

ANÁLISE DE PERMEABILIDADE DE MEIOS POROSOS POLIMÉRICOS OBTIDOS POR MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL

Marcelo Okada Shigueoka¹

Neri Volpato²

^{1,2}Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000 - Campo Comprido, Curitiba - PR, CEP: 81280-340

¹mshigueoka@gmail.com, ²nvolpato@utfpr.edu.br

Thiago Antonini Alves

Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPÉE), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Av. Monteiro Lobato, s/n - Km 04 - Jardim Carvalho - Ponta Grossa - PR, CEP 84016-210

thiagoalves@utfpr.edu.br

Resumo. Materiais porosos ou meios porosos (MP) são aplicados em vários setores da indústria. A Manufatura Aditiva (AM – Additive Manufacturing) tem crescente importância nesta área, pois possibilita a produção de porosidade planejada. O princípio de adição de AM por extrusão de material apresenta um diferencial importante nesta área, pois possibilita produzir geometrias de formato tipo treliça (lattice), sem necessidade de modelar cada filamento da estrutura. Este trabalho apresenta um estudo preliminar sobre variações da geometria de poro e permeabilidade de MP obtidos de forma direta por esta tecnologia de AM. Com a utilização do software de planejamento de processo RP3, geometrias provenientes de preenchimento tipo raster com variações no ângulo de raster e “desalinhamento” entre camadas (staggered raster) foram fabricadas em material polimérico e suas permeabilidades obtidas através de medição experimental de forma direta. Os resultados obtidos indicam que os parâmetros ângulos de raster e distância do desalinhamento (stagger) afetam a permeabilidade, mas não possuem uma relação linear com a mesma.

Palavras chave: Manufatura Aditiva, Meios Porosos, Extrusão de material, Lattice, Permeabilidade

1. INTRODUÇÃO

Materiais porosos ou meio porosos (MP) são aplicados em diversos setores da indústria devido a uma de suas principais características mecânicas, que é a de apresentarem rigidez estrutural com baixa densidade de massa (Liu e Chen, 2014). Isto desperta interesse em aplicações específicas em setores como o aeroespacial e o da medicina. Quando o objetivo é o escoamento em seu interior, os estudos envolvendo porosidade; características geométricas (geometria e tamanho de poro, etc.) e permeabilidade dos MP são de particular interesse da Indústria Petrolífera para aplicações na produção dos reservatórios.

A Manufatura Aditiva (AM – Additive Manufacturing) tem crescente importância nesta área, pois possibilita a produção de porosidade planejada (Michailidis *et al.*, 2014). As tecnologias de AM, em geral, têm impulsionado progressos significativos na produção dos reservatórios, devido a sua aplicação na conversão de modelos de rochas digitais (digital rocks - modelos 3D digitais reconstruídos de rochas) em réplicas impressas (rock proxies). Essas réplicas permitem realizar um número maior de experimentos, contribuindo quanto a repetibilidade destes, com e sem a necessidade de utilização/destruição de rochas naturais (testemunhos), e com potencial de serem empregadas para validar simulações numéricas (Ishutov *et al.*, 2018).

Com a AM pelo princípio da extrusão de material (Volpato, 2017), os MP podem ser obtidos de forma planejada, possibilitando-se trabalhar a geometria, tamanho e arranjo da estrutura interna (Kalita *et al.*, 2003). Um diferencial importante deste princípio é a possibilidade de produzir geometrias de formato tipo treliça (lattice), sem necessidade de modelar cada filamento da estrutura. Isto é possível, pois a deposição de material gera diretamente as “barras” das estruturas lattice no plano de deposição.

Estudos como os realizados por Sobral *et al.* (2011) e Lee *et al.* (2012) demonstram o interesse em verificar a influência da variação dos parâmetros de processo da estratégia de preenchimento do tipo raster como o ângulo de raster, distâncias entre os filamentos no preenchimento (gap) e “desalinhamento” entre camadas (staggered raster), nas propriedades mecânicas dos MP fabricados. No entanto, existem poucos trabalhos que abordam a influência desses parâmetros na geometria de poro das estruturas de lattice na permeabilidade de MP. Este trabalho apresenta um estudo preliminar sobre esta influência em MP poliméricos obtidos por AM pelo princípio de extrusão de material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A matéria-prima utilizada foi o polilático (PLA), em filamento de diâmetro de 1,75mm, fornecida pelo fabricante Esun. O equipamento de AM foi a impressora DH+, do fabricante 3D Cloner, e o planejamento de processo foi executado pelo software RP3 (Volpato e Foggiatto, 2009).

2.1. Definição das geometrias das estruturas *lattice*

Considerando a resolução da impressora utilizada, definiu-se que o *gap* mínimo que se teria controle/estabilização da fabricação (os filamentos vizinhos não se tocariam), seria de 0,1mm. Desta forma, o valor da porosidade obtida seria de 47%, sendo esta então fixada para todas as geometrias. Foram propostas geometrias dos MP provenientes de variações no ângulo de *raster* e no “desalinhamento” entre camadas (distância do *stagger*) (Figura 1). As variações no ângulo de *raster* ocorreram com incremento angular de “ θ ” (graus) na deposição entre camadas consecutivas, conforme ilustrado na Figura 1a. Neste estudo foram utilizados os incrementos de 90° e 60° para θ .

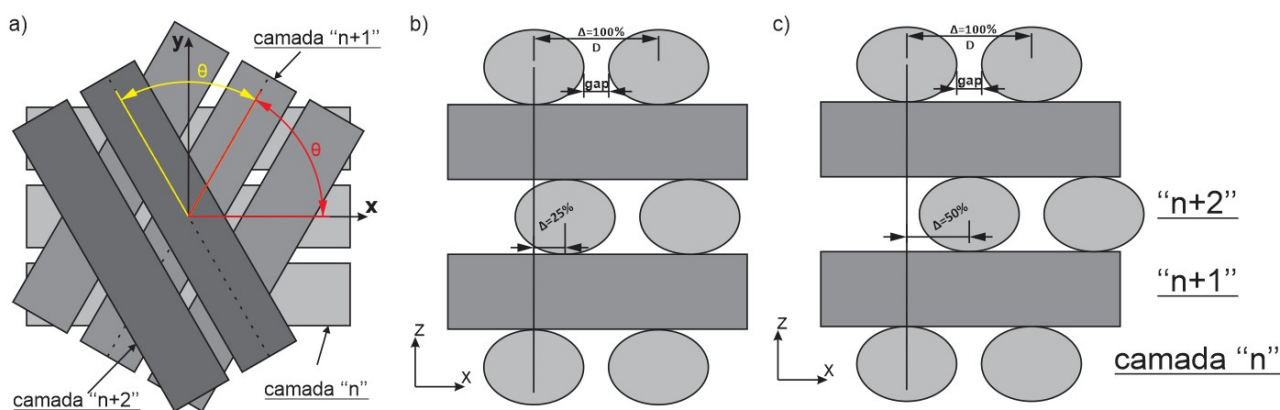


Figura 1. (a) Ângulo de *raster* θ . (b) e (c) Desalinhamento (*stagger*) com deslocamento Δ : Configuração com $\Delta=25\%$ (b) e $\Delta=50\%$ (c)

A estratégia de *raster* com desalinhamento (*staggered raster*) (Figura 1 “b” e “c”) consiste em gerar um deslocamento “ Δ ” entre os filamentos nas camadas com mesmo ângulo de *raster*, mas mantendo o *gap* definido inicialmente. Os valores de Δ propostos foram de 0%, 25% e 50% do valor das distâncias entre os filamentos no eixo-X (denominado “D”, sendo esta equivalente a $\Delta = 100\%$). A Tabela 1 apresenta os valores propostos para cada fator, com combinação totalizando 6 configurações de geometrias.

Tabela 1. Resumo dos fatores estudados

Ângulo de <i>raster</i> (θ)	Desalinhamento (<i>Stagger</i>) (Δ)
60°	0%
90°	25%
-	50%

2.2. Planejamento de processo e fabricação por AM

Para a construção das geometrias propostas, utilizou-se o RP3, software de planejamento de processo para AM por extrusão de material, que possui estratégias de preenchimentos desenvolvidas especificamente para obtenção de MP.

Visando a adequação dos corpos de prova ao aparato experimental, esses foram fabricados em formato cilíndrico (diâmetro de 25,4 mm e comprimento de 24mm), com o escoamento ocorrendo no sentido axial (Figura 2).

Para cada configuração, 5 amostras foram produzidas, totalizando 60 corpos de prova para a análise experimental. As impressões ocorreram com os seguintes parâmetros e condições: espessura das camadas de 0,3mm; velocidade de impressão 25 mm/s; temperatura do bico extrusor: 205°C; temperatura da mesa 50°C; temperatura ambiente 26°C; umidade do ar 65%.



Figura 2. Meio poroso fabricado por extrusão de material

2.3. Caracterização da permeabilidade

A caracterização da permeabilidade foi realizada pelo método experimental direto, medindo-se a queda de pressão que o escoamento fluido sofre ao permear a amostra do MP. A permeabilidade foi obtida utilizando-se as equações de Forchheimer, obtendo-se os coeficientes alfa e beta (Innocentini e Pandolfelli, 1999). Para a medição foi utilizado um equipamento (permeâmetro), baseado na Norma MPIF Standard 39, descrito no trabalho de Krambeck (2018), com escoamento de ar nas amostras a temperatura ambiente de 25°C, variando-se a vazão volumétrica de 6 a 30 l/min, com incrementos de 4 l/min e com pressão de entrada de 3,5 bar.

3. RESULTADO E DISCUSSÕES

Os resultados da queda de pressão com a variação da velocidade do fluido dos MP são apresentados no gráfico da Figura 4. As curvas foram ajustadas para funções quadráticas de 2ª ordem através do software Wolfram Mathematica 11. A Tabela 2 apresenta os valores de permeabilidade calculados.

Tabela 2. Permeabilidades obtidas

	$\theta 90^\circ \Delta 0\%$	$\theta 90^\circ \Delta 25\%$	$\theta 90^\circ \Delta 50\%$	$\theta 60^\circ \Delta 0\%$	$\theta 60^\circ \Delta 25\%$	$\theta 60^\circ \Delta 50\%$
Permeabilidade Darciana $\alpha [10^{-9} \text{ m}^2]$	2,773	2,610	2,319	1,924	2,326	2,384
Permeabilidade não Darciana $\beta [10^{-2} \text{ m}]$	2,117	2,076	2,121	2,120	2,093	2,075
R²	0,999975	0,999968	0,999963	0,999968	0,999977	0,999982

Considerando apenas a variação de ângulo de *raster*, ou seja, utilizando um desalinhamento (*stagger*) de 0% (configuração comumente estudada na literatura), pode-se observar que, um menor ângulo de *raster* tende a proporcionar menor permeabilidade α (redução de 30,6%). Isto pode ser explicado pela variação obtida na geometria dos poros em relação a configuração de 90°, que dificulta a passagem do fluido no caso de 60°.

Para o desalinhamento (*stagger*) de $\Delta 25\%$, ao se variar o θ de 90° para 60°, foi detectado uma redução na permeabilidade de 10,9%. Esta variação foi de menor proporção se comparado ao caso do $\Delta 0\%$ (redução de 30,6%). Já com o Δ de 50%, não se obteve variação significativa na permeabilidade variando o ângulo comparado aos casos anteriores (TesteT = 92,9% com grau de significância de 5%, para hipótese de conjunto de resultados iguais).

Variações do *stagger* com o mesmo ângulo resultaram em resultados diferenciados. Para o $\theta 90^\circ$ (Figura 5a), pode-se observar uma tendência de redução da permeabilidade conforme se aumenta o valor do *stagger*. Já para o ângulo de 60°, os casos de $\Delta 25\%$ e 50% resultaram em aumento da permeabilidade comparado com o de 0%, sendo seus resultados sem variação significativa entre eles (TesteT = 97,3%).

Com estes resultados, a princípio, constata-se que a relação dos parâmetros ângulos de *raster* e distância do desalinhamento (*stagger*) com a permeabilidade final não tende a um padrão linear. A tendência da redução da permeabilidade conforme a redução do ângulo de *raster* e sem desalinhamento já era esperada, pois era considerado um fator que gerava maior dificuldade no escoamento.

Já no caso do desalinhamento, esperava-se uma redução na permeabilidade conforme variação do Δ de 0% a 50% independentemente do ângulo de *raster* adotado, devido a hipótese de que o aumento do Δ gera um aumento da tortuosidade nas geometrias e, conseqüentemente, uma dificuldade no escoamento. Isso só foi observado para o caso do $\theta 90^\circ$.

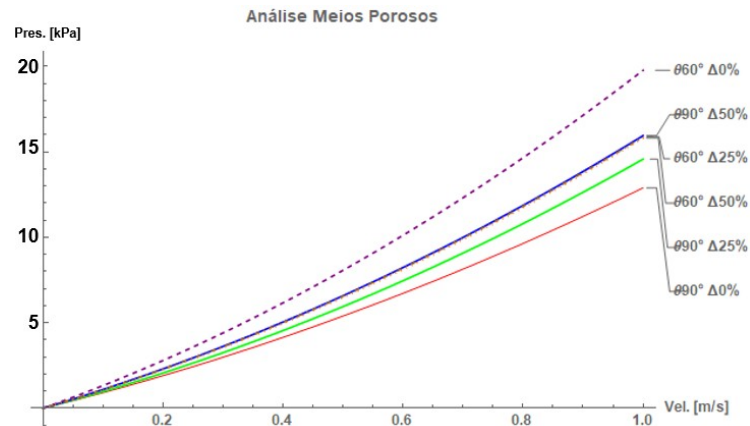
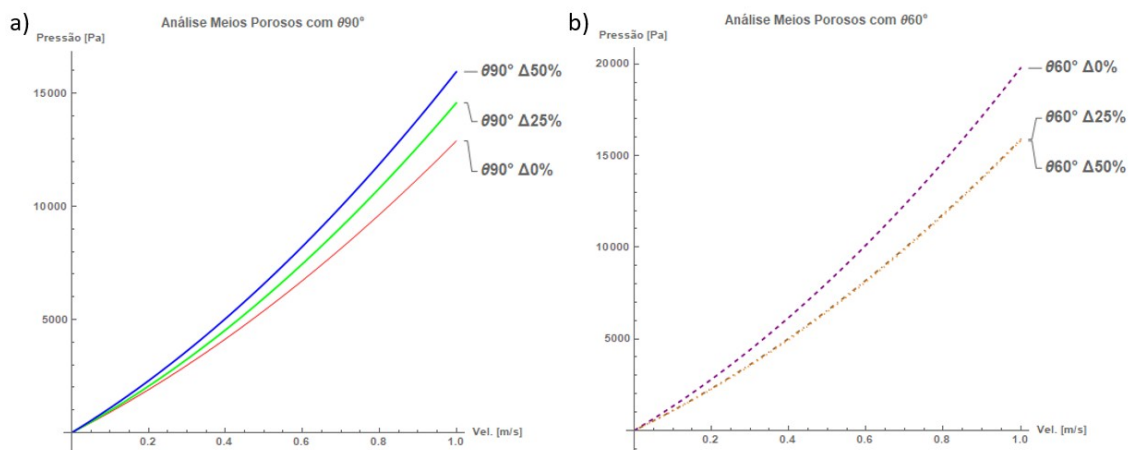


Figura 4. Gráfico da Velocidade x Pressão dos MP fabricados

Figura 5. Gráfico da Velocidade x Pressão dos MP fabricados em (a) $\theta 90^\circ$ e (b) $\theta 60^\circ$

4. CONCLUSÕES

A utilização de tecnologias AM de extrusão de material com materiais poliméricos é uma alternativa para fabricação de MP com geometria de poros planejadas. Para isso, é necessário dispor de um software de planejamento de processo que permita controlar parâmetros de preenchimento mais complexos, reduzindo-se ou eliminando-se a necessidade de modelagem 3D de todos os poros.

Para o incremento do ângulo de *raster* de 90° , conforme a distância de desalinhamento (*stagger*) aumenta, diminuiu a permeabilidade do MP, indicando um aumento da dificuldade do caminho do fluxo (ou seja, maior perda de carga). Esta mesma variação do desalinhamento apresentou resultados não conclusivos para um o incremento do ângulo de *raster* de 60° . Mais estudos (incluindo análise numérica) estão em andamento para auxiliar nesta análise.

5. AGRADECIMENTOS

À Repsol Sinopec Brasil S.A. pelo suporte ao desenvolvimento dessa pesquisa feita segundo a lei de incentivo a pesquisa, desenvolvimento e inovação da ANP (no. 9.478, 08/08/1997), ao Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) da UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, pela disponibilização do permeâmetro, e ao NUFER UTFPR pela infraestrutura.

6. REFERÊNCIAS

- Innocentini, M.D.M. e Pandolfelli, V.C., 1999. Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer. *Cerâmica*, v. 45, n. 292–293, p. 61–67.
- Ishutov, S. et al., 2018. “Three-dimensional printing for geoscience: Fundamental research, education, and applications for the petroleum industry”. *AAPG Bulletin*, v. 102, n. 1, p. 1–26.

- Kalita, S.J. et al., 2003. "Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling". *Materials Science and Engineering: C*, v. 23, n. 5, p. 611–620, out. 2003.
- Krambeck, L., 2018. "Estudo experimental do desempenho térmico de estruturas capilares de pó de cobre sinterizado em tubos de calor". 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Lee, J.S. et al., 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*, v. 100 A, n. 7, p. 1846–1853.
- Liu, P. e Chen, G.-F., 2014. "Porous materials processing and applications". 1st. ed. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann.
- Michailidis, N. et al., 2014. "Production, Characterization, and Applications of Porous Materials". v. 2014, p. 2–4;
- Sobral, J.M. et al., 2011. Three-dimensional plotted scaffolds with controlled pore size gradients: Effect of scaffold geometry on mechanical performance and cell seeding efficiency". *Acta Biomaterialia*, v. 7, n. 3, p. 1009–1018.
- Volpato, N. e Foggiaatto, J.A., 2009. "The development of a generic Rapid Prototyping process planning system". 4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping. Leiria, Portugal, 381–387.
- Volpato, N. Processos de AM por extrusão de material. In: Volpato, N. (Org.). *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Edgard Blücher, 2017, p. 145-178.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

PERMEABILITY ANALYSIS OF POLYMERIC POROUS MEDIA OBTAINED BY MATERIAL EXTRUSION ADDITIVE MANUFACTURING

Marcelo Okada Shigueoka¹

Neri Volpato²

^{1,2}Additive Manufacturing and Tooling Group (NUFER), Federal University of Technology - Paraná (UTFPR), R. Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000 - Campo Comprido, Curitiba - PR, CEP: 81280-340

¹mshigueoka@gmail.com, ²nvolpato@utfpr.edu.br

Thiago Antonini Alves

Laboratory of Porous Media and Energy Efficiency (LabMPEE), Federal University of Technology - Paraná (UTFPR), Av. Monteiro Lobato, s/n - Km 04 – Jardim Carvalho - Ponta Grossa – PR, CEP 84016-210
thigoalves@utfpr.edu.br

Abstract. Porous materials or porous media (PM) are applied in various industry sectors. The relevance of Additive Manufacturing (AM) in this area is increasing, as it enables the production of planned porosity. The additive principle known as the material extrusion presents an important differential in this area, because it allows to produce lattice type geometries, without the need to model each filament of the structure. This work presents a preliminary study on variations of pore geometry and PM permeability obtained directly by this AM technology. Using RP3 process-planning software, geometries varying raster angle and stagger distance (staggered raster) between layers were built in polymer and their permeability obtained through direct experimental measurement. The results indicate that the raster angles and stagger distance affect the permeability, but do not have a linear relation with it.

Keywords: Additive Manufacturing, Porous Media, Material Extrusion, Lattice, Permeability

RESPONSIBILITY NOTICE

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