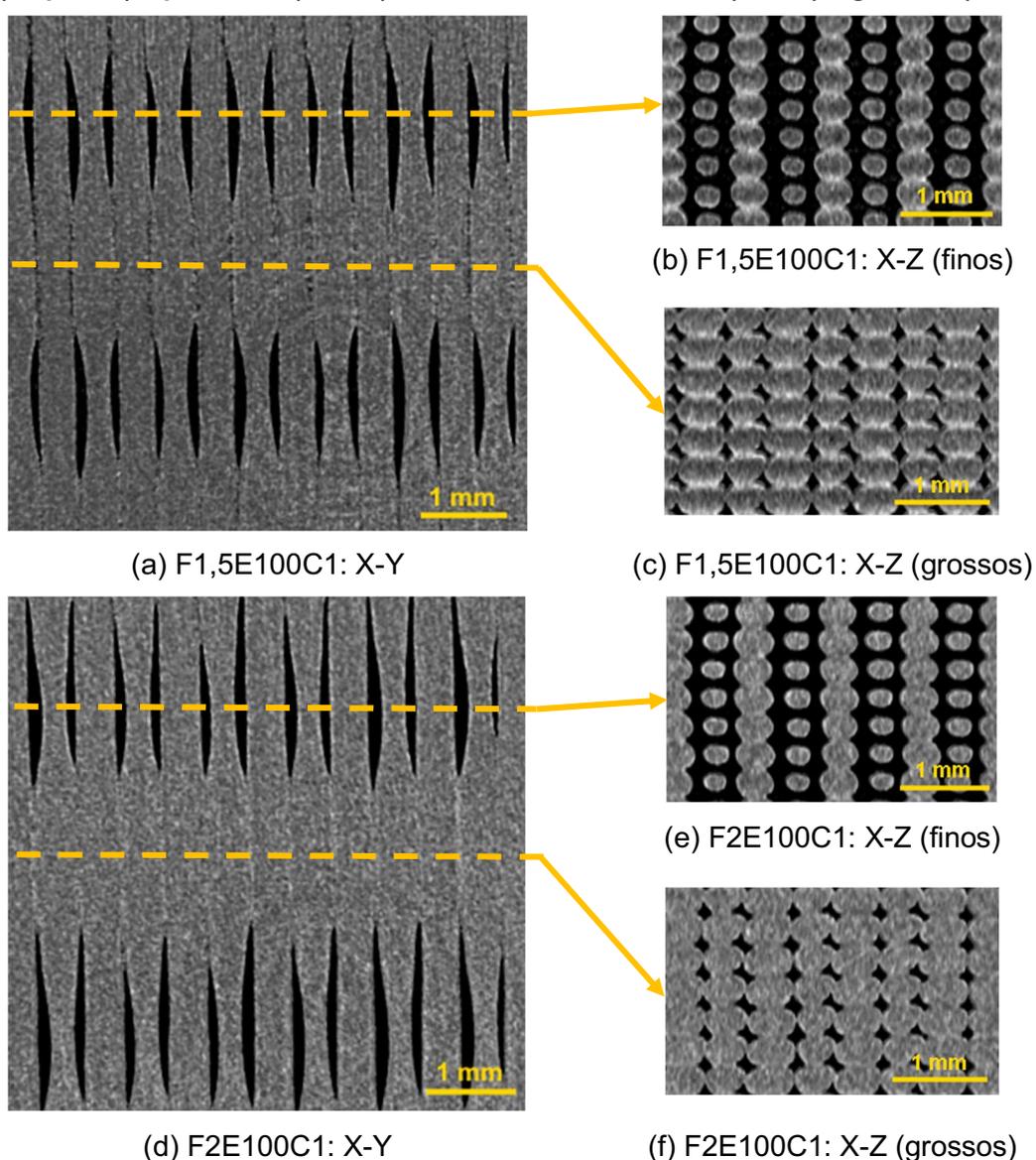
Fonte: Autoria própria (2022)

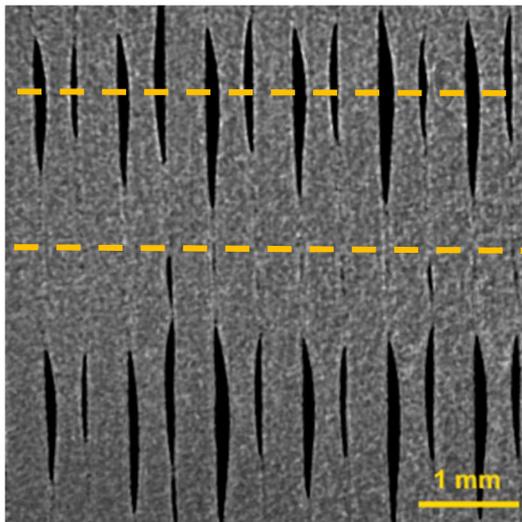
As Figuras 45a e d mostram que, como esperado, a configuração F2E100C1 apresentou poros mais alongados do que a F1,5E100C1, uma vez que possui maior comprimento de trechos finos (2 e 1,5 mm, respectivamente).

Comparando as Figuras 45a, g e j é possível observar o efeito da variação da taxa de extrusão na largura dos poros obtidos entre as configurações F1,5E100C1, F1,5E75C1 e F1,5E125C1. A configuração F1,5E125C1 (Figura 45j) apresenta os poros mais largos, uma vez que seus trechos grossos apresentam maior largura e a distância entre linhas de *raster* S-C é maior. Já a configuração F1,5E75C1 (Figura 45g) possui os trechos mais finos, e,

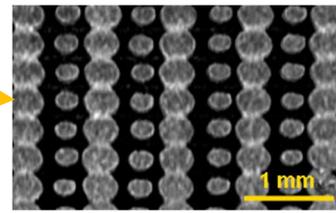
consequentemente, poros de menor largura. Nesta mesma configuração observa-se que, em alguns pontos, os filamentos contínuos não estão totalmente aderidos aos trechos grossos. Além disso, esta configuração apresenta uma maior variação no tamanho dos poros. Como já foi mencionado, isso deve às menores dimensões envolvidas nesta configuração (devido à baixa extrusão e distância entre as linhas), que acaba sendo mais influenciada pela resolução do equipamento.

**Figura 45 – Seções de corte dos modelos  $\mu$ CT de cada configuração: plano X-Y (esquerda) e plano X-Z (direita), normal aos trechos finos (acima) e grossos (abaixo)**

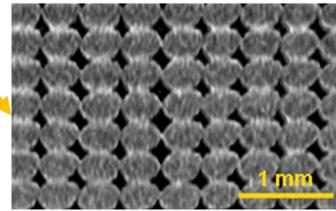




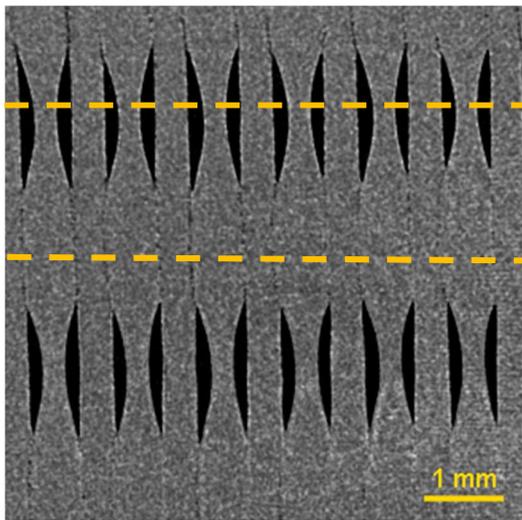
(g) F1,5E75C1: X-Y



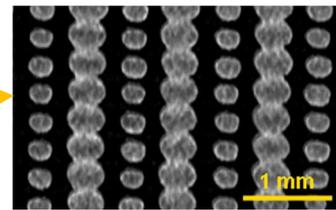
(h) F1,5E75C1: X-Z (finos)



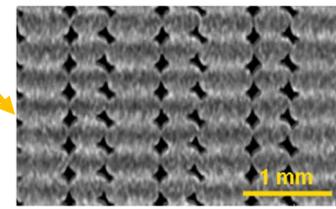
(i) F1,5E75C1: X-Z (grossos)



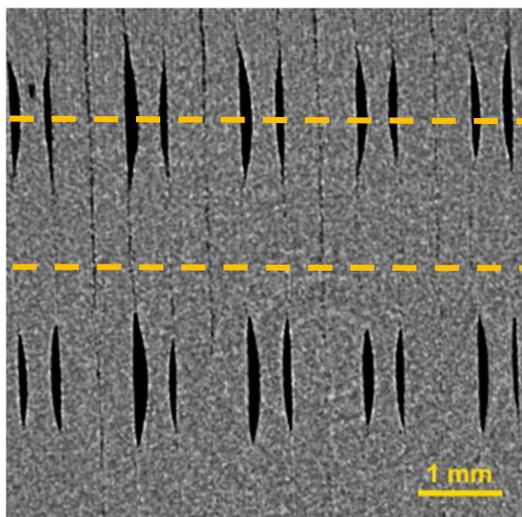
(j) F1,5E125C1: X-Y



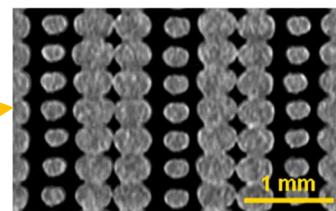
(k) F1,5E125C1: X-Z (finos)



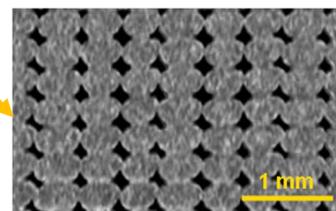
(l) F1,5E125C1: X-Z (grossos)



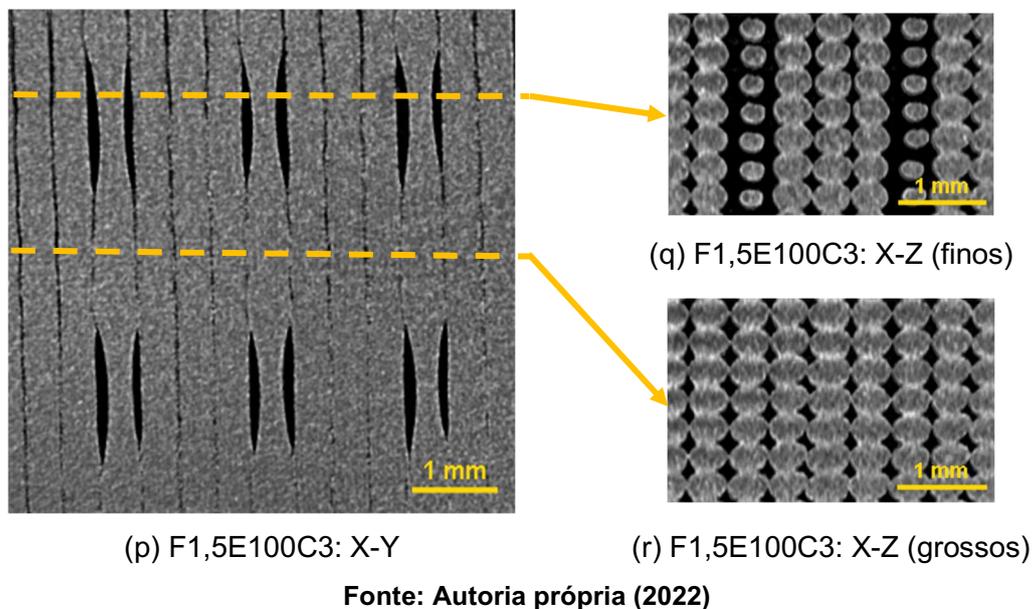
(m) F1,5E100C2: X-Y



(n) F1,5E100C2: X-Z (finos)



(o) F1,5E100C2: X-Z (grossos)



Em todas as configurações, as seções de corte vertical (X-Z) na região dos trechos finos (Figuras 45b, e, h, k, n e q) mostram que esses trechos se encontram isolados (distantes) dos filamentos adjacentes, resultado na formação de poros ao redor do filamento segmentado. Já as seções de corte na região dos trechos grossos (Figuras 45c, f, i, l, o e r) demonstram a aderência entre os filamentos segmentados e os filamentos contínuos, assim como planejado. Portanto, nessa região não há a formação dos poros, com exceção de pequenas variações da impressora e dos vazios esperados devido ao formato elíptico dos filamentos – característico dos processos AM de extrusão de material. As configurações F1,5E100C1, F2E100C1, F1,5E75C1 e F1,5E125C1 (Figuras 45b, e, h e k, respectivamente) apresentaram estruturas porosas bastante similares, apenas com pequenas variações na largura dos filamentos e na distância entre linhas de *raster*. Na Figura 45k (F1,5E125C1) nota-se uma maior distância entre os trechos finos e os filamentos contínuos, resultando em poros de maior largura (como também pode ser observado na Figura 45j). Nessa mesma configuração, a Figura 45l mostra a formação de trechos grossos de maior largura, devido à alta taxa de extrusão aplicada nas linhas segmentadas (125%).

Nas Figuras 45m-r pode-se observar que a densidade de poros na camada diminui com a adição de linhas contínuas entre as segmentadas, nas configurações F1,5E100C2 e F1,5E100C3. Observando as Figuras 45m e p,

nota-se que nessas configurações houve uma má adesão de alguns filamentos do preenchimento. Isso demonstra que o valor escolhido do parâmetro de distância entre as linhas de *raster* (S-C e C-C) pode não ter sido adequado para esses casos. Esse efeito fica evidente na Figura 45q, na qual alguns dos filamentos contínuos não estão unidos lateralmente. Isso demonstra uma possível necessidade de otimizar o método de obtenção do parâmetro de distância entre as linhas ideal para cada configuração. O valor desse parâmetro foi obtido de forma que o *gap* entre os trechos grossos e filamentos contínuos fosse nulo (zero). Entretanto, um *gap* um pouco negativo poderia ter apresentado melhor adesão nos filamentos das amostras, especialmente nos filamentos contínuos da amostra F1,5E100C3.

No geral, os resultados observados nas Figuras 44 e 45 confirmam que a impressora 3D foi capaz de fabricar as estruturas porosas planejadas utilizando o preenchimento proposto nesse trabalho. Os parâmetros que foram variados entre as configurações tornaram possível o controle das dimensões e densidade dos poros nos MP, dentro de alguns limites do processo, como a distância de estabilização da largura e resolução do equipamento.

#### 4.3 ENSAIOS DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE

A Figura 46 apresenta uma das amostras cilíndricas, impressa em aproximadamente 1 hora e 45 minutos.

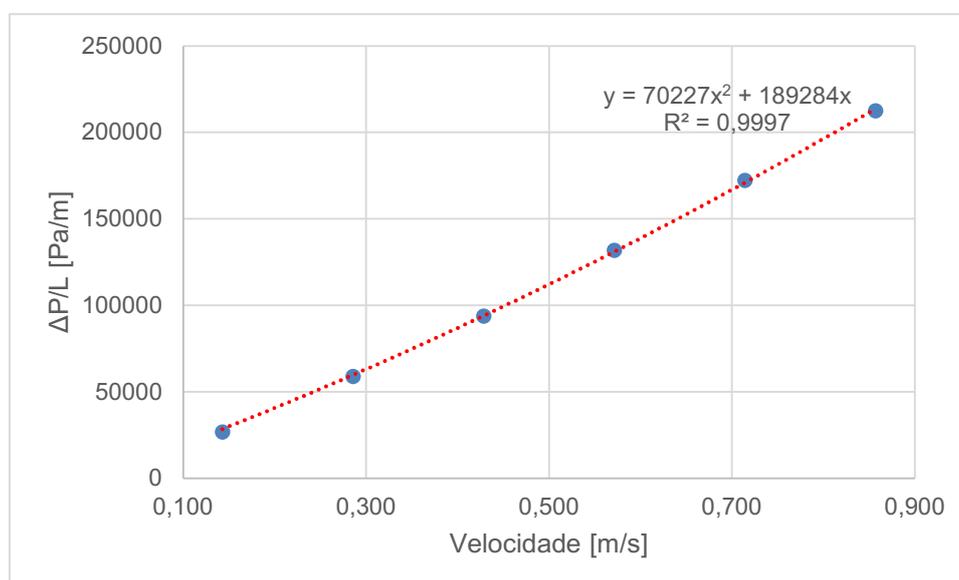
**Figura 46 – MP cilíndrico impresso utilizando deposição segmentada**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os valores de queda de pressão mensurados experimentalmente do permeâmetro estão apresentados no Apêndice B. Com esses valores e os dados das Tabelas 9 e 10, foram construídos os gráficos que relacionam a queda de pressão por comprimento do MP com a velocidade do fluido para cada uma das configurações. No Gráfico 4 são apresentados os resultados para a configuração F1,5E100C1, juntamente com a regressão linear dos valores medidos e a equação que rege a curva obtida. Os gráficos das demais configurações encontram-se no Apêndice B.

**Gráfico 4 – Curva obtida por regressão linear a partir das quedas de pressão mensuradas com a configuração F1,5E100C1**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Utilizando os coeficientes das equações de regressão linear e os dados da Tabela 10 foram realizados os cálculos dos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$ , presentes no Apêndice B. As médias dos valores de porosidade efetiva ( $\phi$ ) e permeabilidade Darciana ( $k_1$ ) de cada uma das configurações são apresentados na Tabela 17.

Comparando as configurações F1,5E100C1 e F2E100C1 nota-se que seus valores de porosidade e permeabilidade são bastante similares, mostrando que ao aumentar o tamanho do trecho fino de 1,5 para 2 mm não houve grande variação nessas propriedades. Como a configuração F2E100C1 apresenta poros de maior comprimento, era esperado que a mesma possuísse maior porosidade. Contudo, vale lembrar que todas as amostras foram fabricadas com as mesmas

dimensões, e ao aumentar o tamanho do poro, menos poros poderão ser distribuídos na camada, explicando a baixa variação de porosidade nesse caso (menos de 1%). Já no valor de permeabilidade, esta mesma configuração apresentou um pequeno aumento (de 3,5%), provavelmente por possuir os poros ligeiramente mais compridos.

**Tabela 17 – Porosidade efetiva e permeabilidade dos MP fabricados**

<b>Configuração</b>	<b>Porosidade efetiva <math>\phi</math> [%]</b>	<b>Permeabilidade <math>k_1</math> [D]</b>
F1,5E100C1	22,49	100,09
F2E100C1	22,29	103,57
F1,5E75C1	23,59	73,96
F1,5E125C1	21,27	182,83
F1,5C100C2	18,97	66,05
F1,5C100C3	17,33	57,83
Raster	31,02	223,46

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Observando os resultados das configurações em que há apenas variação na taxa de extrusão entre si (F1,5E75C1, F1,5E100C1 e F1,5E125C1), nota-se que o aumento desse parâmetro gera uma redução na porosidade e um aumento da permeabilidade. Ao aumentar o valor da extrusão, os poros obtidos são mais largos, e dessa maneira menos poros são fabricados na camada, já que a amostra apresenta dimensões fixas (como já comentado). Entretanto, os poros mais largos permitem um melhor escoamento através do MP, resultando em um valor maior de permeabilidade. A configuração F1,5E75C1 apresenta uma redução de 26% e a configuração F1,5E125C1 um aumento de 83% em suas permeabilidades em relação à configuração F1,5E100C1.

Nas duas configurações em que houve aumento do número de linhas contínuas entre as segmentadas (F1,5E100C2 e F1,5E100C3) observa-se redução em ambos os parâmetros de porosidade e permeabilidade, quando comparadas à configuração com apenas uma linha contínua (F1,5E100C1). Isso ocorre devido à redução da densidade de poros na camada ao se adicionar os filamentos contínuos, sendo a redução dos parâmetros maior quando mais linhas são utilizadas.

Por fim, nota-se que a configuração Raster apresentou valores maiores de porosidade e permeabilidade quando comparados às demais configurações obtidas por preenchimento segmentado. Comparando a configuração F1,5E100C1 com a Raster, observa-se uma redução de 27% na porosidade e de 55% na permeabilidade. Esses resultados mostram que a estrutura obtida pelo preenchimento segmentado apresenta poros com maior razão de aspecto e com menos interconectividade que o preenchimento *raster* tradicional. Lembrando que ambas as amostras foram fabricadas em um corpo cilíndrico com as mesmas dimensões e com os mesmos parâmetros básicos de impressão (espessura de camada, largura de filamento contínuo, número de contornos), sendo que o *gap* da configuração Raster foi definido de maneira que ambas as amostras apresentassem poros da mesma largura (aproximadamente 0,12 mm).

Pode-se concluir que a variação dos parâmetros dentro do preenchimento segmentado é capaz de gerar alterações na estrutura porosa, influenciando as características de porosidade e permeabilidade do MP, porém obtendo-se menor conectividade dos poros no interior da peça.

## 5 CONCLUSÕES

Um método inovador para impressão de meios porosos (MP) com a tecnologia AM de extrusão de material foi apresentado neste trabalho. A estratégia proposta baseia-se na aplicação de filamentos extrudados com largura variável, obtidos alterando os parâmetros de velocidade de impressão e taxa de extrusão durante a deposição das linhas de preenchimento.

Seguindo o modelo teórico proposto, o método foi desenvolvido com parâmetros de processo capazes de controlar a deposição do material, intercalando filamentos de largura constante com filamentos de largura variável. O algoritmo foi implementado com sucesso no software RP3, possibilitando a variação desses parâmetros em segmentos das linhas de *raster*.

Para a obtenção da estrutura porosa desejada com o método proposto é fundamental a realização de testes preliminares que visam o estudo do comportamento da impressora e a definição dos valores dos parâmetros necessários. Assim, para facilitar a aplicação do método em equipamentos diferentes dos utilizados neste trabalho, foi elaborado um procedimento com os principais passos para a obtenção do preenchimento segmentado.

Os resultados dos ensaios realizados nos MP fabricados mostraram que a impressora 3D utilizada foi capaz de reproduzir o padrão de preenchimento proposto. O método proposto, aplicado à uma estratégia de preenchimento do tipo *raster*, resultou em uma estrutura porosa única. A estrutura apresentou poros menores (com maior razão de aspecto) e com menor interconectividade no interior do MP, quando comparada à estrutura obtida com preenchimento *raster* tradicional. As dimensões e densidade dos poros puderam ser controladas, dentro de limites do método, variando os parâmetros da deposição segmentada.

Como consequência, as características de porosidade e permeabilidade da nova estrutura porosa foram também distintas das obtidas com preenchimento *raster* tradicional. Com preenchimento segmentado foram obtidos valores de porosidade efetiva entre 17,33 a 23,59% e de permeabilidade entre 57,83 a 182,83 D, enquanto a configuração com preenchimento *raster* tradicional apresentou porosidade de 31,02% e permeabilidade de 223,46 D. Em amostras de mesma dimensão e com parâmetros de impressão básicos semelhantes, a configuração com o preenchimento proposto apresentou uma

redução de 27% na porosidade e de 55% na permeabilidade quando comparada ao preenchimento *raster* tradicional. Essas características da estrutura porosa podem ser vantajosas para algumas aplicações específicas.

Por se tratar de uma técnica inovadora, este trabalho contribuí para o avanço da tecnologia de AM por extrusão de material e abre oportunidades para novos estudos, seja procurando aprimorar o método ou encontrando novas aplicações para o mesmo. Tem-se a expectativa que a deposição segmentada possa ser explorada com outras estratégias de preenchimento e até em outras tecnologias de AM, o que abrirá várias novas oportunidades de pesquisas.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora os resultados apresentados demonstrem que o preenchimento proposto pode ser gerado na impressora 3D, ainda existem pontos que requerem um melhor entendimento para aprimorar ainda mais o controle da variação da largura dos filamentos. Por exemplo, a influência da taxa de extrusão e velocidade de impressão no desvio das larguras dos segmentos em diferentes regiões da peça. Além disso, a distância de estabilização da largura para os segmentos grossos precisa ser estudada para identificar o comprimento máximo que pode ser utilizado (da mesma maneira que foi realizado para os segmentos finos). Adicionalmente, um ajuste da obtenção do parâmetro de distância entre linhas *raster* pode ser considerado.

Como este trabalho apresenta uma nova estratégia de deposição, os seguintes estudos sugeridos podem ser considerados:

- Testar com outros materiais de impressão (ABS, PETG, material solúvel, etc.)
- Variar o ângulo de *raster* entre camadas utilizando a deposição segmentada;
- Possibilitar desalinhamento dos poros entre as camadas, gerando diferentes tortuosidades na estrutura porosa;
- Aplicar a deposição segmentada em outras estratégias de preenchimento, como por exemplo no preenchimento do tipo *contour* (ou concêntrico);

- Testar o conceito da deposição segmentada em outras tecnologias de AM.

## REFERÊNCIAS

AKHOUNDI, B.; BEHRAVESH, A. H. Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products. **Experimental Mechanics**, vol. 59, no. 6, p. 883–897, 2019.

BERG, Carl Fredrik. Permeability Description by Characteristic Length, Tortuosity, Constriction and Porosity. **Transport in Porous Media**, vol. 103, no. 3, p. 381–400, 2014.

BRACE, W. F. Permeability From Resistivity and Pore Shape. **J Geophys Res**, vol. 82, no. 23, p. 3343–3349, 1977.

CHENG, Arthur; TOKSÖZ, M. N. Pore Aspect Ratio Spectrum of a Rock. **Geophysical, Journal O F**, vol. 84, no. 9, 1979.

CHIN ANG, Ker; FAI LEONG, Kah; KAI CHUA, Chee; CHANDRASEKARAN, Margam. Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 12, no. 2, p. 100–105, 2006.

COLOMBO, P.; DEGISCHER, H. P. Highly porous metals and ceramics. **Materials Science and Technology**, vol. 26, no. 10, p. 1145–1158, 2010.

DIAS, M. R.; FERNANDES, P. R.; GUEDES, J. M.; HOLLISTER, S. J. Permeability analysis of scaffolds for bone tissue engineering. **Journal of Biomechanics**, vol. 45, no. 6, p. 938–944, 2012.

DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic; LI, Huijun; VAN DUIN, Stephen; LARKIN, Nathan. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 39, p. 32–42, 2016.

DONG, Guoying; TANG, Yunlong; ZHAO, Yaoyao Fiona. A Survey of Modeling of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing. **Journal of Mechanical Design**, vol. 139, no. 10, 2017.

EGAN, Paul F.; GONELLA, Veronica C.; ENGENSERGER, Max; FERGUSON, Stephen J.; SHEA, Kristina. Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing. **PLoS ONE**, vol. 12, no. 8, p. 1–20, 2017.

ENTEZARI, Ali; ROOHANI, Iman; LI, Guanglong; DUNSTAN, Colin R.; ROGNON, Pierre; LI, Qing; JIANG, Xinquan; ZREIQAT, Hala. Architectural Design of 3D Printed Scaffolds Controls the Volume and Functionality of Newly Formed Bone. **Advanced Healthcare Materials**, vol. 8, no. 1, p. 1–12, 2019.

EXTRUDABLE.ME. Exploring Extrusion, 2013: Variability and Limits. Disponível em: <https://www.extrudable.me/2013/04/18/exploring-extrusion-variability-and-limits/>. Acesso em: 9 de maio de 2022.

FIELDING, Gary; BOSE, Susmita. SiO<sub>2</sub> and ZnO dopants in three-

dimensionally printed tricalcium phosphate bone tissue engineering scaffolds enhance osteogenesis and angiogenesis in vivo. **Acta Biomaterialia**, vol. 9, no. 11, p. 9137–9148, 2013.

FOGLIATTO, Aloysio Arthur Becker. **Influência De Parâmetros Do Processo De Fusão Em Leito De Pó Na Porosidade E Permeabilidade De Filtros De Aço Inoxidável Fabricados Com Grada- Ção Funcional**. 2018. 299 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

FU, Jinlong; THOMAS, Hywel R.; LI, Chenfeng. Tortuosity of porous media: Image analysis and physical simulation. **Earth-Science Reviews**, vol. 212, no. October 2020, p. 103439, 2021.

GHANBARIAN, Behzad; HUNT, Allen G.; EWING, Robert P.; SAHIMI, Muhammad. Tortuosity in Porous Media: A Critical Review. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 77, no. 5, p. 1461–1477, 2013.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer, 2010.

GUDDATI, Subhash; KIRAN, A. Sandeep Kranthi; LEAVY, Montray; RAMAKRISHNA, Seeram. Recent advancements in additive manufacturing technologies for porous material applications. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 105, no. 1–4, p. 193–215, 2019.

HO, Saey Tuan; HUTMACHER, Dietmar W. A comparison of micro CT with other techniques used in the characterization of scaffolds. **Biomaterials**, vol. 27, no. 8, p. 1362–1376, 2006.

HORNUS, Samuel; KUIPERS, Tim; DEVILLERS, Olivier; TEILLAUD, Monique; MARTÍNEZ, Jonàs; GLISSE, Marc; LAZARD, Sylvain; LEFEBVRE, Sylvain. Variable-width contouring for additive manufacturing. **ACM Transactions on Graphics**, vol. 39, no. 4, 2020.

INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer. **Cerâmica**, vol. 45, no. 292–293, p. 61–67, 1999.

ISHUTOV, Sergey; JOBE, T. Dawn; ZHANG, Shuo; GONZALEZ, Miguel; AGAR, Susan M.; HASIUK, Franciszek J.; WATSON, Francesca; GEIGER, Sebastian; MACKAY, Eric; CHALATURNYK, Richard. Three-dimensional printing for geoscience: Fundamental research, education, and applications for the petroleum industry. **AAPG Bulletin**, vol. 102, no. 1, p. 1–26, 2018.

JIN, Yuan; DU, Jianke; MA, Zhiyong; LIU, Anbang; HE, Yong. An optimization approach for path planning of high-quality and uniform additive manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 92, no. 1–4, p. 651–662, 2017.

KALITA, Samar Jyoti; BOSE, Susmita; HOSICK, Howard L.; BANDYOPADHYAY, Amit. Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling. **Materials Science and**

**Engineering C**, vol. 23, no. 5, p. 611–620, 2003.

KEEHM, Y. Computational Rock Physics : Transport Properties in Porous Media and Applications. no. January, p. 135, 2003. .

KOPONEN, A.; KATAJA, M.; TIMONEN, J. Permeability and effective porosity of porous media. **Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics**, vol. 56, no. 3, p. 3319–3325, 1997.

KRAMBECK, Larissa; BARTMEYER, Guilherme Antonio; FUSÃO, Davi; ANTONINI ALVES, Thiago. Determinação Experimental Da Permeabilidade De Uma Estrutura Capilar De Pó De Cobre Sinterizado Utilizada Em Tubos De Calor. **Anais do XVIII CONEMI - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial**. Joinville, 2018.

KUIPERS, Tim; DOUBROVSKI, Eugeni L.; WU, Jun; WANG, Charlie C.L. A Framework for Adaptive Width Control of Dense Contour-Parallel Toolpaths in Fused Deposition Modeling. **CAD Computer Aided Design**, vol. 128, 2020.

LAGE, J.L. The Fundamental Theory of Flow Through Permeable media From Darcy to Turbulence. **Transport Phenomena in Porous Media**, p. 1–30, 1998.

LEE, Jung-Bin; MAENG, Woo-Youl; KOH, Young-Hag; KIM, Hyoun-Ee. Porous calcium phosphate ceramic scaffolds with tailored pore orientations and mechanical properties using lithography-based ceramic 3D printing technique. **Materials**, vol. 11, no. 9, 2018.

LEE, Jung Seob; CHA, Hwang Do; SHIM, Jin Hyung; JUNG, Jin Woo; KIM, Jong Young; CHO, Dong Woo. Effect of pore architecture and stacking direction on mechanical properties of solid freeform fabrication-based scaffold for bone tissue engineering. **Journal of Biomedical Materials Research - Part A**, vol. 100 A, no. 7, p. 1846–1853, 2012.

LIU, Peisheng; CHEN, Guo-Feng. **Porous Materials: Processing and Applications**. 1st ed. Waltham: Butterworth-Heinemann, 2014.

MALAYERI, Atra; SHERBORNE, Colin; PATERSON, Thomas; MITTAR, Shweta; ASECIO, Ildia Ortega; HATTON, Paul V.; CLAEYSSSENS, Frederik. Osteosarcoma growth on trabecular bone mimicking structures manufactured via laser direct write. **International Journal of Bioprinting**, vol. 2, no. 2, p. 67–77, 2016.

MAYS, T. J. A new classification of pore sizes. **Studies in Surface Science and Catalysis**, vol. 160, no. 0, p. 57–62, 2007.

MICHAILIDIS, Nikolaos; TSOUKNIDAS, Alexander; LEFEBVRE, Louis Philippe; HIPKE, Thomas; KANETAKE, Naoyuki. Production, characterization, and applications of porous materials. **Advances in Materials Science and Engineering**, vol. 2014, p. 2–4, 2014.

MONTAZERIAN, H.; ZHIANMANESH, M.; DAVOODI, E.; MILANI, A. S.; HOORFAR, M. Longitudinal and radial permeability analysis of additively

manufactured porous scaffolds: Effect of pore shape and porosity. **Materials and Design**, vol. 122, p. 146–156, 2017.

MORONI, L.; DE WIJN, J. R.; VAN BLITTERSWIJK, C. A. 3D fiber-deposited scaffolds for tissue engineering: Influence of pores geometry and architecture on dynamic mechanical properties. **Biomaterials**, vol. 27, no. 7, p. 974–985, 2006.

NIELD, Donald A.; BEJAN, Adrian. **Convection in Porous Media**. 3rd ed. New York: Springer, 2013.

NISHIHORA, Rafael Kenji; RACHADEL, Priscila Lemes; QUADRI, Mara Gabriela Novy; HOTZA, Dachamir. Manufacturing porous ceramic materials by tape casting—A review. **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 38, no. 4, p. 988–1001, 2018.

NYBERG, Ethan; O’SULLIVAN, Aine; GRAYSON, Warren. ScafSlicr: A MATLAB-based slicing algorithm to enable 3D-printing of tissue engineering scaffolds with heterogeneous porous microarchitecture. **PLoS ONE**, vol. 14, no. 11, p. 3–10, 2019.

PENNELLA, F.; CERINO, G.; MASSAI, D.; GALLO, D.; FALVO D’URSO LABATE, G.; SCHIAVI, A.; DERIU, M. A.; AUDENINO, A.; MORBIDUCCI, Umberto. A survey of methods for the evaluation of tissue engineering scaffold permeability. **Annals of Biomedical Engineering**, vol. 41, no. 10, p. 2027–2041, 2013.

ROUQUEROL, J.; AVNIR, D.; FAIRBRIDGE, C. W.; EVERETT, D. H.; HAYNES, J. H.; PERNICONE, N.; RAMSAY, J. D. F.; SING, K. S. W.; UNGER, K. K. Recommendations for the characterization of porous solids. **Pure and Applied Chemistry**, vol. 66, no. 8, p. 1739–1758, 1994.

SHIGUEOKA, Marcelo Okada. **Desenvolvimento de estratégias de preenchimento para obter meios porosos tipo lattice por manufatura aditiva por extrusão de material com análise de permeabilidade**. 2019. 120 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

SHIGUEOKA, Marcelo Okada; JUNQUEIRA, S. L de M.; ALVES, Thiago Antonini; VOLPATO, Neri. Permeability Analysis of Polymeric Porous Media Obtained by Material Extrusion Additive Manufacturing. **30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, SFF 2019**, , p. 2245–2253, 2019.

SHIGUEOKA, Marcelo Okada; VOLPATO, Neri. Expanding manufacturing strategies to advance in porous media planning with material extrusion additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, vol. 38, dezembro 2020, p. 101760, 2021.

SLIC3R MANUAL. Slic3r. Disponível em: <https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings#infill-patterns>. Acesso em: 27 de maio de 2021.

SOBRAL, Jorge M.; CARIDADE, Sofia G.; SOUSA, Rui A.; MANO, João F.;

- REIS, Rui L. Three-dimensional plotted scaffolds with controlled pore size gradients: Effect of scaffold geometry on mechanical performance and cell seeding efficiency. **Acta Biomaterialia**, vol. 7, no. 3, p. 1009–1018, 2011.
- STOFFREGEN, Hanns; FISCHER, J.; SIEDELHOFER, C.; ABELE, E. Selective laser melting of porous structures. **22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011**, , p. 380–395, 2011.
- TOO, M. H.; LEONG, K. F.; CHUA, C. K.; CHEAH, C. M.; HO, S. L. Feasibility of tissue engineering scaffold fabrication using fused deposition modelling. **ANZIIS 2001 - Proceedings of the 7th Australian and New Zealand Intelligent Information Systems Conference**, 2001, p. 433–438, 2001.
- TRONVOLL, Sigmund Arntsønn; POPP, Sebastian; ELVERUM, Christer Westum; WELO, Torgeir. Investigating pressure advance algorithms for filament-based melt extrusion additive manufacturing: theory, practice and simulations. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 25, no. 5, p. 830–839, 2019.
- TURNER, Brian N.; STRONG, Robert; GOLD, Scott A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 20, no. 3, p. 192–204, 2014.
- VOLPATO, N.; CARVALHO, J. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. *In*: VOLPATO, N. (ed.). **Manufatura Aditiva - Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.
- VOLPATO, N.; FOGGIATTO, J. A. The development of a generic Rapid Prototyping process planning system. **Innovative Developments in Design and Manufacturing - Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping**, , p. 381–387, 2010.
- VOLPATO, Neri. Processos de AM por extrusão de material. *In*: VOLPATO, Neri (ed.). **Manufatura Aditiva - Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.
- WALEJEWSKA, Ewa; IDASZEK, Joanna; HELJAK, Marcin; CHLANDA, Adrian; CHOINSKA, Emilia; HASIRCI, Vasif; SWIESZKOWSKI, Wojciech. The effect of introduction of filament shift on degradation behaviour of PLGA- and PLCL-based scaffolds fabricated via additive manufacturing. **Polymer Degradation and Stability**, vol. 171, maio, 2019.
- WANG, F.; SHOR, L.; DARLING, A.; KHALIL, S.; SUN, W.; GÜÇERI, S.; LAU, A. Precision extruding deposition and characterization of cellular poly- $\epsilon$ -caprolactone tissue scaffolds. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 10, no. 1, p. 42–49, 2004.
- WANG, Jun; CHEN, Ting-wei; JIN, Yu-an; HE, Yong. Variable bead width of material extrusion-based additive manufacturing. **Journal of Zhejiang University: Science A**, vol. 20, no. 1, p. 73–82, 2019.
- WOO JUNG, Jin; GYEONG YI, Hee; YUN KANG, Tae; JAE YONG, Woon; JIN,

Songwan; SOO YUN, Won; WOO CHO, Dong. Evaluation of the effective diffusivity of a freeform fabricated scaffold using computational simulation. **Journal of Biomechanical Engineering**, vol. 135, no. 8, p. 1–7, 2013.

WU, Dingcai; XU, Fei; SUN, Bin; FU, Ruowen; HE, Hongkun; MATYJASZEWSKI, Krzysztof. Design and preparation of porous polymers. **Chemical Reviews**, vol. 112, no. 7, p. 3959–4015, 2012.

XIONG, Yi; PARK, Sang In; PADMANATHAN, Suhasini; DHARMAWAN, Audelia Gumarus; FOONG, Shaohui; ROSEN, David William; SOH, Gim Song. Process planning for adaptive contour parallel toolpath in additive manufacturing with variable bead width. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 105, no. 10, p. 4159–4170, 2019.

YANG, Bin; KANG, Yili; LU, Xiaofeng; YOU, Lijun; ZHANG, Hao; CHEN, Zhangxin. Experimental investigation of the pore shape factor in fluid imbibition model---taking the Longmaxi shale in Sichuan Basin as examples. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, vol. 193, no. April, p. 107327, 2020.

ZEIN, Iwan; HUTMACHER, Dietmar W.; TAN, Kim Cheng; TEOH, Swee Hin. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. **Biomaterials**, vol. 23, no. 4, p. 1169–1185, 2002.

ZHAI, Xiaoya; CHEN, Falai. Path Planning of a Type of Porous Structures for Additive Manufacturing. **CAD Computer Aided Design**, vol. 115, p. 218–230, 2019.

## APÊNDICE A - Procedimento para a utilização da deposição segmentada

Observação: para a aplicação deste método é necessário que a impressora 3D utilizada permita a variação dos parâmetros impressão ao longo da deposição e que o programa de planejamento de processo utilizado tenha a estratégia proposta implementada.

### 1° Passo – Definição dos parâmetros de impressão

Primeiramente, deve-se definir os seguintes parâmetros:

- Velocidade de impressão: aconselha-se uma velocidade de impressão baixa para não prejudicar o funcionamento dos motores de passo, pois a mesma será acelerada durante a deposição dos trechos finos e desacelerada nos trechos grossos. Neste trabalho, para PLA, empregou-se 15 mm/s, sugere-se iniciar com esse valor;
- Temperaturas (do bico extrusor e da plataforma de construção): adequadas ao material testado;
- Considerando um certo diâmetro do bico extrusor, espessura de camada: espessuras maiores achatam menos os filamentos. Não se explorou espessuras menores neste trabalho;
- Largura de extrusão: ver passo 2;
- Ângulo de *raster* na camada: neste trabalho, se manteve constante ao longo das camadas, mas isso não é uma limitação (deve ser explorado).

Esses parâmetros deverão ser mantidos tanto durante as etapas de calibração, ajustes e fabricação das estruturas porosas.

### 2° Passo – Calibração da extrusão

O equipamento deve garantir que os filamentos depositados apresentem as mesmas dimensões definidas no planejamento do processo. Para isso, o parâmetro que controla a extrusão da máquina deve ser calibrado.

Uma opção para esse procedimento é a impressão de uma peça simples (quadrado de 20 x 20 mm, com 10 camadas), planejada apenas com duas linhas de contorno (perímetro), sem nenhum preenchimento (0% de preenchimento) e sem nenhuma camada sólida. Isso vai gerar somente as paredes laterais da peça.

Após a impressão, as paredes da peça devem ser medidas. Caso a espessura das paredes seja diferente da largura de dois filamentos adjacentes, o parâmetro de extrusão deve ser ajustado e o processo repetido, até que seja definido o valor ideal desse parâmetro para a obtenção da largura desejada.

### 3° Passo – Nivelamento e distância do bico à plataforma de construção

A plataforma de construção deve ser nivelada de maneira que a primeira camada da peça não apresente um desvio elevado em relação às dimensões planejadas nos quatro pontos da área de impressão (varia com o tamanho do meio poroso pretendido). Para isso, o bico extrusor não pode estar muito próximo da plataforma, o que poderia achatá-la muito, mas também não deve estar afastado um valor que dificulte a adesão dos filamentos à plataforma. A distância do bico à plataforma pode variar em função do material sendo impresso, uma vez que alguns materiais precisam de uma melhor adesão da primeira camada para não ocorrer descolamento da peça. Neste trabalho, para PLA, foi utilizado o valor de distância do bico à plataforma que garantisse uma largura de 0,4mm do filamento, na primeira e nas demais camadas.

### 4° Passo – Definição dos parâmetros da deposição segmentada

Neste momento, o usuário deve definir a estrutura porosa que deseja fabricar, tendo uma ideia aproximada das dimensões dos poros e da densidade de poros na camada. Os parâmetros que devem ser definidos nesse momento são:

- Extrusão aplicada às linhas segmentadas;
- Tamanho de trecho fino;
- Tamanho de trecho grosso;

Além desses parâmetros, aconselha-se aplicar uma velocidade de impressão nos trechos finos que seja em torno de 200% da dos trechos grossos. Utilizando esta configuração, deverá ser impressa uma amostra de apenas uma camada, contendo filamentos espaçados de 2 mm entre si e intercalando linhas contínuas e segmentadas.

Após a impressão, a largura dos filamentos deverá ser medida em diversos pontos da peça. Nesse momento, deve-se obter a média das larguras de trecho grosso, trecho fino e filamentos contínuos. Também deve ser

observado o desvio de cada medida de largura realizado. Caso as larguras apresentem alta variação ao longo da peça, um ajuste da velocidade de trecho grosso deverá ser realizado e o processo repetido, até o valor do desvio ser próximo à resolução do equipamento utilizado.

#### 5° Passo – Cálculo das distâncias entre linhas de *raster*

Utilizando as médias das larguras obtidas no passo anterior, torna-se possível o cálculo das distâncias entre as linhas que resultará na estrutura porosa desejada.

Para o valor da distância entre linhas de *raster* S-C (entre uma linha contínua e uma segmentada), utiliza-se uma média entre a largura de trecho grosso e a largura do filamento contínuo. Caso o usuário vá utilizar mais de uma linha contínua no preenchimento, o valor da distância entre linhas de *raster* C-C (entre duas linhas contínuas) deverá ser o mesmo que a largura dos filamentos contínuos. Esses cálculos garantem a obtenção de um *gap* nulo, ou seja, de valor igual a 0. Caso o usuário deseje um *gap* diferente, basta apenas adicionar o valor desejado à distância calculada (no caso de *gap* negativo ocorrerá uma subtração).

#### 6° Passo – Impressão de uma camada

Com os parâmetros definidos, uma única camada da peça desejada deve ser impressa utilizando a distância entre linhas calculada. O resultado do preenchimento deve ser observado de alguma maneira, por exemplo, em um microscópio óptico.

Dica: a camada da peça pode ser colocada contra a luz, para que o usuário observe se existe a passagem de luz somente pelos poros gerados.

Caso os poros tenham se fechado nesse momento, o usuário deve aumentar o valor de distância entre as linhas de *raster* e repetir o processo. Já no caso de as linhas não apresentarem boa aderência lateral (filamentos muito afastados), esse parâmetro deve ser reduzido. Lembrando que a plataforma de construção deve estar bem nivelada durante o processo.

Com a devida formação dos poros isolados de maneira uniforme, o usuário poderá conferir, se tiver interesse, se a estrutura porosa se encontra conforme idealizada. Para isso, o mesmo poderá fazer medições nas dimensões

dos poros (largura e comprimento) ou na distância entre eles. Caso as dimensões não estejam conforme o esperado, o usuário poderá ajustar algum parâmetro e repetir o procedimento a partir do 4º passo. Por exemplo:

- Caso o comprimento dos poros precise ser alterado, o parâmetro de tamanho dos trechos finos deverá ser ajustado.
- Caso a largura dos poros esteja incorreta, o usuário pode escolher entre alterar a velocidade de impressão nos trechos finos ou a extrusão aplicada às linhas segmentadas. Em ambos os casos, é provável que a “distância entre linhas de *raster* S-C” também seja modificada.
- Caso a distância entre poros em uma mesma linha necessite ser ajustada, o parâmetro que deverá ser modificado é o tamanho dos trechos grossos.

#### 7º Passo – Impressão do MP tridimensional

Com todos os parâmetros definidos e a impressão da estrutura em uma camada já realizada, torna-se possível a fabricação do MP desejado. A peça impressa deve ser observada e analisada, procurando definir se o preenchimento permite a passagem de fluidos em seu interior. Novamente, o usuário pode, em um primeiro momento, posicionar a peça contra a luz, procurando observar os poros formados. Outra opção é assoprar através da peça, reparando se existe passagem de ar. No caso de poros muito pequenos, pode ser que esses testes sejam difíceis, com a quantidade imperceptível de luz ou ar passando pela peça. A melhor maneira de observar a estrutura porosa interna da peça é realizando alguma análise geométrica em ensaio não destrutivo, como a microtomografia computadorizada ou o microscópio eletrônico por varredura (MEV).

## APÊNDICE B – Resultados dos testes de permeabilidade

Nas Tabelas 18 a 24 são apresentados os três valores de medição realizados no ensaio de permeabilidade para cada valor de vazão utilizado, nas cinco amostras de cada configuração.

**Tabela 18 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E100C1**

Vazão [L/min]	Medição	Quedas de pressão $\Delta P$ [mbar]				
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
4	1	6,38	6,85	7,19	7,00	7,55
	2	6,66	6,69	6,70	6,88	7,28
	3	6,32	6,52	6,66	6,93	7,48
8	1	14,54	14,45	14,92	14,85	16,91
	2	13,42	14,77	14,94	15,12	16,26
	3	14,53	14,62	14,77	15,39	16,37
12	1	22,92	23,08	23,69	24,00	25,77
	2	22,75	22,44	23,93	23,96	26,07
	3	22,96	23,13	23,94	24,12	26,76
16	1	32,35	32,38	33,64	33,35	36,43
	2	32,22	32,13	33,34	33,56	36,76
	3	32,22	32,56	33,80	33,59	36,64
20	1	42,54	42,42	43,52	43,56	47,69
	2	42,35	42,64	43,46	43,59	47,76
	3	42,32	42,72	43,35	43,32	48,06
24	1	52,77	52,92	54,15	53,65	58,11
	2	52,61	51,88	53,47	53,19	57,03
	3	52,98	52,64	54,60	53,92	59,41

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 19 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F2E100C1**

Vazão [L/min]	Medição	Quedas de pressão $\Delta P$ [mbar]				
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
4	1	6,13	6,44	6,41	6,99	7,12
	2	6,01	6,65	6,54	6,47	6,73
	3	5,95	6,63	6,53	6,40	6,91
8	1	12,77	14,41	14,29	14,72	16,06
	2	13,06	14,89	14,52	14,60	15,87
	3	13,36	14,63	14,10	14,46	15,94
12	1	20,64	23,53	21,48	23,30	25,27
	2	20,68	23,44	22,17	23,24	24,89
	3	20,74	22,67	22,45	23,04	25,26
16	1	28,17	32,61	31,53	31,57	34,67
	2	28,91	31,93	30,98	32,36	35,05
	3	28,86	32,36	30,74	31,95	34,22
20	1	37,6	43,84	41,23	40,89	44,89
	2	37,58	42,86	40,34	41,44	46,15
	3	37,97	42,96	40,95	41,64	45,53
24	1	46,23	52,58	50,32	50,86	56,30
	2	46,49	52,46	49,69	49,97	55,04
	3	46,20	52,73	50,65	50,01	55,49

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 20 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E75C1**

Vazão [L/min]	Medição	Quedas de pressão $\Delta P$ [mbar]				
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
4	1	9,04	9,93	8,17	9,83	9,67
	2	9,08	9,41	8,02	9,36	9,23
	3	9,54	9,21	7,92	9,42	9,33
8	1	21,26	21,23	18,03	21,85	20,63
	2	20,88	21,12	17,91	21,42	21,16
	3	20,31	21,25	17,99	20,77	20,86
12	1	33,66	34,95	28,94	35,93	34,29
	2	33,79	35,31	29,06	35,58	33,75
	3	33,78	33,91	28,78	34,25	33,38
16	1	48,08	48,60	40,70	49,19	47,29
	2	46,57	47,90	39,88	48,94	45,19
	3	46,54	48,48	41,33	47,66	46,69
20	1	60,74	65,28	53,75	63,56	61,80
	2	60,45	64,94	53,26	63,02	62,12
	3	61,12	65,00	52,80	62,09	61,56
24	1	75,73	81,37	64,45	77,99	77,23
	2	75,93	81,20	63,22	77,96	76,39
	3	75,77	81,32	64,97	77,89	76,91

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 21 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E125C1**

Vazão [L/min]	Medição	Quedas de pressão $\Delta P$ [mbar]				
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
4	1	3,53	3,88	3,51	3,76	3,85
	2	3,66	4,04	3,33	3,81	3,79
	3	3,75	4,03	3,38	3,50	3,95
8	1	7,84	8,81	7,50	8,06	8,34
	2	7,83	8,84	7,31	8,10	8,42
	3	7,71	8,78	7,32	7,94	8,41
12	1	12,41	13,86	11,63	12,21	13,57
	2	12,20	13,68	11,50	12,17	13,21
	3	12,15	13,79	11,54	12,32	13,33
16	1	16,50	19,05	15,74	17,03	17,97
	2	16,57	19,12	15,74	16,95	18,03
	3	16,54	19,09	15,66	16,95	17,92
20	1	21,38	26,47	20,48	22,09	22,90
	2	21,34	25,59	20,44	22,05	23,09
	3	21,26	24,99	20,34	22,11	22,86
24	1	26,36	30,85	24,66	26,98	28,43
	2	26,26	30,86	24,49	27,14	28,91
	3	26,36	30,86	24,93	26,92	28,34

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 22 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E100C2**

Vazão [L/min]	Medição	Quedas de pressão $\Delta P$ [mbar]				
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
4	1	9,33	10,14	9,37	11,18	11,14
	2	9,89	10,64	9,44	11,07	10,80
	3	10,21	10,19	9,71	11,11	11,10
8	1	21,87	22,73	21,48	25,16	25,24
	2	21,18	23,16	21,30	24,67	25,48
	3	21,76	23,46	21,58	25,26	24,70
12	1	35,56	37,78	34,73	40,81	39,21
	2	34,75	37,74	34,52	39,96	39,58
	3	35,56	37,48	34,51	39,55	39,63
16	1	49,45	53,39	49,07	56,77	56,30
	2	49,33	51,60	48,24	56,27	56,67
	3	49,75	51,98	48,50	55,78	56,95
20	1	64,60	69,99	64,85	74,44	74,18
	2	64,07	67,10	63,74	73,98	74,20
	3	64,27	69,92	64,45	74,99	74,18
24	1	78,00	87,49	78,76	90,35	93,39
	2	79,96	86,80	78,94	92,37	92,96
	3	80,01	86,39	78,44	92,36	94,10

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 23 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração F1,5E100C3**

Vazão [L/min]	Medição	Quedas de pressão $\Delta P$ [mbar]				
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
4	1	12,62	11,68	10,36	12,66	11,30
	2	12,17	12,41	11,02	12,79	11,34
	3	12,12	12,37	10,99	12,32	11,13
8	1	29,18	28,79	24,23	29,88	26,49
	2	28,35	27,97	23,86	28,46	26,67
	3	28,77	27,47	24,54	28,48	27,54
12	1	48,43	47,64	39,79	47,14	44,63
	2	47,51	47,10	39,19	46,54	43,80
	3	46,50	46,83	39,34	47,24	44,95
16	1	67,54	68,15	56,51	66,69	63,27
	2	67,17	68,25	53,95	66,79	63,78
	3	67,29	67,58	55,45	67,58	62,66
20	1	90,74	91,56	73,09	89,94	83,06
	2	91,46	91,69	73,58	88,69	83,64
	3	89,94	91,96	74,13	89,04	83,68
24	1	111,45	112,80	93,36	111,47	102,46
	2	112,77	116,42	92,75	110,79	106,22
	3	112,73	113,29	82,59	111,32	105,27

Fonte: Autoria própria (2022)

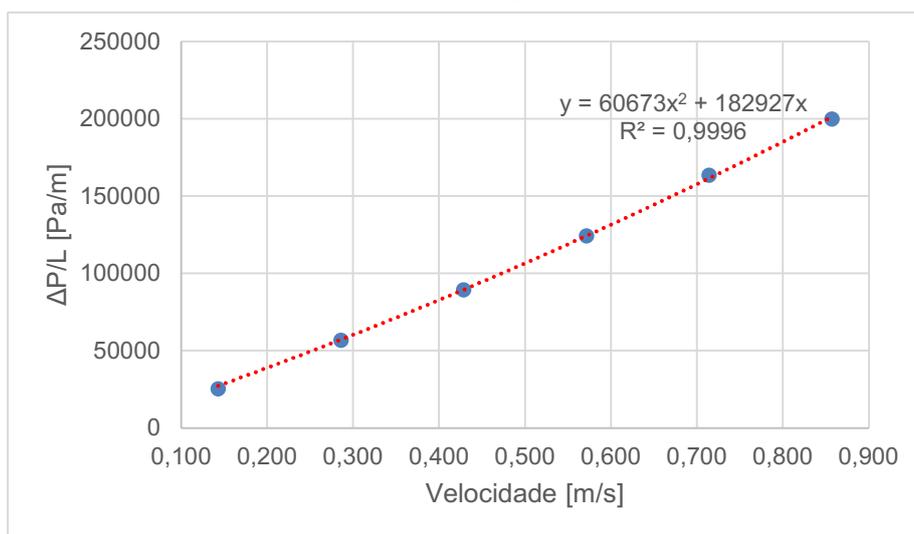
**Tabela 24 – Valores de queda de pressão mensurados nos ensaios de permeabilidade nas amostras da configuração Raster**

Vazão [L/min]	Medição	Quedas de pressão $\Delta P$ [mbar]				
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
4	1	3,07	3,23	3,07	3,14	3,33
	2	3,17	3,09	3,15	3,17	3,48
	3	3,06	3,17	3,11	3,10	3,39
8	1	6,80	6,45	6,85	6,57	7,03
	2	6,55	6,57	6,88	6,61	7,06
	3	6,51	6,71	6,90	6,48	7,10
12	1	10,59	10,41	10,76	10,43	11,12
	2	10,65	10,49	10,65	10,67	11,27
	3	10,48	10,50	10,51	10,71	11,08
16	1	14,54	14,39	14,95	14,38	15,78
	2	14,67	14,49	14,72	14,27	15,69
	3	14,55	14,56	14,68	14,33	15,68
20	1	18,67	18,91	19,24	18,97	20,61
	2	18,71	18,63	19,38	18,68	20,58
	3	18,94	18,87	19,59	18,70	20,63
24	1	23,79	23,60	24,33	22,65	25,58
	2	22,85	23,90	24,34	23,03	25,28
	3	23,43	23,77	24,29	22,98	25,61

Fonte: Autoria própria (2022)

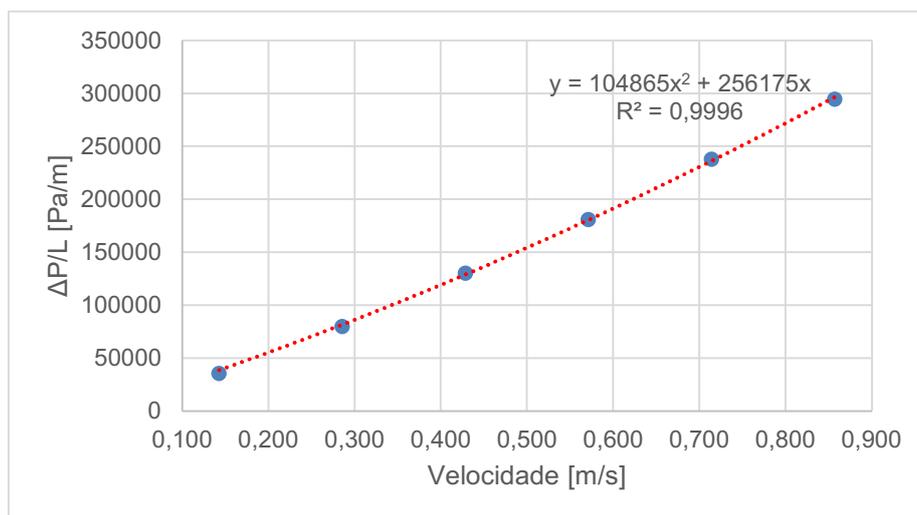
Nos Gráficos 5 a 10 são apresentadas as regressões lineares dos valores de pressão medidos e as equações que regem as curvas obtidas, para as configurações F2E100C1, F1,5E75C1, F1,5E125C1, F1,5E100C2, F1,5E100C3 e Raster.

**Gráfico 5 – Curva obtida por regressão linear a partir das quedas de pressão mensuradas com a configuração F2E100C1**



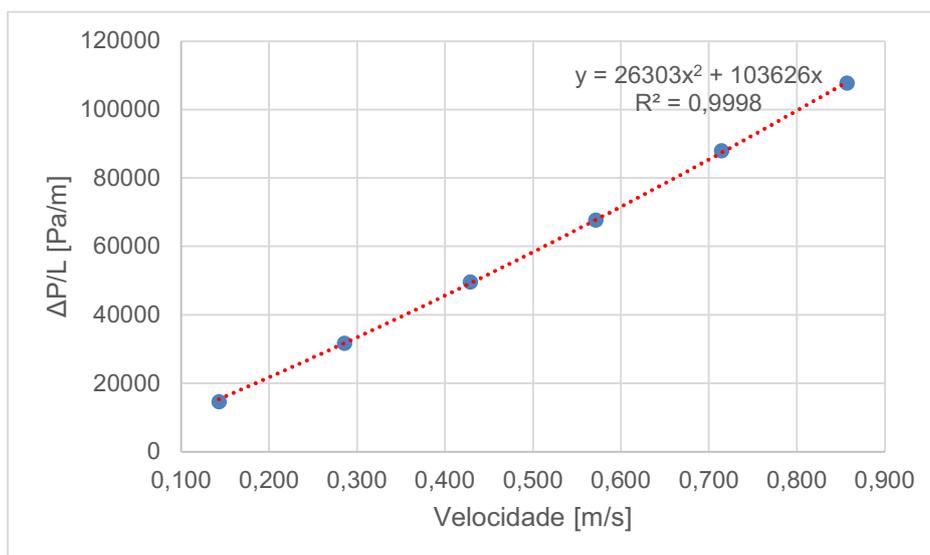
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 6 – Curva obtida por regressão linear a partir das quedas de pressão mensuradas com a configuração F1,5E75C1**



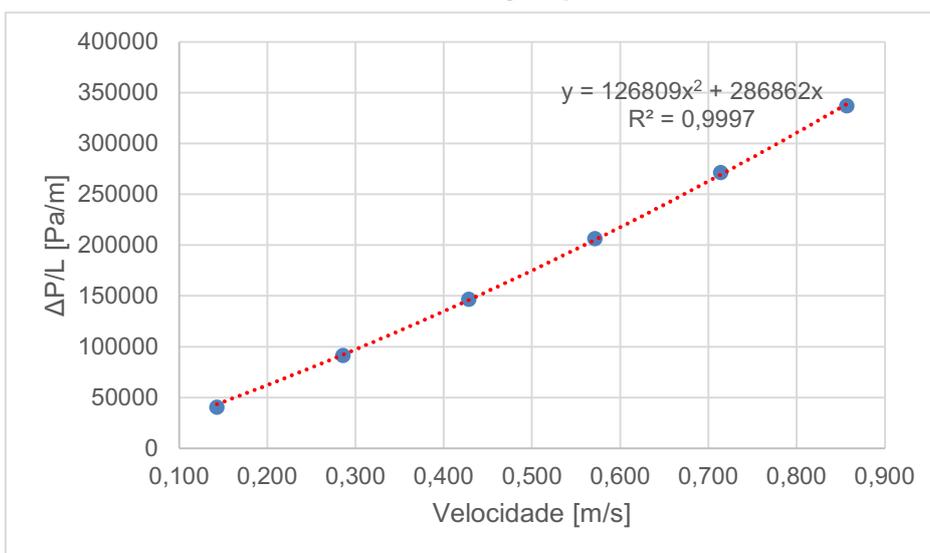
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 7 – Curva obtida por regressão linear a partir das quedas de pressão mensuradas com a configuração F1,5E125C1**



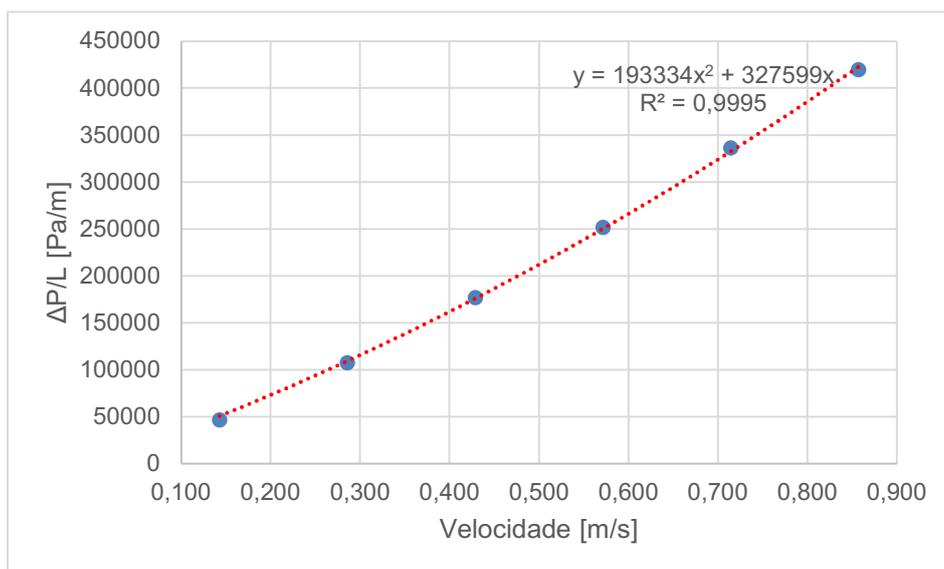
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 8 – Curva obtida por regressão linear a partir das quedas de pressão mensuradas com a configuração F1,5E100C2**



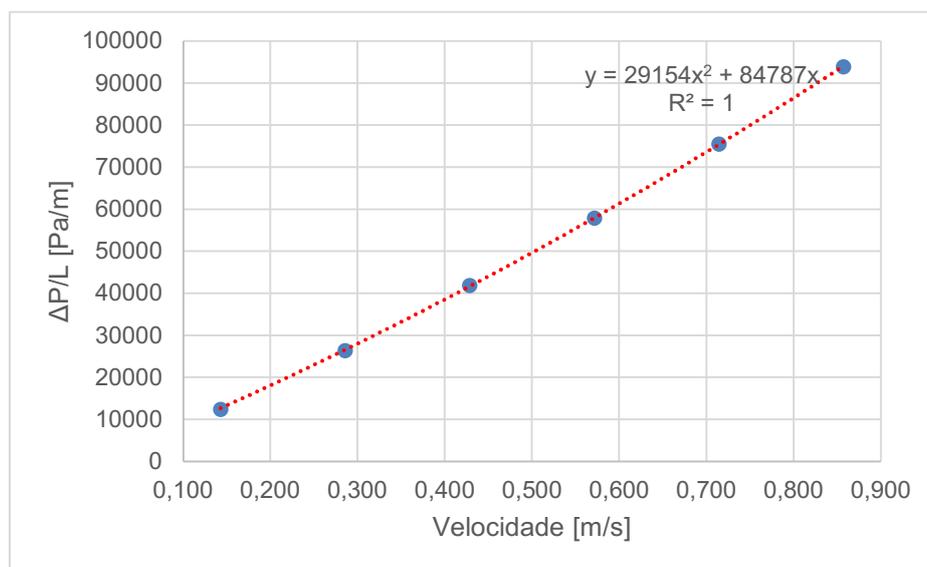
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 9 – Curva obtida por regressão linear a partir das quedas de pressão mensuradas com a configuração F1,5E100C3**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 10 – Curva obtida por regressão linear a partir das quedas de pressão mensuradas com a configuração Raster**



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Tabela 25 a seguir estão apresentados os valores de permeabilidade  $k_1$  e  $k_2$  das configurações, obtidos utilizando os coeficientes das regressões lineares.

**Tabela 25 – Coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  de permeabilidade das configurações**

<b>Configuração</b>	<b><math>k_1</math> [D]</b>	<b><math>k_2</math> [<math>10^{-3}</math> m]</b>
F1,5E100C1	100,09	14,21
F2E100C1	103,57	16,45
F1,5E75C1	73,96	9,52
F1,5E125C1	182,83	37,95
F1,5C100C2	66,05	7,87
F1,5C100C3	57,83	5,16
Raster	223,46	34,24

**Fonte: Autoria própria (2022)**