

DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR AUTOMÁTICO DE MODELOS A PARTIR DO CÓDIGO G PARA SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

Rodrigo Martins Farias^a

Rafael Pereira Ferreira^b

Louriel Oliveira Vilarinho^a

^aUniversidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, Faculdade de Engenharia Mecânica, MG, Brasil

^bInstituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus Barra do Corda, MA, Brasil

rodrigofarias.mec@gmail.com

rafael.ferreira@ifma.edu.br

vilarinho@ufu.br

Resumo. Os processos de manufatura aditiva (MA) de metais permitem criar peças tridimensionais através da adição de sucessivas camadas de material, a partir de dados de um modelo computacional 3D. Entre as diversas variantes da MA, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) vem ganhando destaque por atender a necessidade de impressão de componentes de grandes dimensões com modesta complexidade e alta taxa de produção. Apesar destas vantagens, muitos problemas devem ser superados, logo, uma melhor compreensão física do processo pode fornecer uma visão mais abrangente sobre a MADA. Nesse contexto, a modelagem e simulação computacional do processo fornecem um mecanismo poderoso para desenvolver esta compreensão. A criação do modelo computacional na etapa de pré-processamento é fundamental, e encurtar e automatizar esse processo é algo muito desejável para o projeto de componentes manufaturados. Neste trabalho foi desenvolvido um software que executa a tradução do código de deposição (código G) de uma peça a ser fabricada por MADA para a linguagem de um software de simulação. A partir do código gerado, são efetuadas a construção da geometria e da malha de elementos finitos, de maneira automatizada. Resultados parciais são apresentados, demonstrando o potencial da metodologia e algumas limitações encontradas para as peças selecionadas.

Palavras chave: Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. Código G. Simulação Numérica. MADA. Planejamento da Impressão.

1. INTRODUÇÃO

A norma ISO/ASTM 52900:2015 define a Manufatura aditiva (MA) como o processo de agregar materiais, normalmente camada por camada, de forma a construir um objeto a partir de dados de um modelo geométrico computacional 3D, ao contrário do aplicado nas metodologias de fabricação subtrativas, como a usinagem por exemplo. Esse modelo computacional 3D, geralmente é projetado num software de desenho auxiliado por computador (CAD) ou obtido pela digitalização de componentes. Para que o material seja agregado camada a camada, informações do modelo tridimensional devem ser tratadas para que as trajetórias de deposição de material sejam planejadas para cada camada, assim como outros parâmetros do processo. Essas etapas são conhecidas como o planejamento do processo de impressão, que possui o modelo tridimensional como entrada e o código de máquina como saída (para movimentação de uma mesa CNC ou um braço robótico). Entre as vantagens da MA, Gisario et al. (2019) destacam a redução no desperdício de materiais, encurtamento dos prazos de produção, alta flexibilidade, viabilidade de produtos de geometria mais complexa e ciclo de desenvolvimento de produto mais curto. Devido a essas características, a MA, popularmente conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia que tem potencial para revolucionar diferentes segmentos da indústria. Porém, as vantagens já citadas são generalistas, e podem ser mais específicas a depender do tipo de material a ser impresso.

Quando nos referirmos a materiais metálicos, segundo Jafari et al. (2021), a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) vem ganhando destaque por atender a necessidade de impressão de componentes grandes (1000-3000 mm) com modesta complexidade e alta taxa de produção (50-130 g/min). Essa forma de impressão é formada basicamente por um arco elétrico que funde um arame metálico continuamente alimentado e o deposita camada a camada até a impressão da peça por completo. Para que isso ocorra, basicamente, é necessária uma fonte de soldagem, um sistema de alimentação do arame e um sistema de movimentação da fonte de calor. Entre outras vantagens da MADA, Karayel e Bozkurt (2020) complementam com a alta eficiência, baixo custo, altas taxas de deposição e flexibilidade de trabalhar com vários metais dessa tecnologia.

Todavia, apesar das vantagens da MADA já descritas, existem muitos problemas a serem superados. Uma melhor compreensão física do processo de MADA pode fornecer uma visão abrangente sobre as sensibilidades aos parâmetros

de processo. Essa compreensão é um elemento essencial da qualificação da peça, e permite um maior controle do processo, que por sua vez melhora a probabilidade de produção de peças qualificadas. Nesse contexto, a modelagem e simulação computacional do processo fornecem um mecanismo poderoso para desenvolver esta compreensão. Vários autores (King *et al.*, 2015; DebRoy *et al.*, 2018) destacam as necessidades e benefícios de uma modelagem do processo. Abordagens como o Método dos Elementos Finitos (MEF), por exemplo, tem se mostrado muito populares (Schoinochoritis *et al.*, 2015) no estudo destes fenômenos físicos. No entanto, a modelagem envolve diferentes etapas, que muitas vezes podem consumir muito tempo caso não sejam bem planejadas.

A criação da geometria é considerada uma etapa de pré-processamento na simulação computacional. Em relação ao uso das geometrias na simulação numérica, vários contratempos podem surgir. Primeiramente, softwares de simulação não possuem as mesmas funcionalidades de desenho 3D que os softwares CAD tradicionais possuem. Logo, com exceção de geometrias simples, o componente a ser simulado precisa ser importado, caso contrário o tempo necessário para desenhá-lo torna-se proibitivo.

Outro ponto envolve a própria importação em si. Inicialmente, o software CAD utilizado para projeto deve ser capaz de exportar a geometria em um formato de arquivo digital que seja reconhecido pelo software de simulação utilizado. Após a importação, deve ser executado o processo de “limpeza” da geometria: como CAD e simulação trabalham de maneiras diferentes na criação de formas geométricas, o processo de importação muitas vezes cria formas adicionais, que devem ser retiradas ou modificadas no software de simulação, para que o processo seguinte, de geração da malha (MEF), não sofra interferência de geometrias não desejadas. Além disso, a simulação também exige a chamada simplificação da geometria: muitos detalhes geométricos, necessários para a correta fabricação das peças, tendem a gerar singularidades na simulação, assim como pontos com tensões muito elevadas. Assim, é comum que o engenheiro de simulação use algumas hipóteses simplificadoras, como remoção de pequenos furos e reentrâncias, ressalto, raios de adoçamento, mantendo apenas os recursos geométricos mais importantes e que podem fazer diferença na análise numérica.

Todas estas etapas de pré-processamento da simulação (geração da geometria, importação, limpeza e simplificação) tendem a consumir muito tempo do engenheiro, que poderia ser melhor utilizado para analisar resultados e tomar decisões. Logo, encurtar e automatizar esse processo é algo desejável do ponto de vista do projeto de componentes manufaturados.

Atualmente, softwares como ANSYS Additive e SIMUFACT Additive utilizam bibliotecas de estratégias de deposição dos próprios equipamentos de manufatura, na simulação do processo de MA em leito de pó. Mas tais estratégias não possuem aplicação direta no processo MADA. Dada a diferente natureza entre processos PBF (*Powder Bed Fusion*) e DED (*Directed Energy Deposition*), uma alternativa seria a utilização de softwares *in-house*, capazes de auxiliar na modelagem do processo MADA, principalmente no uso e teste de diferentes estratégias de deposição do material.

Visto que a saída do planejamento do processo de impressão por MADA é o código G (para uma mesa de coordenadas), surge a oportunidade de usar este mesmo código para gerar as geometrias necessárias para simular tal componente, visando o estudo dos seus ciclos térmicos, distorções e tensões residuais, assim como qualquer grandeza que possa ser obtida via simulação. Como o código G para a MADA já evita alguns detalhamentos excessivos do componente, visto que a peça feita por MADA ainda sofrerá algum pós-processamento, a etapa de simplificação geométrica para a simulação acaba por ser encurtada. E usando o próprio código G para gerar a geometria dentro do software de simulação, a etapa de importação é eliminada, e a de limpeza da geometria é grandemente reduzida, ou até suprimida. Uma das desvantagens é que a peça não ficaria exatamente idêntica ao CAD original. No entanto, se as diferenças não impactarem nos resultados da simulação computacional da peça, tal desvantagem não demonstra nenhuma gravidade para a avaliação do componente.

Outro ponto importante, é que o código G pode ser usado para movimentar a fonte de calor na simulação, visto que o código representa o caminho de deslocamento da tocha no processo MADA, eliminando outra grande etapa de pré-processamento da simulação.

Conforme as questões apresentadas, o atual trabalho consiste em desenvolver uma ferramenta (aplicativo), em software livre, utilizando a linguagem Python, que executa a tradução do código de deposição (código G) de uma peça a ser fabricada por MADA para a linguagem de um software de simulação. A partir do código G gerado por um fatiador (*slicer*), serão criados os comandos necessários para o software de simulação efetuar a construção da geometria e da malha de elementos finitos, de maneira automatizada. A solução também utilizará o código gerado para efetuar a movimentação da fonte de calor na simulação do processo. A metodologia será aplicada ao software ANSYS, mas pode ser adaptada a qualquer software de simulação numérica.

2. METODOLOGIA

Para gerar o código G dos componentes, foi usado um software de planejamento do processo de impressão desenvolvido por Ferreira e Scotti (2020). O fluxo de trabalho básico está descrito na Fig. 1, e tem como primeiro passo a modelagem tridimensional da peça, Fig. 1(a). Neste trabalho o software CAD utilizado foi o Inventor da Autodesk. Após isso, ainda no software de modelagem, o desenho é exportado para um arquivo com formato STL (*StereoLithography*). Com este formato de arquivo o modelo tridimensional é transformado num modelo de dados que pode ser lido pelo software “fatiador” para iniciar o planejamento da impressão, Fig. 1(b). A Fig. 1(c) mostra a etapa de fatiamento do modelo em camadas equidistantes no sentido do eixo vertical z. Após isso, a trajetória é planejada para

cada camada. As trajetórias consistem em vetores (x, y, z) (ilustrados em verde na Fig. 1(d)) que indicam toda movimentação a ser realizada pela tocha de deposição. Todo o conjunto de vetores foram inseridos numa matriz que depois foi convertida em código G. Mais detalhes do funcionamento do software estão disponíveis em Ferreira e Scotti (2020).

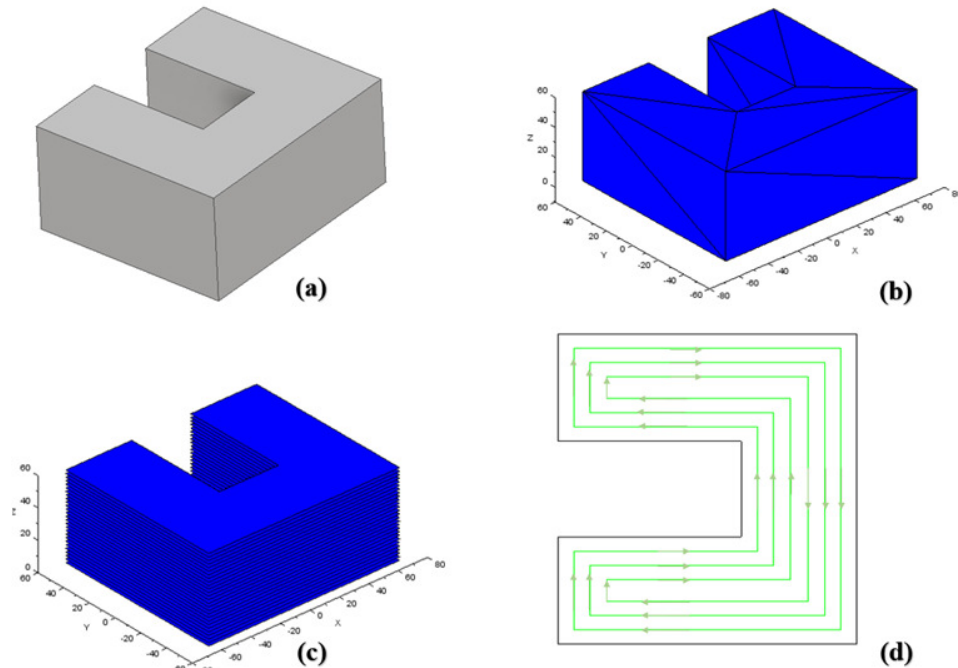


Figura 1. Fluxo de trabalho da impressão: (a) modelagem tridimensional no CAD; (b) modelo tridimensional em formato .stl; (c) modelo fatiado em camadas equidistantes e (d) trajetórias geradas para execução da impressão.

Para a etapa de pré-processamento da simulação, visando construir a geometria que será simulada, foi criado um software em linguagem Python, que faz a leitura desta trajetória vetorial, obtida diretamente do código G gerado. De posse de todos os pontos da trajetória, utilizasse os comandos nativos dos software de simulação, neste caso o ANSYS APDL, para criar as geometrias primitivas que representam a trajetória, os volumes que representarão a adição do material, e a malha (neste trabalho utilizou-se hexaedros) de elementos finitos necessária para a simulação numérica. A única interação com o usuário é a escolha do arquivo com a trajetória em código G, enquanto as etapas restantes ocorrem de maneira automatizada, entregando ao final a geometria (com malha) pronta para dar continuidade a etapa de pré-processamento, como definição de condições de contorno e aplicação das cargas.

Para testar a ferramenta de geração do modelo, foram definidos dois tipos de peças: peças apenas com ângulos retos; e peças complexas, com curvas e outras transições geométricas. Logo, duas geometrias foram especificadas, a saber, peça em formato de “C” (apenas com ângulos retos) e um flange de pescoço (peça complexa) especificado pela norma ASME B16.5, apresentadas na Fig. 2(a) e 2(b) respectivamente.

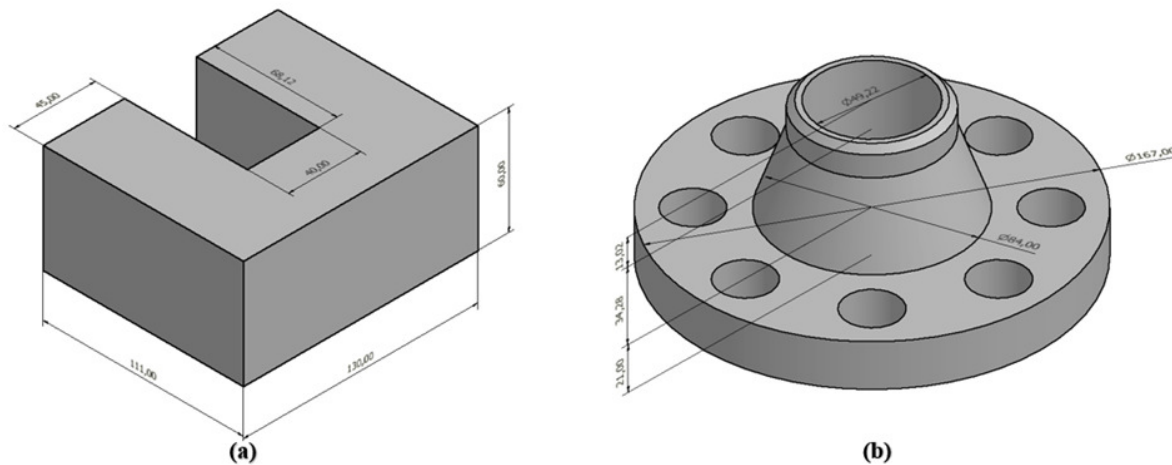


Figura 2. Peças usadas: (a) peça em formato de “C” (apenas com ângulos retos) e (b) flange de pescoço (peça complexa).

Os modelos tridimensionais foram fatiados com camadas equidistantes de 2 mm. As estratégias de deposição usadas para planejar as trajetórias para a peça em “C” estão ilustradas e identificadas na Fig. 3. A Figura 3(a) mostra a estratégia denominada zigue-zague, que consiste de movimentos de vai e volta (indicados pelas setas em verde) com mudança de direção no contorno da camada (linha em preto). A Figura 3(b) mostra a estratégia denominada de *raster*, que é caracterizada por movimento de vai e volta (ou somente num sentido, estratégia essa não abordada neste trabalho), porém, sem mudança de direção no contorno da peça. Isso caracteriza uma deposição descontínua, ou seja, necessita de interrupção da deposição num ponto para recomençar em outro ponto (normalmente nos contornos da camada). A Figura 3(c) ilustra a estratégia em contorno paralelo, que é caracterizado por deslocamentos internos sucessivos das arestas externas da geometria da camada até o preenchimento total da geometria. Para todas as estratégias, o valor de 4 mm de espaçamento entre os caminhos (linhas em verde) foi usado arbitrariamente.

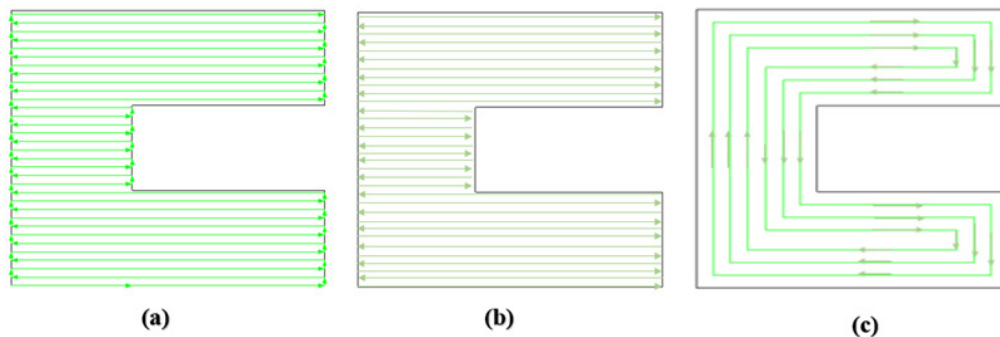


Figura 3. Estratégias de deposição usada na peça em “C”: (a) zigue-zague; (b) *raster* e (c) contorno paralelo.

A Figura 4 mostra as estratégias usadas para impressão da base do flange. Por uma questão de simplificação da geometria, os furos excêntricos foram excluídos, pois podem ser feitos posteriormente por usinagem. A estratégia híbrida de deposição (contorno e zigue-zague) foi utilizada, como ilustrada na Fig. 4(a). Ainda de acordo com a figura, as setas em preto indicam as trajetórias com deposição de material e as setas em vermelho indicam as trajetórias sem deposição. A estratégia de contorno consiste de um deslocamento externo da geometria externa (limites da base do flange representados pela linha azul) e da geometria interna (limites do furo do flange, também em azul). A estratégia de zigue-zague é aplicada posteriormente para realizar o preenchimento da peça por completo. Percebe-se que não se trata de uma estratégia com deposição contínua. Na Fig. 4(a) pode ser verificado que o arco deve ser interrompido quando a trajetória entra nos limites da geometria interna (referente ao furo) e é restabelecido quando sai desses limites. Na Fig. 4(b) é ilustrada a estratégia de contorno em espiral para geração da trajetória no flange. Nessa abordagem não há interrupções da deposição como na estratégia anteriormente mostrada. O valor de 4 mm foi usado como espaçamento entre os caminhos.

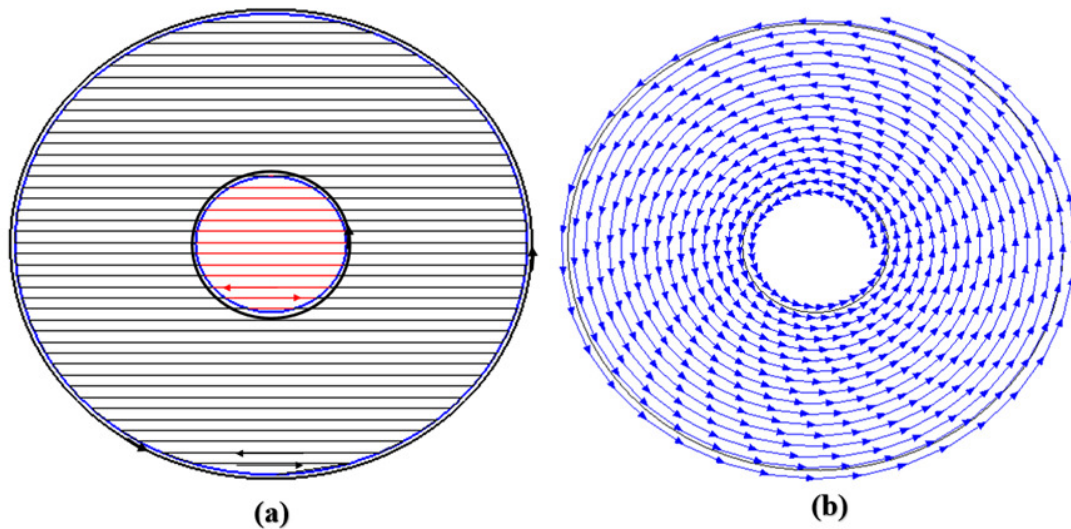


Figura 4. Estratégias de deposição usada na base do flange: (a) híbrida (contorno e zigue-zague); (b) contorno espiral.

3. RESULTADOS PARCIAIS

Para a peça em formato “C”, que possui apenas mudanças geométricas em ângulos retos, a Fig. 5 apresenta a geometria criada com a ferramenta (1ª camada, vista de topo), para as estratégias zigue-zague (Fig. 5(a)), *raster* (Fig. 5(b)) e contorno (Fig. 5(c)). É possível observar que para a estratégia *raster*, não houve a criação de nenhum vazio no interior da geometria, e esta poderia ser usada na simulação do processo. A estratégia zigue-zague apresentou uma espécie de “ondulação” ou textura, na parte externa da peça. Isso ocorre pois na estratégia zigue-zague, na mudança de direção e sentido, ocorre uma auto sobreposição do cordão, o que torna difícil a modelagem das áreas (que serão extrudadas na direção vertical para a criação do volume) por retângulos, como proposto no presente trabalho. Todavia, essa mudança de direção na estratégia de zigue-zague é uma região instável onde as dimensões da camada depositada não são uniformes. Logo, esta variação em relação a geometria original não acarretaria em maiores problemas na simulação do componente. Já a estratégia de contorno paralelo apresentou dois vazios no interior da geometria. Esse problema é típico desse tipo de estratégia, visto que as dimensões da geometria da camada não é um múltiplo inteiro de 4 mm (valor escolhido como distância entre passes). Esse problema de vazios no interior da peça é relatado por Ding et al. (2015) e Xiong et al. (2019) e podem ser resolvidos com estratégias que utilizam valores de passes que se adaptam à geometria.

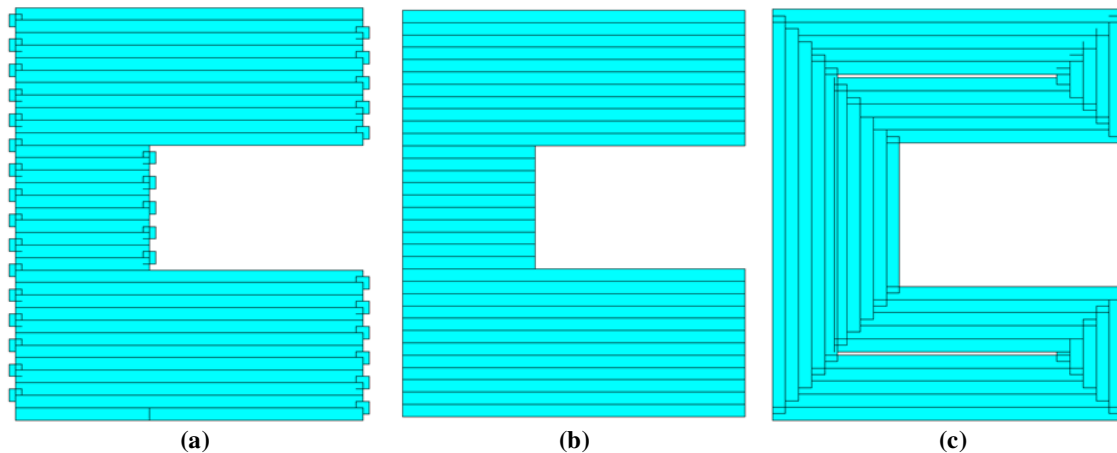


Figura 5. Geometria criada na 1ª camada para a peça “C”, vista de topo, usando as estratégias de deposição (a) zigue-zague, (b) *raster* e (c) contorno paralelo.

Na Fig. 6 é possível visualizar uma vista 3D considerando 3 camadas, após a geração da malha, para as três estratégias aplicadas a peça “C”.

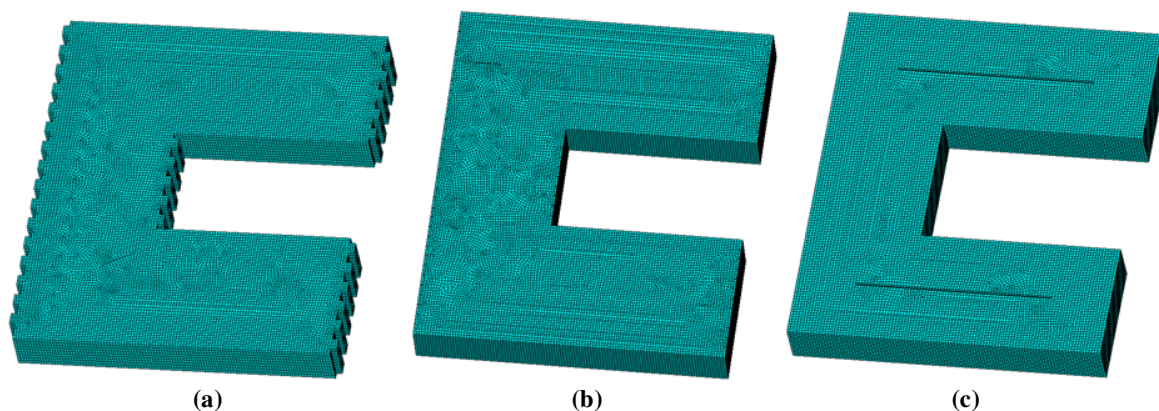


Figura 6. Geometria e malha criadas para 3 camadas para a peça “C”, usando as estratégias de deposição (a) zigue-zague, (b) raster e (c) contorno paralelo.

Para a peça mais complexa (flange), apesar da ferramenta conseguir traduzir a trajetória, houve falta de conexão entre as geometrias primitivas criadas, especialmente nos trechos curvos (Fig. 7), o que impossibilitou a criação dos volumes e malha que representam cada uma das camadas, para as duas trajetórias testadas. Logo, seria necessário uma correção manual dessas geometrias para dar continuidade ao processo, ou uma modificação na ferramenta criada, para conectar estes pontos e fechar estas áreas dos trechos de trajetória curvilínea. No entanto, uma modificação que atenda qualquer estratégia de forma generalista não é algo trivial de ser executado.

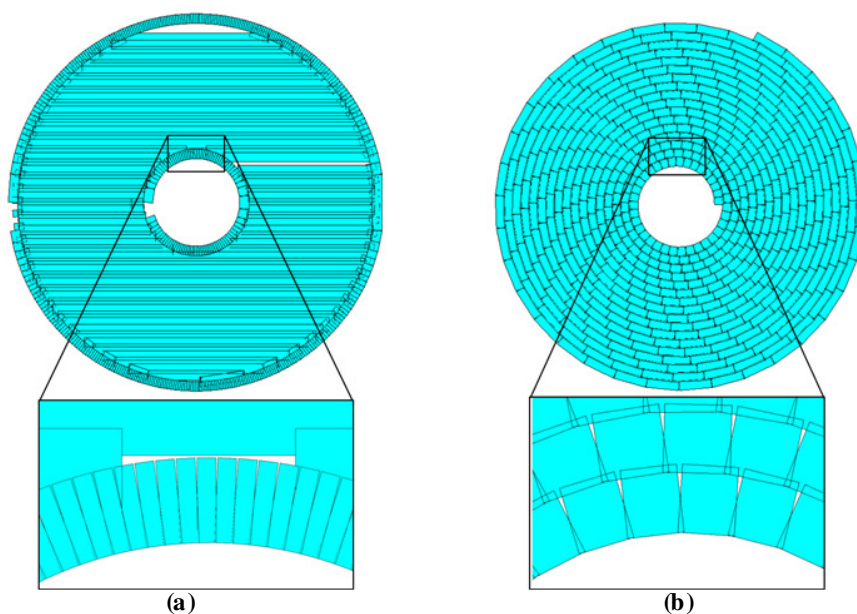


Figura 7. Geometria criada na 1ª camada para a base do flange, usando as estratégias de deposição (a) híbrida (contorno e zigue-zague) e (b) contorno espiral, incluindo aumento indicando defeitos encontrados.

Para as estratégias que obtiveram sucesso, o próximo passo envolve utilizar as trajetórias criadas para movimentar a fonte de calor na simulação, de maneira a simular os fenômenos térmicos do processo MADA. Quanto às dificuldades encontradas com trajetórias curvilíneas, outras soluções estão sendo analisadas.

4. CONCLUSÕES

Como proposta, esse trabalho apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta (aplicativo) que executa a tradução do código de deposição (código G) de uma peça a ser fabricada por MADA para a linguagem de um software de simulação. A partir do código G gerado por um fatiador (*slicer*), foram criados os comandos necessários para o software de simulação efetuar a construção da geometria e da malha de elementos finitos, de maneira automatizada.

A ferramenta apresentou melhores resultados para a peça “C”, que possui apenas ângulos retos, enquanto defeitos foram encontrados no flange, nos trechos com trajetórias curvas. O próximo passo envolve utilizar a mesma abordagem com o código G para efetuar a movimentação da fonte de calor na simulação numérica do processo, além de corrigir os problemas com trajetos curvos.

Mesmo com algumas limitações encontradas, a solução demonstrada apresenta vantagens, pois não há necessidade de efetuar algumas etapas de pré-processamento da simulação, como importação, limpeza e simplificação da geometria, estando pronto para uso nas próximas etapas da simulação. Ainda cabe lembrar que a metodologia pode ser usada em qualquer software de simulação, apenas adequando os comandos específicos para geração de geometria e malha na ferramenta desenvolvida.

5. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Petrobras S.A. (projetos 2019/00123-1 e 2019/00124-8) e apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

6. REFERÊNCIAS

- ASME. “B16.5 Pipe Flanges and Flanged Fittings: NPS 1/2 through NPS 24 Metric/Inch Standard”. New York, USA, American Society of Mechanical Engineers. 2017.
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Zhang, W. 2018. “Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties”. *Progress in Materials Science*. Vol. 92, p. 112-227. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. 2015. “A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures”. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* Vol 34, p.8-19. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>.
- Ferreira, R. P., Scotti, A. 2020. “Planejamento de trajetórias para manufatura aditiva por deposição a arco implementada em software aberto”. In *Anais do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial*. Brasília, Brasil.
- Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., Mehrpouya, M. 2019. “Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review”, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 53, p.124-149. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>
- ISO/ASTM 52900.2015, Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2015.
- Jafari, D., Vaneker, T.H.J., Gibson, I. 2021. “Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts”. *Materials & Design*, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>.
- Karayel, E., Bozkurt, Y. 2020. “Additive manufacturing method and different welding applications”. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, p. 11424-11438. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.039>.
- King, W. E., Anderson, A. T., Ferencz, R. M., Hodge, N. E., Kamath, C., Khairallah, S. A., & Rubenchik, A. M. 2015. “Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges”. *Applied Physics Reviews*. <https://doi.org/10.1063/1.4937809>
- Schoinochoritis, B., Chantzis, D., & Sabonitis, K., 2015. “Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, p. 96–117. <https://doi.org/10.1177/0954405414567522>
- Xiong, Y.; Park, S.; Padmanathan, S.; Dhamawan, A.G.; Foong, S.; Rosen, D.W.; Soh, G.S. 2019. “Process planning for adaptive contour parallel toolpath in additive manufacturing with variable bead width”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Vol. 105, p. 4159-4170. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03954-1>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC MODEL GENERATOR FROM THE G CODE FOR NUMERICAL SIMULATIONS OF WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract. *Metal Additive Manufacturing (AM) processes allow creating three-dimensional pieces through addition of successive layers of material, from a 3D computational model. Among various variants of AM, Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) has been gaining prominence for meeting the need to print large components with modest complexity and high production rate. Despite these advantages, many problems must be overcome, so a better physical understanding of the process can provide a more comprehensive view of WAAM. In this context, computational modeling and simulation of the process provides a powerful mechanism to develop this understanding. Creating the computational model in pre-processing stage is fundamental, therefore, shortening and automating this process is very desirable for the design of manufactured components. In this work, a software that performs the translation of the deposition code (G code) of a part to be manufactured by WAAM into the language of a simulation software was developed. From the generated code, the construction of the geometry and finite element mesh is performed, in an automated way. Partial results are presented, demonstrating the potential of the methodology and some limitations found for the selected pieces.*

Keywords: *Wire and Arc Additive Manufacturing, G Code, Numerical Simulation, WAAM, Print Planning.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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