

MÉTODOS DE CÁLCULO DE TRAJETÓRIA DE PREENCHIMENTO ZIGUE-ZAGUE PARA MANUFATURA ADITIVA

Ricardo Casagrande Faust, ricardocfaust@gmail.com¹

Neri Volpato, nvolpato@utfpr.edu.br¹

Rodrigo Minetto, rodrigo.minetto@gmail.com²

¹ Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) – UTFPR, Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER), Rua Deputado Heitor Alencar Furtado 5000, Ecoville, CEP 81280-340, Curitiba - PR – Brasil.

² Departamento Acadêmico de Informática (DAINF) – UTFPR, Av. 7 de setembro 3165, CEP 80230-901, Curitiba – PR – Brasil

Resumo: A manufatura aditiva é um processo no qual um objeto é fabricado com base em um modelo CAD, através da adição sucessiva de camadas de material. O planejamento do processo é a etapa anterior da fabricação, na qual o modelo CAD é processado e convertido em informações que serão utilizadas pela máquina de produção. Nesta fase a peça é fatiada em camadas, e para cada camada é identificada a área que deve ser preenchida com material. A escolha da estratégia de preenchimento utilizada é de fundamental importância para a manufatura aditiva, pois confere diferentes propriedades mecânicas ao objeto, além de impactar no tempo de fabricação da peça. Este trabalho apresenta uma revisão de uma das principais estratégias de preenchimento utilizada na tecnologia de extrusão de material (tipo Modelagem por Fusão e Deposição - FDM), que é a estratégia zigue-zague (raster), e tem por objetivo identificar os diferentes métodos computacionais utilizados para o cálculo deste preenchimento. A metodologia utilizada foi a revisão de bibliografia e identificação do estado da arte no cálculo dos pontos de preenchimento. Por fim, o estudo destaca os principais desafios e complexidades desta estratégia de preenchimento.

Palavras-chave: manufatura aditiva, estratégias de preenchimento, zigue-zague, raster

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos se nota um crescente interesse pelas, popularmente conhecidas, impressoras 3D. Estas máquinas têm como promessa permitir ao usuário produzir peças em sua própria casa a partir de um modelo computacional que pode ser obtido na internet. Esta é uma tecnologia que, apesar de ser apresentada recentemente, existe há muitos anos e é chamada de manufatura aditiva (AM – *Additive Manufacturing*).

O processo trata-se da produção de peças através da adição sucessiva de camadas de material através de dados obtidos diretamente de modelos geométricos CAD (*Computer-Aided Design*) 3D, que pode ser executada através de diversos princípios de adição (Volpato e Da Silva, 2017), conforme classificados na Fig. (1).



Figura 1. Princípios das tecnologias de AM

Cada tecnologia de AM disponível realiza a adição de material por um princípio diferente e possui suas próprias vantagens e aplicações. Um dos princípios mais conhecidos é o de Extrusão de Material, onde se destacam a tecnologia comercial denominada de modelagem por fusão e deposição (FDM) e a grande maioria das impressoras de bancada de baixo custo. Neste princípio de AM, a máquina movimenta um bico de extrusão que deposita material fundido na área relacionada ao interior de cada camada. O material, geralmente termoplástico, é aquecido a um estado semilíquido e se solidifica no momento da extrusão, aderindo à camada anterior e à filamentos vizinhos da mesma camada. A grande

vantagem das tecnologias que se baseiam na Extrusão de Material é a simplicidade do princípio de adição, que pode gerar peças de alta resistência a um custo eficiente para alguns materiais termoplásticos (Wong e Hernandez, 2012).

Todavia, independente da tecnologia utilizada, a fabricação de um objeto percorre etapas comuns na AM, que servem para converter um modelo computacional (CAD – *Computer-Aided Design*) de uma peça em instruções que serão utilizadas pela máquina de fabricação. Este procedimento, chamado de planejamento do processo (Kulkarni et al., 2000), tem como principais etapas o fatiamento, que divide a peça em camadas sucessivas; e o cálculo do preenchimento da camada, que identifica a área interna a ser preenchida com o material (Fig. 2). No princípio de Extrusão de Material, esta área define a trajetória do bico de extrusão para o preenchimento da camada.

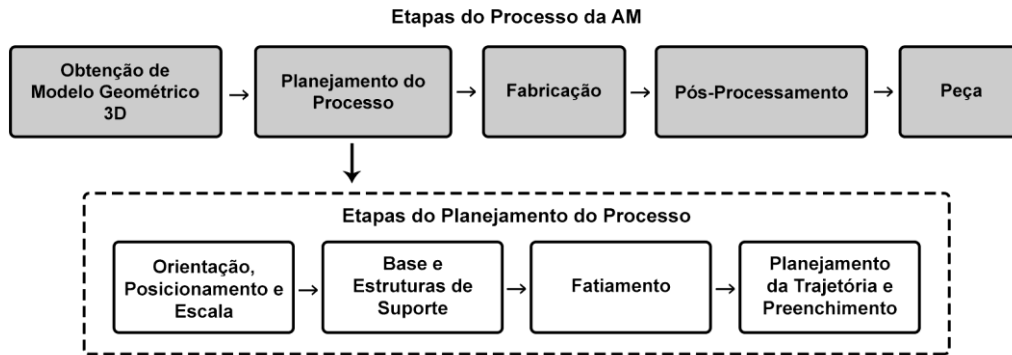


Figura 2. Planejamento do Processo (Adaptado de Volpato e Da Silva, 2017)

Comumente o sistema de planejamento de processo permite ao usuário controlar os parâmetros utilizados nos cálculos do preenchimento, que possuem grande influência no tempo de fabricação e nas propriedades mecânicas da peça. Muitos estudos buscam otimizar estes parâmetros, a fim de obter melhores resultados de eficiência ou qualidade de fabricação (Jin et al., 2014b).

Com base nas informações obtidas no planejamento do processo, o sistema de planejamento gera arquivos com instruções específicas para cada máquina e tecnologia de fabricação. Desta forma, um mesmo planejamento de processo pode ser utilizado para gerar instruções e produzir peças em máquinas com tecnologias diferentes.

Neste artigo, é detalhado a etapa de cálculo do preenchimento da camada, em um planejamento de processo focado no princípio de extrusão de material (tecnologia FDM e todas as impressoras de pequeno porte baseado neste princípio).

2. PREENCHIMENTO DA CAMADA

Durante o planejamento de processo, a etapa de cálculo de preenchimento da camada tem como objetivo identificar a área na qual o material deve ser depositado para que a camada seja preenchida. Nas tecnologias de extrusão de material, esta área é descrita por uma série de pontos que definem o trajeto, também conhecido como *toolpath*, cujo bico de extrusão da máquina deve percorrer e depositar o material fundido. Tal cálculo é realizado para cada uma das camadas a serem fabricadas e segue um formato específico, denominado estratégia de preenchimento.

A escolha da estratégia de preenchimento é de fundamental importância para o planejamento do processo, visto que possui grande impacto no tempo de fabricação da peça e em diversas propriedades físicas da mesma, como por exemplo, resistência mecânica, qualidade da superfície e peso. As principais estratégias de preenchimento se encaixam em três grupos: curvas de contorno paralelo (*contour-parallel*), curvas de direção paralela (*direction-parallel*) e curvas de Hilbert (*Hilbert curves*), conforme apresentado na Fig. (3). Além das estratégias mencionadas, existem outros formatos de curvas de preenchimento adequadas ao processo de extrusão de material, como por exemplo, cordas de Arquimedes, espiral de octagrama e padrão colmeia.

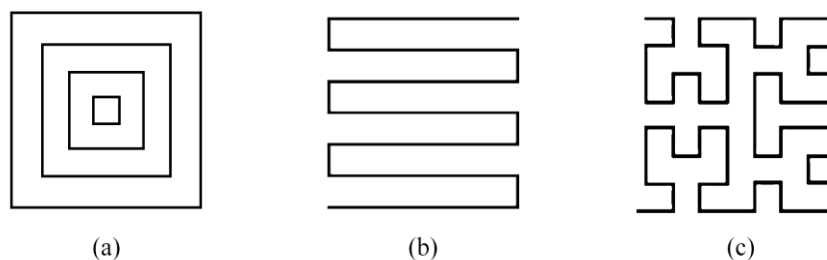


Figura 3. Estratégias de Preenchimento: (a) Contorno Paralelo, (b) Direção Paralela, (c) Curvas de Hilbert

As estratégias de contorno paralelo, apresentadas na Fig. (3a), preenchem o interior de cada camada através de sucessivas curvas paralelas e equidistantes (*offsets*) ao contorno da superfície da peça. Uma otimização e exemplo desta estratégia é a conexão do fim de uma curva com o início da próxima, criando assim um formato de espiral. O cálculo do preenchimento deste grupo de estratégias é computacionalmente intensivo, mas tem como grande vantagem a garantia de uma qualidade de superfície superior. Nas tecnologias de extrusão de material, a utilização da estratégia de contorno paralelo pode resultar na indesejada deposição de filamentos paralelos em camadas sucessivas, conferindo a peça uma resistência mecânica inferior (Yang et al., 2002). Além disso, as curvas de contorno paralelo comumente fazem com que o bico de extrusão realize frequentes mudanças de direção, impedindo a máquina de atingir sua velocidade máxima, aumentando assim o tempo de fabricação da peça. Por tal motivo, esta não é a estratégia mais adequada à tecnologia FDM.

Nas estratégias de direção paralela, demonstradas na Fig. (3b), o preenchimento é feito com uma trajetória que segue linhas paralelas a uma determinada direção. Esta é também comumente denominada de estratégia tipo *raster*. Os dois principais métodos de direção paralela são o Zigue e o Zigue-zague, sendo o primeiro deles inadequado a tecnologia FDM. Além de ser computacionalmente mais simples, estas estratégias geram filamento mais longos, permitindo a máquina atingir sua velocidade máxima. Os filamentos de camadas sucessivas podem ser orientados de modo perpendicular, resolvendo o problema das estratégias de contorno paralelo. No entanto, quando utilizada como única estratégia de preenchimento, gera uma peça com qualidade de superfície inferior e por este motivo, diversos estudos (Jin et al., 2011; Tarn e Chen, 2014) recomendam uma abordagem híbrida, na qual se utiliza uma curva de contorno paralelo na borda da camada, para se obter uma qualidade de superfície superior, e curvas de direção paralela, com formato zigue-zague, no preenchimento do interior da camada, para se reduzir o tempo de fabricação e obter uma resistência mecânica maior. Desta forma, o preenchimento é composto por uma ou mais curvas de contorno e a trajetória de preenchimento zigue-zague no interior da camada. Exemplos destas estratégias podem ser vistos na Fig. (4).

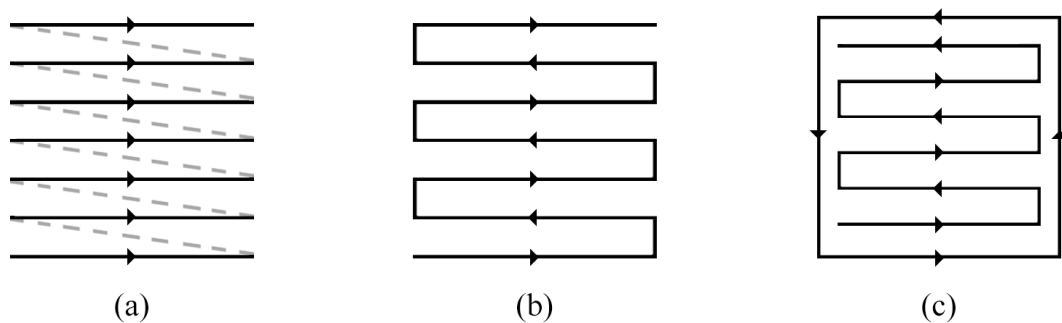


Figura 4. (a) Zigue, (b) Zigue-Zague, (c) Abordagem Híbrida

As curvas de Hilbert, apresentadas na Fig. (3c), são um grupo de curvas contínuas com formato fractal que preenchem um polígono e foram descritas inicialmente pelo matemático David Hilbert em 1891. Elas têm como grande vantagem a fácil implementação e conferem à peça uma resistência mecânica superior. Porém, devido ao grande número de mudanças de direção necessárias, o tempo de fabricação é o maior dentre as estratégias de preenchimento de sólidos e é recomendado a apenas algumas aplicações específicas.

3. ESTRATÉGIA DE ZIGUE-ZAGUE

O cálculo do preenchimento para a estratégia de zigue-zague já é conhecido há vários anos e teve início no estudo de usinagem de cavidade (bolsões), cujo objetivo é fazer a remoção de material do interior de uma região da peça. Este problema específico é muito similar ao observado no processo de AM, porém contém algumas diferenças (Tarabanis, 2001; Urbanic et al., 2016). A principal delas é que na usinagem de cavidades a ferramenta pode percorrer um mesmo ponto mais de uma vez, sem prejuízos reais a peça. Já na AM, ao percorrer um mesmo ponto, a máquina deposita material mais de uma vez, causando defeitos de fabricação.

3.1. Definição do Problema

O método desejado deve calcular os pontos que definem o trajeto em zigue-zague do bico de extrusão com base em um conjunto de polígonos que definem o contorno e a superfície de uma camada da peça. No entanto, antes de estudar os métodos para o cálculo do preenchimento, é necessário que sejam estabelecidas algumas definições.

Define-se como polígono convexo, um polígono em que todos os ângulos internos possuem valores menores que 180°. Como consequência, quaisquer retas traçadas no plano intersectam um polígono convexo no máximo duas vezes,

como visto na Fig. (5a). Os polígonos que possuem ao menos um ângulo com valor maior que 180° são chamados de polígonos não convexos, ou ainda, polígonos côncavos. Nestes polígonos podem haver retas que os intersectam em mais de dois pontos, conforme Fig. (5b).

Define-se como ilha, um contorno que identifica uma superfície interna da peça e delimita uma região no interior da camada que não deve ser preenchida com material. Um exemplo de um contorno com uma ilha pode ser visto na Fig. (5c).

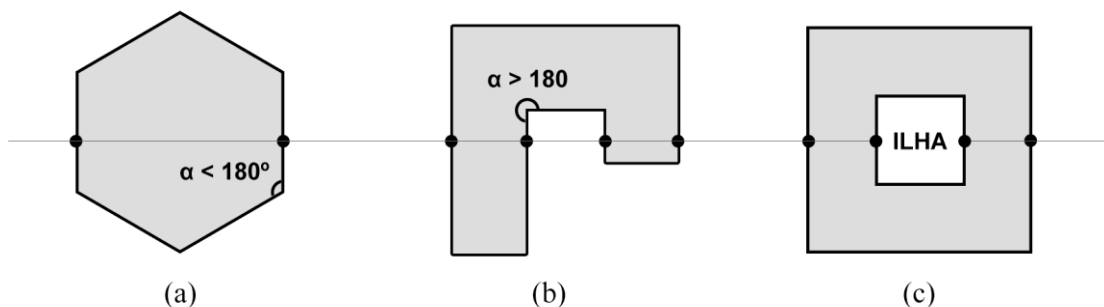


Figura 5. (a) Polígono Convexo, (b) Polígono Não Convexo, (c) Contorno com uma Ilha

O cálculo do preenchimento de um polígono convexo sem ilhas pode ser facilmente realizado. Inicialmente, se identificam as intersecções entre as retas de referência e o polígono. Em seguida, a lista de intersecções é percorrida realizando as conexões entre os pontos, acompanhando o contorno do polígono e gerando um único trajeto contínuo em zigue-zague, conforme Fig. (6). No entanto, na medida que as camadas contêm polígonos não convexos ou ilhas, o cálculo se torna muito mais complexo, pois nestes casos pode ser necessário mais de um trajeto para preencher completamente a área da camada. Caso o algoritmo não leve em consideração este fato, o resultado pode conter áreas não preenchidas, conforme Fig. (7).

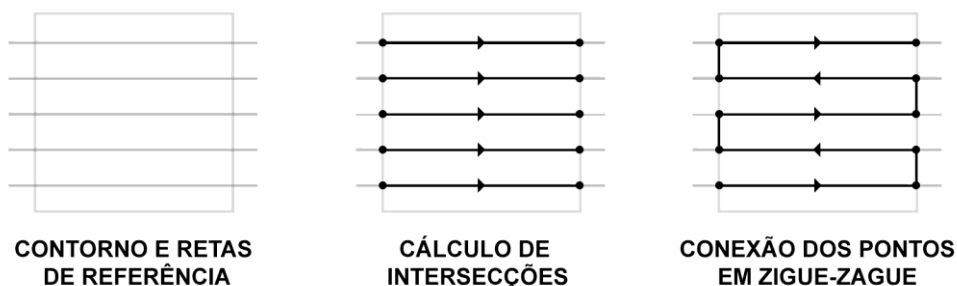


Figura 6. Cálculo do preenchimento em zigue-zague para polígonos convexos sem ilhas

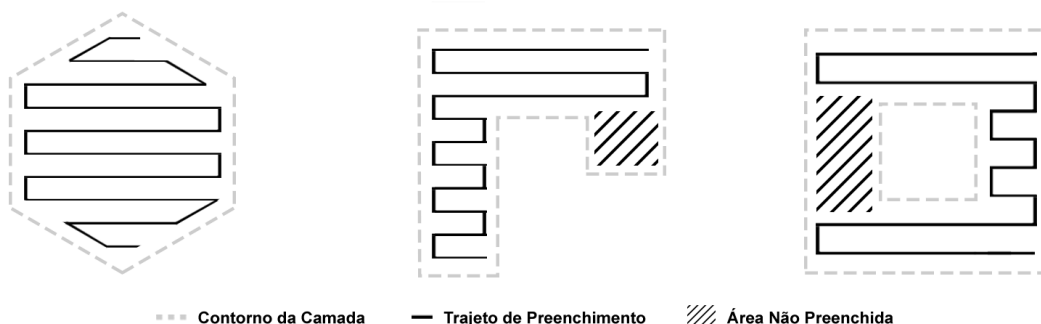


Figura 7. Exemplo do problema de preenchimento de camadas complexas

O grande desafio do cálculo do preenchimento é gerar todos os trajetos necessários para o preenchimento completo da camada, sem deixar áreas não preenchidas, independente do formato do polígono ou do número de ilhas. Diversos pesquisadores apresentaram soluções para este problema, com métodos que realizam o preenchimento completo das camadas e que são descritos na próxima seção.

3.2. Métodos para o Cálculo do Preenchimento

Um dos trabalhos que investiga o cálculo da estratégia de zigue-zague foi realizado por Martin Held em 1991. O método proposto (Held, 1991), ainda que focado na usinagem, utiliza um algoritmo de varredura (Preparata e Shamos, 1985) para inicialmente identificar as intersecções entre as retas paralelas e os contornos da peça, criando assim uma rede desconexa de pontos. Em seguida, tal rede é percorrida, conectando os pontos e gerando o *toolpath* em zigue-zague. O algoritmo marca cada ponto percorrido como “visitado” e ao encontrar mais de duas intersecções em uma única reta, marca os pontos que não foram conectados como “pendentes”. Ao concluir um *raster*, o algoritmo reinicia o cálculo selecionando um ponto “pendente”, até que todas as pendências sejam resolvidas e toda a área da camada seja preenchida.

Seguindo este trabalho, Park e Choi (2000) apresentam um método de cálculo aprimorado que executa as mesmas etapas básicas de Held: identificando inicialmente as intersecções entre as retas e o contorno, e realizando a conexão entre os elementos. A grande contribuição deste estudo está em realizar um processamento inicial do contorno identificando os vértices reflexivos que causam a divisão do *toolpath*. O artigo apresenta um maior nível de detalhamento e definição das etapas do algoritmo e leva em conta um número maior de objetivos, como por exemplo, minimizar o número de segmentos do *toolpath*, maximizar o tamanho médio dos elementos do *toolpath* e identificar a inclinação ótima da direção de referência, conhecida como ângulo de *raster*. A rede de pontos de intersecção gerada no algoritmo de Park e Choi é mais robusta e permite a conexão dos elementos do *toolpath* com mais facilidade. A Figura (8) exhibe um exemplo deste método.

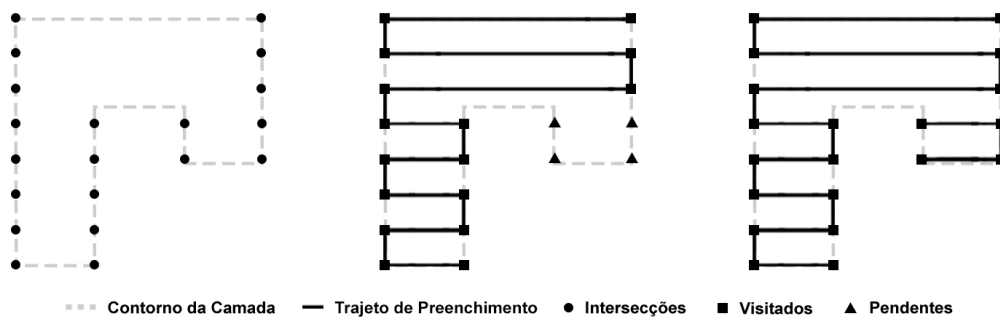


Figura 8. Solução apresentada por Held (1991) e Park e Choi (2000): Marcar pontos como visitados ou pendências

Jin et al. (2014a) estuda a influência da largura do filamento para minimizar áreas com preenchimento excessivo ou deficiente. A estratégia utilizada foi de dividir o contorno da peça em sub-regiões, que não são necessariamente convexas, e para cada uma delas selecionar uma largura de filamento adequada. Ao fim do processo as sub-regiões são conectadas novamente a fim de gerar o *toolpath*, conforme Fig. (9). Técnica similar é utilizada por Routhu (2010) e Qiu e Langrana (2002).

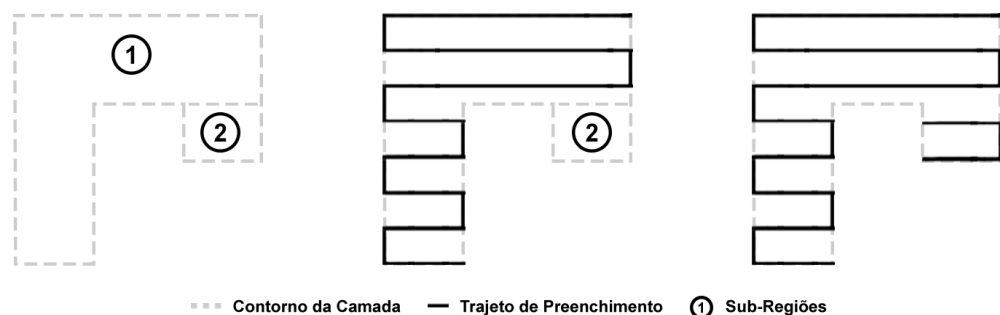


Figura 9. Solução apresentada por Jin et al. (2014a): Dividir o contorno em sub-regiões

O estudo de Dwivedi e Kovacevic (2004) investiga o cálculo do preenchimento para tecnologias de AM baseadas em soldagem, na qual é necessário gerar um trajeto de deposição fechado e contínuo. A solução apresentada divide o contorno em polígonos monótonos, tornando o cálculo do preenchimento muito mais simples. O algoritmo então calcula o *toolpath* para cada um dos polígonos separadamente e ao fim conecta os *toolpaths* gerando um trajeto único, conforme Fig. (10).

Ding et al. (2014) seguiram uma abordagem muito similar a Dwivedi e Kovacevic ao estudar o cálculo de *toolpath* para a tecnologia WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*). No entanto, ao fazer a divisão do contorno em polígonos convexos, o autor aplica otimizações específicas a cada um dos polígonos, gerando um *toolpath* ótimo para cada região do contorno, demonstrando assim, o grande benefício da decomposição do contorno.

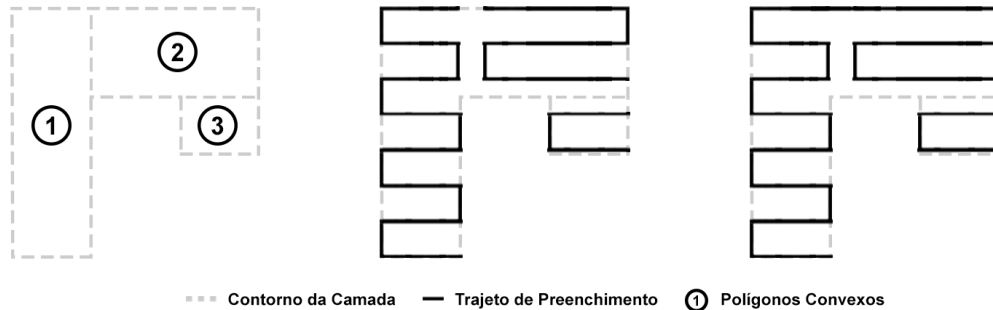


Figura 10. Solução apresentada por Ding et al. (2014): Dividir o contorno em polígonos convexos

No geral, todos os artigos mantêm as mesmas etapas para o cálculo do preenchimento, que são: identificar as intersecções entre as retas e o contorno; percorrer a lista de intersecções conectando os pontos; e gerar um trajeto em zigue-zague. Para solucionar os problemas com polígonos não convexos os algoritmos seguem uma das seguintes estratégias: marcar pontos como “visitados”; dividir o contorno em sub-regiões; ou dividir o polígono em polígonos monótonos ou convexos.

3.3. Otimizações do Preenchimento

Diversos estudos foram realizados com o objetivo de otimizar os parâmetros do cálculo do preenchimento para se obter melhores resultados de qualidade ou eficiência de fabricação.

Jin et al. (2013) estudam a influência do comprimento do filamento na velocidade do bico de extrusão e no tempo de fabricação da peça. Para identificar o trajeto com melhor eficiência, o método proposto calcula o *toolpath* para diferentes ângulos de *raster*, escolhendo o melhor resultado como *toolpath* final.

De modo similar, Jin et al. (2014b) utiliza o ângulo de *raster* como principal fator para a geração de um *toolpath* ótimo focado em eficiência (tempo de fabricação) ou qualidade (qualidade de superfície). O método proposto avalia os objetivos para diferentes valores de inclinação, realizando simulações e identificando as direções com os melhores resultados.

4. CONCLUSÕES

O cálculo do preenchimento na AM tem grande influência no processo de fabricação. No entanto, a maior parte dos artigos destinados ao estudo do cálculo do preenchimento zigue-zague busca apenas a otimização nos seus parâmetros e pouco tem se estudado sobre o algoritmo de cálculo em si.

A divisão do contorno em polígonos convexos mais simples (ou em sub-regiões) torna o cálculo do preenchimento muito mais fácil e tem se mostrado uma etapa importante nos métodos propostos. No entanto, poucos deles (Ding et al. 2014; Sajan et al. 2016) aproveitam o seu real benefício, que é de otimizar o preenchimento especificamente para cada polígono, gerando um *toolpath* melhor. Nos outros casos, esta etapa é utilizada apenas para o cálculo simples do preenchimento, sendo que logo após, os *toolpaths* são novamente conectados. Um algoritmo que elimine esta fase do procedimento irá gerar grandes benefícios ao sistema de planejamento de processo.

O tempo computacional utilizado para o cálculo do preenchimento gera impactos não só ao planejamento do processo, como também à própria peça, afetando o tempo e a qualidade de fabricação. Como visto no trabalho de Jin et al. (2014b), a otimização da fabricação é muitas vezes obtida através de simulações com variações nos parâmetros de preenchimento, como por exemplo, a distância entre filamentos e o ângulo das retas de referência. Visto que uma peça pode conter centenas de camadas, o tempo total de simulação pode inviabilizar a otimização dos parâmetros, caso ultrapasse o limite de tempo de processamento esperado pelo usuário.

O desenvolvimento de um algoritmo mais rápido para o cálculo do preenchimento traz grandes benefícios ao planejamento do processo, uma vez que permite ao sistema executar um número maior de simulações e variações mais finas para se obter o melhor preenchimento possível.

Trabalhos futuros se concentrarão em estudar diferentes métodos de cálculo de preenchimento, utilizando a estratégia de zigue-zague para contornos complexos, sem a necessidade da decomposição do contorno em polígonos convexos, com

o objetivo de reduzir o tempo computacional necessário para o cálculo e obter uma menor complexidade de implementação do algoritmo.

5. REFERÊNCIAS

- Ding, D., Pan, Z., et al., 2014, “A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 1–4, p.173–183.
- Dwivedi, R. e Kovacevic, R., 2004, “Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding”. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 23, No. 4, p.278–291.
- Held, M., 1991, “A geometry-based investigation of the tool path generation for zigzag pocket machining”. *The Visual Computer*, Vol. 7, No. 5–6, p.296–308.
- Jin, G.Q., Li, W.D., et al., 2011, “Adaptive tool-path generation of rapid prototyping for complex product models”. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 30, No. 3, p.154–164.
- Jin, G.Q., Li, W.D., et al., 2013, “An adaptive process planning approach of rapid prototyping and manufacturing”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, No. 1, p.23–38.
- Jin, Y.A., He, Y., Xue, G.-H., et al., 2014a, “A parallel-based path generation method for fused deposition modeling”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 77, No. 5–8, p.927–937.
- Jin, Y.A., He, Y., Fu, J. zhong, et al., 2014b, “Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology”. *Additive Manufacturing*, Vol. 1, , p.32–47.
- Kulkarni, P., Marsan, A., et al., 2000, “A review of process planning techniques in layered manufacturing”. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6, No. 1, p.18–35.
- Park, S.C. e Choi, B.K., 2000, “Tool-path planning for direction-parallel area milling”. *CAD Computer Aided Design*, Vol. 32, No. 1, p.17–25.
- Preparata, F.P. e Shamos, M.I., 1985, “Computational Geometry”, New York, NY: Springer New York. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4612-1098-6>.
- Qiu, D. e Langrana, N. a., 2002, “Void eliminating toolpath for extrusion-based multi-material layered manufacturing”. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 1, p.38–45.
- Routhu, S., 2010, “2D path planning for direct laser deposition process”. *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference*, p.1–9.
- Sajan, K., Prathamesh, J., et al., 2016, “Optimal space filling for additive manufacturing”. *Rapid Prototyping Journal*. Available at: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/RPJ-03-2015-0034>.
- Tarabanis, K.A., 2001, “Path planning in the Proteus rapid prototyping system”. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 7, No. 5, p.241–252.
- Tarn, T. e Chen, S., 2014, “Welding , Intelligence and Automation”,
- Urbanic, R.J., Hedrick, R.W., et al., 2016, “A process planning framework and virtual representation for bead-based additive manufacturing processes”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-016-9392-8>.
- Volpato, N. e Da Silva, J.V.L., 2017, “Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D”, Edgar Blucher.
- Wong, K. V. e Hernandez, A., 2012, “A Review of Additive Manufacturing”. *ISRN Mechanical Engineering*, Vol. 2012, , p.1–10.
- Yang, Y., Loh, H.T., et al., 2002, “Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing”. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 1, p.30–37.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

METHODS OF ZIGZAG TOOLPATH GENERATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Ricardo Casagrande Faust, ricardocfaust@gmail.com¹

Neri Volpato, nvolpato@utfpr.edu.br¹

Rodrigo Minetto, rodrigo.minetto@gmail.com²

¹ Department of Mechanical Engineering (DAMEC) – UTFPR, Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER), Rua Deputado Heitor Alencar Furtado 5000, Ecoville, CEP 81280-340, Curitiba – PR – Brasil.

² Department of Informatics (DAINF) – UTFPR, Av. 7 de setembro 3165, CEP 80230-901, Curitiba – PR – Brasil

Abstract: Additive Manufacturing (AM) is a process in which an object is produced by adding successive layers of material based on a CAD model. Process planning is the stage prior to the fabrication, in which the CAD model is processed and converted in instructions that will be used by the machine. In this stage, the object is sliced in layers and for each layer it is identified the area that should be filled with material. Choosing the filling strategy is of great importance to AM, since it influences the mechanical proprieties of the piece, also defining the manufacturing time. This article presents a review of one of the most important filling strategies used in the fused deposition modelling (FDM), the zigzag (raster) strategy, and aims to identify the different methods used to generate the toolpath. The methodology used was to review previous works and identify the state-of-art in zigzag toolpath generation. Finally, it is presented the main challenges and complexities in this filling strategy.

Keywords: additive manufacturing, filling strategy, zigzag, raster, toolpath