

## OBTENÇÃO DE MEIOS POROSOS POR MANUFATURA ADITIVA ATRAVÉS DE ESTRATÉGIA DE PREENCHIMENTO SEGMENTADO

Felipe Gonçalves Di Nisio

Fabio Seiti Fukuda

Neri Volpato

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba – Av. Sete de Setembro, 3165 - Rebouças, Curitiba - PR, 80230-901

felipenisio@alunos.utfpr.edu.br

fabiofukuda@alunos.utfpr.edu.br

nvolpato@utfpr.edu.br

**Resumo.** *Através da Manufatura Aditiva é possível a fabricação de materiais porosos com geometria planejada controlando a trajetória do bico extrusor e variando os parâmetros de processo envolvidos. Neste estudo, propõe-se uma estratégia inovadora de preenchimento através da variação dos parâmetros de velocidade e extrusão em segmentos da linha de raster, gerando um padrão de preenchimento com poros alinhados. Nessa estratégia, algumas linhas de um preenchimento do tipo raster são divididas em trechos grossos (alta extrusão e baixa velocidade) e finos (baixa extrusão e alta velocidade). Para isso, um algoritmo capaz de realizar essa divisão foi desenvolvido e implementado no programa de planejamento de processo RP3 (Rapid Prototyping Process Planning). Foram realizadas as impressões de quatro amostras utilizando o preenchimento segmentado, variando os parâmetros dos trechos grossos e finos. Os resultados preliminares mostram que o preenchimento proposto é capaz de gerar meios porosos conforme idealizado e com características únicas na sua estrutura.*

**Palavras chave:** Manufatura Aditiva. Meios porosos. Planejamento de processo.

### 1. INTRODUÇÃO

Meios porosos (MP) são materiais formados por uma matriz sólida com espaços vazios interconectados, pelos quais torna-se possível a passagem de fluidos (Nield e Bejan, 2013). Dentre suas diversas aplicações, encontram-se a geração de energia, supressão de vibrações, isolamento térmico, absorção sonora, filtragem de fluidos, bioengenharia (scaffolds), geologia, entre outros. A característica mais importante destes materiais nas aplicações em que são realizadas análises de fluxo de fluidos é a sua permeabilidade, e para esses casos a fabricação de estruturas porosas de maneira controlada ainda apresenta desafios (Shigueoka e Volpato, 2021).

A Manufatura Aditiva (AM - *Additive Manufacturing*) surge como uma tecnologia com potencial para gerar MPs de maneira planejada (Michailidis *et al.*, 2014; Zhai e Chen, 2019; Guddati *et al.*, 2019). Uma de suas principais vantagens é a capacidade de alterar as características do material fabricado variando os parâmetros de processo de maneira estratégica.

Em termos de parâmetros de AM para as tecnologias baseadas em extrusão de material, pode-se dizer que os MPs são estruturas com preenchimento menor que 100%. Entretanto, a redução deste parâmetro simplesmente gera espaços (*gaps*) entre as linhas em um preenchimento do tipo raster - também conhecido como preenchimento retilinear ou zigzag.

Diversos estudos foram realizados para a obtenção de MPs com porosidade controlada através de AM por extrusão de material, variando os parâmetros de preenchimento raster. Em um trabalho pioneiro, Too *et al.* (2001) utilizaram uma variação de ângulo de raster de 90° entre as camadas e obtiveram MPs com diferentes porosidades variando a distância entre os filamentos (*gap*). Já nos estudos de Zein *et al.* (2002) e Kalita *et al.* (2003) foram utilizados diferentes valores de ângulo de raster entre as camadas, gerando estruturas com poros de diferentes tamanhos e geometrias. Chin Ang *et al.* (2006) acrescentou à essas estratégias a repetição de camadas (*build layer*), empilhando um certo número de camadas com o mesmo ângulo de raster. No trabalho de Lee *et al.* (2012) foi apresentada a estratégia de desalinhamento lateral (*stagger*) dos rasters entre as camadas. Mais recentemente, o estudo de Shigueoka e Volpato (2021) propôs a obtenção de MPs utilizando todas as estratégias citadas e acrescentando o agrupamento de filamentos no preenchimento.

Apesar de propiciar um avanço nas alternativas de projetar MPs, as estratégias propostas apresentam sempre uma estrutura porosa com ramificação lateral dos poros (poros conectados lateralmente), o que pode gerar um caminho de fluxo na camada, ou seja, não limitam o fluxo lateral na camada. Adicionalmente, o tamanho do *gap* (e consequentemente do poro) depende da resolução e precisão de posicionamento no plano XY do equipamento de AM.

Neste artigo, propõe-se a geração de MPs por AM variando parâmetros de extrusão e velocidade entre segmentos da linha de raster. Dessa maneira, as linhas de preenchimento apresentam uma largura variável, resultando em um corpo

com estrutura porosa que, em teoria, apresenta somente um caminho de fluxo preferencial na direção normal à camada. Esta estratégia permite também obter poros de menores dimensões e com um certo controle de suas dimensões, com menos restrições da resolução da impressora 3D. Para que isso seja possível, um algoritmo foi desenvolvido e implementado no software de planejamento de processo RP3 (*Rapid Prototyping Process Planning*), permitindo fabricar as peças de teste para este estudo. Atualmente, não foi encontrada na literatura nenhuma estratégia similar para a obtenção de MPs.

## 2. METODOLOGIA

A estratégia de preenchimento proposta é baseada no preenchimento do tipo raster (Fig. 1a) e consiste em intercalar linhas contínuas (sem nenhuma modificação) e linhas segmentadas com largura variável (divididas em trechos grossos e finos). Nos trechos grossos ocorre a aderência com a linha contínua adjacente, enquanto que na região dos trechos finos são gerados os poros. A Figura 1b representa o resultado geométrico dessa configuração. Da mesma forma que na impressão de uma peça tradicional, o preenchimento proposto pode ser delimitado por um ou mais contornos (*outlines*).

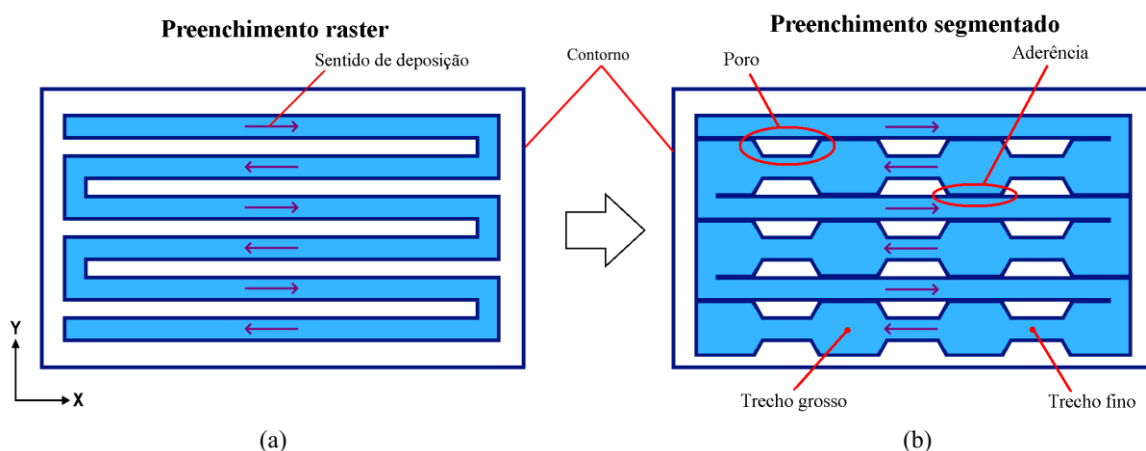


Figura 1. Representação teórica da estratégia de preenchimento proposta

Espera-se que a geometria dos poros gerados pelo preenchimento segmentado possua baixa razão de aspecto, ou seja, comprimento relativamente maior que a largura, assim como pode ser observado na Fig. 1b. Dessa maneira, utilizando a estratégia, objetiva-se poder controlar essas dimensões dos poros (comprimento e largura), assim como a distância entre eles.

O funcionamento do algoritmo é dado a partir de um preenchimento raster previamente calculado, no qual as linhas que apresentarão a largura variável são divididas através de uma função, a qual retorna ao programa uma lista ordenada de pontos que representam o início e fim de cada trecho. A Figura 2 apresenta a divisão da linha de raster pelo algoritmo. Além das coordenadas do eixo cartesiano, os pontos também armazenam a informação do tipo do trecho (grosso ou fino).

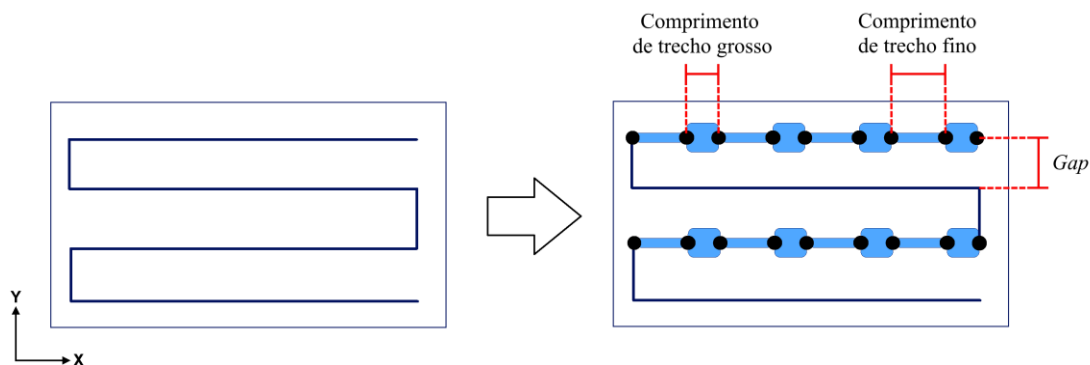


Figura 2. Divisão das linhas de raster no preenchimento segmentado

O algoritmo foi implementado no programa RP3, um software de planejamento de processo em desenvolvimento pelo Núcleo de Manufatura Aditiva de Ferramental (NUFER) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) (Volpato e Foggiatto, 2009).

Como deseja-se obter o controle das dimensões dos poros e das distâncias entre os mesmos, o programa permite alterar o comprimento, velocidade e quantidade de material extrudado de cada tipo de trecho. Também é possível controlar o *gap* entre as linhas de raster. Com isso, os preenchimentos porosos podem ser gerados de duas maneiras:

- Tipo I: *gap* 0 ou negativo, trechos finos com extrusão abaixo de 100% e trechos grossos com extrusão de 100%.
- Tipo II: *gap* positivo entre as linhas de raster, trechos grossos com extrusão acima de 100% e trechos finos com extrusão menor ou igual a 100%.

A principal diferença entre estas duas opções está no tamanho dos poros obtidos, sendo que a utilização do Tipo I tende a gerar poros menores, uma vez que a distância (*gap*) entre as linhas é menor.

Com o intuito de visualizar em detalhe o preenchimento proposto, foram realizadas impressões de amostras com apenas uma camada. Os G-codes foram gerados para uma peça de dimensões 50 x 30 x 0,3 mm, definindo como parâmetros de processo fixos: espessura de camada 0,3 mm, temperatura de extrusão 200°C, temperatura da plataforma 50°C, velocidade de impressão 15 mm/s, bico de extrusão de 0,4 mm e largura de extrusão também de 0,4 mm. As amostras foram então fabricadas na impressora 3D Anet A8, utilizando filamento de PLA (Poli-ácido láctico) da marca Esun, com diâmetro 1,75 mm.

Em um primeiro momento, foram realizados testes preliminares para definir de que maneira o parâmetro de velocidade deveria ser variado no preenchimento segmentado. Para isso, quatro amostras foram impressas com diferentes configurações de velocidade, como mostrado na Tab. 1. Nestes testes foi utilizado um *gap* de 0,15 mm, comprimento dos trechos de 2 mm e trechos grossos e finos com extrusão de 150% e 100%, respectivamente.

Tabela 1. Configurações de velocidade das amostras dos testes preliminares

| Amostra | Trecho grosso     | Trecho Fino       |
|---------|-------------------|-------------------|
|         | Velocidade [mm/s] | Velocidade [mm/s] |
| A1      | 15 (100%)         | 15 (100%)         |
| A2      | 7,5 (50%)         | 15 (100%)         |
| A3      | 15 (100%)         | 7,5 (50%)         |
| A4      | 7,5 (50%)         | 7,5 (50%)         |

A partir dos resultados dos testes preliminares, foram elaboradas quatro amostras para observar o funcionamento do algoritmo e a resposta do controle da máquina à variação dos parâmetros. As configurações de parâmetros dessas amostras são apresentadas na Tab. 2. As amostras B1, B2 e B3 são do Tipo II, enquanto a amostra B4 é do Tipo I.

Tabela 2. Valores dos parâmetros de preenchimento segmentado para cada amostra

| Amostra | Trecho grosso     |              |                  | Trecho Fino       |              |                  | <i>Gap</i> [mm] |
|---------|-------------------|--------------|------------------|-------------------|--------------|------------------|-----------------|
|         | Velocidade [mm/s] | Extrusão [%] | Comprimento [mm] | Velocidade [mm/s] | Extrusão [%] | Comprimento [mm] |                 |
| B1      | 3,75 (25%)        | 180          | 1                | 15 (100%)         | 100          | 3                | 0,18            |
| B2      | 3,75 (25%)        | 150          | 1                | 15 (100%)         | 100          | 1                | 0,12            |
| B3      | 7,5 (50%)         | 120          | 1                | 15 (100%)         | 90           | 1                | 0,02            |
| B4      | 7,5 (50%)         | 100          | 1                | 30 (200%)         | 80           | 1                | 0               |

Para análise dos resultados, uma fonte de luz artificial foi adicionada abaixo das amostras para destacar a formação dos poros com menores dimensões. A fim de se obter imagens dos poros de maneira mais detalhada, as amostras B1 a B4 foram fotografadas utilizando um microscópio óptico digital, da marca Veho, modelo VMS-004, com aproximação 400x. Para cada amostra, foram obtidas imagens em três regiões diferentes da peça: superior, central e inferior.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das impressões das amostras de testes preliminares são apresentados na Fig. 3. É possível notar que as linhas segmentadas com trechos de largura variada foram formadas apenas nas amostras A2 e A3. Com isso, é possível concluir que não basta apenas variar a quantidade de material extrudado entre os trechos grossos e finos, mas que também é necessário alterar a velocidade entre os segmentos para que a estrutura porosa seja formada.

A princípio, as amostras A2 e A3 aparentam possuir estruturas similares, entretanto é possível notar uma diferença na posição dos trechos formados entre as amostras. Isso é observado em maior detalhe na Fig. 4, na qual é mostrado que houve uma inversão das posições dos trechos de uma amostra em relação à outra. As linhas tracejadas na horizontal representam a posição teórica dos segmentos de raster com comprimento 2 mm. Analisando os G-codes destas

amostras, foi possível identificar que o primeiro trecho da linha segmentada (localizado na região mais inferior da Fig. 4) deveria ser um trecho grosso, seguido de um trecho fino e assim por diante intercalando os dois tipos de trecho. Na Figura 4, verifica-se que a amostra A2 obedece a esta sequência enquanto a amostra A3 forma os trechos nas posições incorretas. Com isso, pode-se concluir que os resultados do preenchimento segmentado apresentam maior precisão quando os trechos grossos são impressos com velocidades mais baixas que os trechos finos.

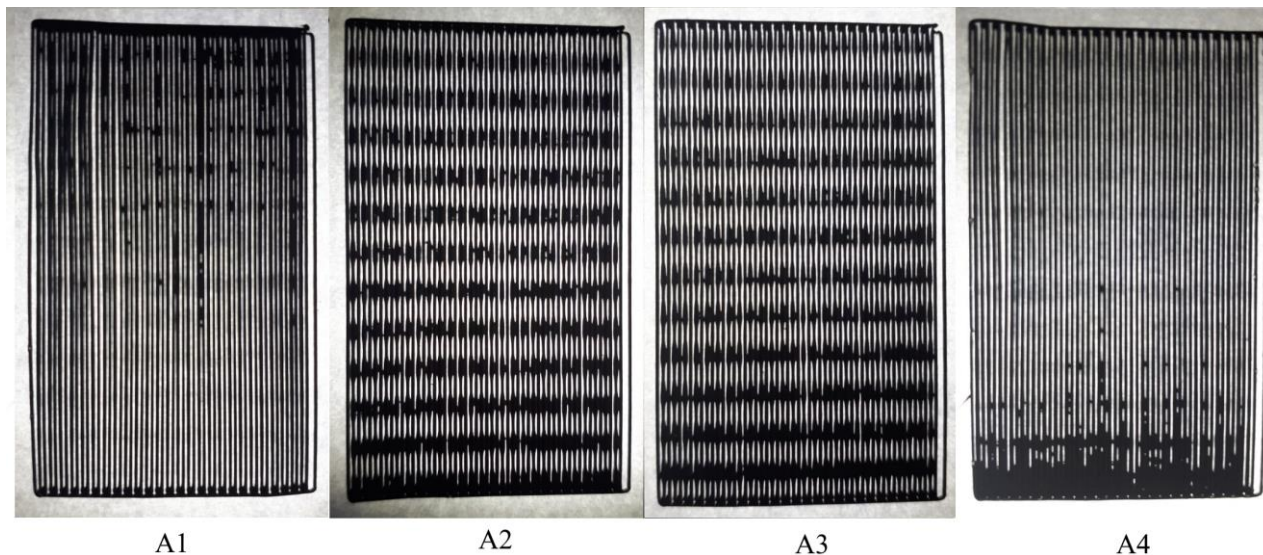


Figura 3. Fotografia das impressões realizadas (testes preliminares)

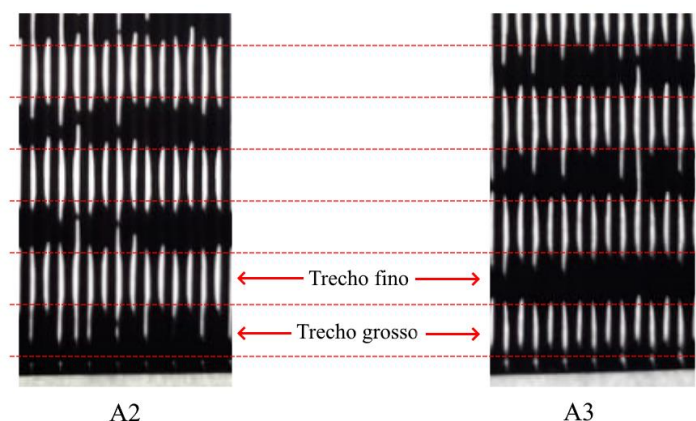


Figura 4. Aproximação das fotografias mostrando as disposições dos trechos nas amostras A2 e A3

Os resultados das impressões das amostras B1 a B4 encontram-se na Fig. 5. As áreas mais claras nas imagens correspondem aos poros formados.

Nota-se que a luz é capaz de atravessar a peça em pequenos pontos alinhados, mostrando que o preenchimento do material é menor que 100% e evidenciando a formação de pequenos poros. No geral, os resultados mostram que é factível obter MPs com a ideia proposta neste trabalho.

A formação dos poros nestas amostras é apresentada com maior detalhe nas microscopias presentes na Fig. 6. Nas colunas estão indicadas as amostras e nas linhas a região da peça que foi fotografada.

Analisando as imagens, nota-se que os poros foram formados na região entre os trechos finos e a linha de raster contínua, exceto na região inferior das amostras B3 e B4. Já os trechos grossos apresentaram aderência com a linha adjacente, com exceção de alguns pontos da região superior na amostra B2. Também é possível observar que as linhas contínuas apresentaram uma pequena deformação ou afinamento nas regiões superiores das amostras. De uma maneira geral, é evidente que os poros obtidos possuem uma forma alongada, semelhante a um formato de agulha, condizente com a geometria esperada (Fig. 1b).

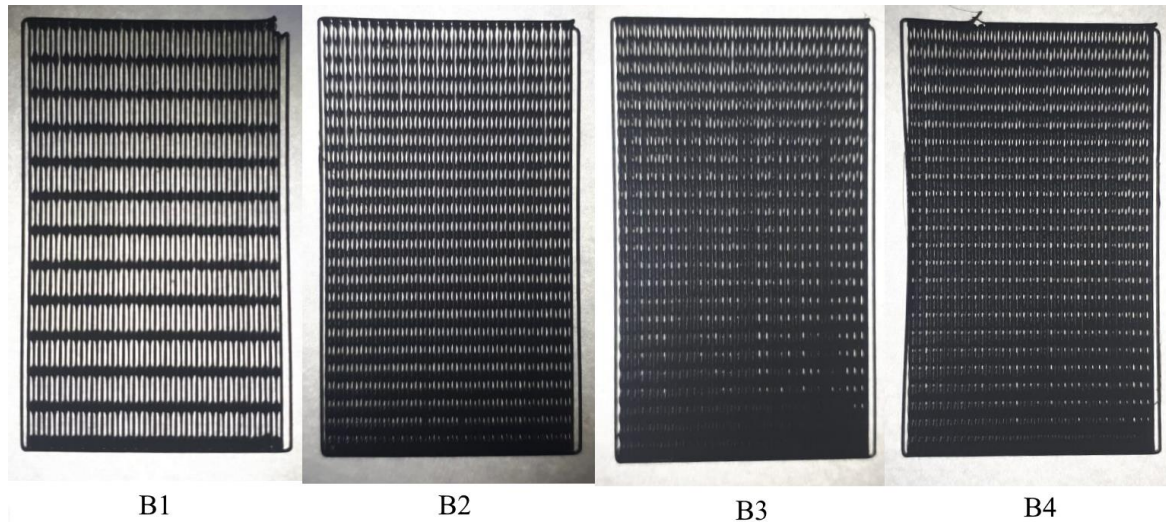


Figura 5. Fotografia das impressões realizadas (amostras B1 a B4)

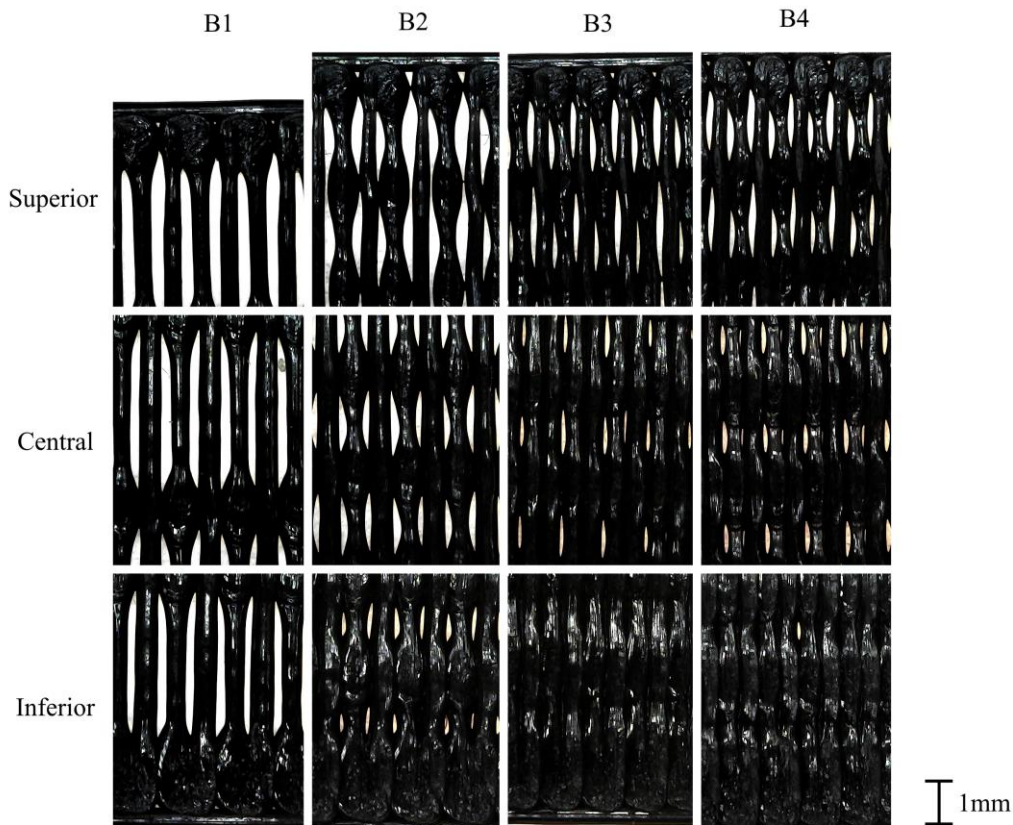


Figura 6. Microscopia de diferentes regiões das amostras B1 a B4

Como esperado, os poros da amostra B1 possuem maior comprimento em relação às outras amostras, devido à escolha do comprimento de 3 mm para os trechos finos. Como as amostras B1, B2 e B3 são do Tipo II, era esperado que estas apresentem poros maiores em comparação à amostra B4, pertencente ao Tipo I. Isso ocorre com as amostras B1 e B2, porém os poros da amostra B3 apresentam dimensões praticamente idênticas aos poros da amostra B4. Outra constatação relevante é que, conforme esperado, os poros formados na parte central não têm conectividade lateral, significando que, quando mais camadas forem adicionadas, somente haverá conectividade dos mesmos entre as camadas.

Na Figura 6 podemos observar também que as amostras B2, B3 e B4 demonstram um tamanho de poro não uniforme em seu comprimento, ou seja, as amostras exibem tamanhos de poros diferentes em cada região (superior, central e inferior). Nota-se que há uma maior quantidade de material concentrada nas regiões inferiores das peças,

enquanto as regiões superiores apresentam falta de material. Ainda não foi encontrada uma causa para a ocorrência deste fenômeno. Uma das hipóteses é que a frequente variação de parâmetros de extrusão e velocidade na impressora causem um erro acumulativo na impressão do material, mais perceptível após certo comprimento da linha de raster. Outra é que a linha contínua apresenta uma pequena variação de largura em relação ao seu comprimento, sendo mais grossa nas regiões inferiores das amostras e mais fina nas superiores. Vale lembrar que, como as linhas de raster segmentadas e contínuas são intercaladas, todas as linhas segmentadas são depositadas no mesmo sentido (o que pode ser observado pelas setas representadas na Fig. 1), favorecendo a formação do defeito em apenas um lado da peça.

#### 4. CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que é possível fabricar MPs através da AM variando os parâmetros de velocidade e extrusão em segmentos das linhas de raster, dividindo-as em trechos grosso e finos. O algoritmo desenvolvido foi capaz de realizar a divisão das linhas de preenchimento, e os G-codes gerados pelo RP3 implementaram devidamente os parâmetros selecionados. O controle da impressora respondeu bem a variação dos parâmetros ao longo da deposição segmentada, gerando os trechos de largura variada e, consequentemente, formando a estrutura porosa idealizada.

No entanto, ainda é necessário estudar em mais detalhes o fenômeno que causa a variação da quantidade de material depositado em relação ao comprimento da peça. Para isso, serão realizados mais testes, com uma maior variação de parâmetros e geometrias das peças. Atualmente, o estudo encontra-se na fase de ajuste dos parâmetros de processo, analisando quais configurações apresentam estruturas mais comportadas. Neste sentido, também será estudado o firmware da máquina a fim de compreender como o G-code gerado é lido pela mesma, e se a alta variação de parâmetros em um percurso curto pode afetar o seu funcionamento. Além disso, pretende-se realizar testes com um maior número de camadas, gerando amostras com estrutura porosa tridimensional. Essas peças deverão ser submetidas à ensaios de porosidade e permeabilidade, assim como análise de microtomografia para que seja estudado o volume da estrutura obtida.

A estratégia proposta de preenchimento segmentado é inovadora e abre oportunidades para a impressão de MPs com características únicas e também para possíveis aplicações em outras áreas, uma vez que não foi encontrado nenhum preenchimento com este princípio nas tecnologias de AM.

#### 5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida e à equipe de desenvolvimento do software RP3 pelo apoio no desenvolvimento e implementação do algoritmo.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Chin Ang, K., Fai Leong, K., Kai Chua, C., Chandrasekaran, M., 2006. "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12, p. 100–105.
- Guddati, S., Kiran, A.S.K., Leavy, M. e Ramakrishna, S., 2019. "Recent advancements in additive manufacturing technologies for porous material applications". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, p. 193–215.
- Kalita, S. J., Bose, S., Hosick, H. L., Bandyopadhyay, A., 2003. "Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling". *Materials Science and Engineering C*, Vol. 23, p. 611–620.
- Lee, J. S., Cha, H. D., Shim, J. H., Jung, J. W., Kim, J. Y., Cho, D. W., 2012. "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, p. 1846–1853.
- Michailidis, N., Tsouknidas, A., Lefebvre, L., Hipke, T. e Kanetake, N., 2014. "Production, characterization, and applications of porous materials". *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014, p. 1–2.
- Nield, D.A. e Bejan, A., 2013. *Convection in Porous Media*. Springer, New York, 3ª edição.
- Too, M. H., Leong, K. F., Chua, C. K., Cheah, C. M., Ho, S. L., 2001. "Feasibility of tissue engineering scaffold fabrication using fused deposition modelling". *The Seventh Australian and New Zealand Intelligent Information Systems Conference 2001*, p. 433–438.
- Shigueoka, M.O. e Volpato, N., 2021. "Expanding manufacturing strategies to advance in porous media planning with material extrusion additive manufacturing". *Additive Manufacturing*, Vol. 38, 101760.
- Volpato, N. e Foggatto, J.A., 2009. "The development of a generic Rapid Prototyping process planning system". In *Innovative Developments in Design and Manufacturing*, Leiria, Portugal.
- Zein, I., Hutmacher, D. W., Tan, K. C., Teoh, S. H., 2002. "Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications". *Biomaterials*, Vol. 23, p. 1169–1185.
- Zhai, X. e Chen, F., 2019. "Path planning of a type of porous structures for additive manufacturing". *Computer-Aided Design*, Vol. 115, p. 218–230.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

### Obtaining Porous Media by Additive Manufacturing Through Segmented Filling Strategy

**Felipe Gonçalves Di Nisio**

**Fabio Seiti Fukuda**

**Neri Volpato**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba – Av. Sete de Setembro, 3165 - Rebouças, Curitiba - PR, 80230-901

felipenisio@alunos.utfpr.edu.br

fabiofukuda@alunos.utfpr.edu.br

nvolpato@utfpr.edu.br

**Abstract.** *Through Additive Manufacturing it is possible to manufacture porous materials with planned geometry by controlling the extruder nozzle's path and varying process parameters. This study proposes an innovative filling strategy through the variation of speed and extrusion parameters in raster line segments, generating a filling pattern with aligned pores. In this strategy, some lines of a raster filling are divided into thick (high extrusion and low speed) and thin (low extrusion and high speed) segments. For that purpose, an algorithm capable of performing this division was developed and implemented in the software called RP3 (Rapid Prototyping Process Planning). Four samples were manufactured using segmented filling, varying the parameters of the thick and thin sections. Preliminary results show that the proposed filling is capable of generating porous media in as planned and with unique characteristics in its structure.*

**Keywords:** *Additive Manufacturing, Porous media, Process planning.*

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.