

UMA VISÃO GERAL SOBRE ESTRATÉGIAS DE PREENCHIMENTO PARA MANUFATURA ADITIVA POR ARCO E ARAME

Matheus Antunes Chipanski

Rodrigo Minetto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI) – UTFPR, Av. 7 de setembro 3165, CEP 80230-901, Curitiba-PR-Brasil

matheuschipanski@hotmail.com, rodrigo.minetto@gmail.com

Neri Volpato

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) – UTFPR, Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER), Rua Deputado Heitor Alencar Furtado 5000, Ecoville, CEP 81280-340, Curitiba -PR –Brasil

nvolpato@utfpr.edu.br

Resumo. O processo de manufatura aditiva por arco e arame (WAAM - wire and arc additive manufacturing), é uma técnica de produção promissora que utiliza um processo de soldagem, em que o material de adição metálico é fundido por um arco elétrico formando cordões de soldas para produzir estruturas tridimensionais. No entanto, apesar de avanços recentes, ainda existem uma série de desafios importantes para garantir a qualidade das peças produzidas e sua aplicação na indústria, como tempos de produção elevados, interrupção de trajetória, estresses residuais, acabamento superficial inferior, e empenamentos, para listar alguns. Várias pesquisas já realizadas apontam o planejamento de trajetória como uma importante área para corrigir estes problemas. Este artigo discute algumas características da geração de rotas para processos WAAM mais relevantes e apresenta algumas das soluções encontradas na literatura com intuito de apontar tendências e possíveis pesquisas futuras.

Palavras chave: manufatura aditiva; manufatura aditiva por arco e arame; estratégias de preenchimento; planejamento de trajetória; WAAM.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (AM - *Additive Manufacturing*) é o processo de fabricação de objetos tridimensionais por meio do princípio de adição de camadas de material, de acordo com uma representação tridimensional computacional do objeto (Volpato, 2017). As etapas de um processo AM são: modelamento 3D, planejamento de processo, fabricação e pós-processamento (Fig. 1). A etapa denominada planejamento de processo é subdividida em orientação, posicionamento e escala, que consiste em determinar a disposição do modelo no espaço de trabalho da máquina; cálculo de estruturas de suporte, para permitir a deposição de material caso não haja superfície para sustentá-lo; fatiamento, que consiste na divisão do modelo tridimensional em contornos bidimensionais; e planejamento de trajetória, que identifica as melhores rotas para deposição de contornos, preenchimentos, movimentos sem deposição de material, além de outras variáveis importantes como temperatura e velocidade do processo.

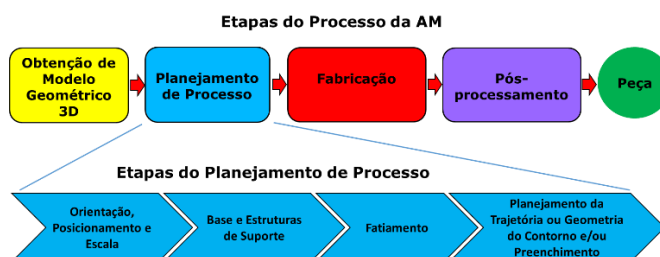


Figura 1. Etapas do processo da Manufatura aditiva (Volpato & Carvalho, 2017).

Soldagem é tradicionalmente um processo de união de partes através de uma operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição (Jayant & Mandeep, 2015). Diferentemente, o processo de AM por arco e arame, do inglês *wire and arc additive manufacturing* (WAAM), é categorizado como um processo de adição de material por deposição com energia direcionada. Por definição, emprega um processo de soldagem em que o material de adição (arame, eletrodo, outro) metálico é fundido por um arco elétrico formando cordões de soldas de tal forma a produzir estruturas tridimensionais. A Fig.2 (a) mostra um esquemático do

processo utilizando a tecnologia TIG - *Tungsten Inert Gas*. A tecnologia WAAM é considerada promissora para a fabricação de peças metálicas, em especial para a fabricação de componentes aeroespaciais com tamanhos medianos e grandes (Ding et al., 2014).

Sistemas WAAM, no entanto, ainda apresentam uma série de desafios de produção (Ding et al., 2015b), dentre eles: interrupção do arco; tempos de produção elevados; distorção; estresse residual devido ao aporte de calor excessivo e distribuição irregular de material nos cordões de solda; precisão geométrica relativamente inferior causada pelo efeito escada; e acabamento superficial ruim das peças produzidas. Portanto, a eficiência na construção de cada camada da peça é de suma importância para garantir a viabilidade na indústria. Uma área de estudo fundamental para o adereçamento destes problemas é a geração de rotas de deposição, última subdivisão da etapa de planejamento de processo (Fig. 1).

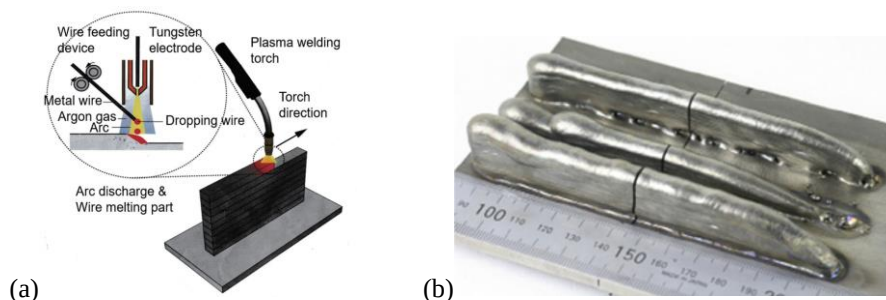


Figura 2. Esquemático do processo WAAM (a) (Fonte: Watanabe et al., 2020) e demonstração do empilhamento e das irregularidades dos cordões de solda (b) (Fonte: Martina et al., 2012).

Neste artigo, alguns dos impactos e problemas relacionados à geração de rotas para a tecnologia WAAM são discutidos na Seção 2. A Seção 3 apresenta várias soluções encontradas na literatura para correção destes problemas e discute tendências de pesquisa e melhoramento para processos WAAM. A Seção 4 conclui com um resumo dos trabalhos – suas vantagens e desvantagens para o processo WAAM – bem como, oportunidades de pesquisa em relação a tempo de processo, qualidade de superfície e isonomia das peças durante a geração de rotas.

2. PROBLEMAS RELACIONADOS ÀS ESTRATÉGIAS DE PREENCHIMENTO PARA WAAM

Uma das tarefas cruciais no WAAM é a geração de caminhos que guiam o movimento da tocha de soldagem, ou seja, o planejamento da trajetória. Muitos tipos de padrões de caminho foram desenvolvidos para AM. A estratégia de raster (Fig. 3 a) se constitui por uma série de linhas paralelas cobrindo a área a ser preenchida (Dunlavey, 1983). Sua derivada mais utilizada é a técnica de ziguezague, que conecta o fim de cada linha paralela com o início da próxima para criar uma continuidade entre as linhas de raster (Fig. 3 b), (Rajan et al., 2001). O contorno paralelo (Fig. 3 c) consiste em uma sequência de repetições do formato externo da geometria, com deslocamentos de distância contínua até o centro da forma, o que produz vários contornos desconexos (Farouki et al., 1995). A espiral é uma derivação da estratégia de contornos buscando um passe de rota contínuo por meio de conexões entre os contornos (Fig. 3 d) (Ren et al., 2009). Outros padrões de caminho são variações ou combinações dessas estratégias gerais (Ding et al., 2014).

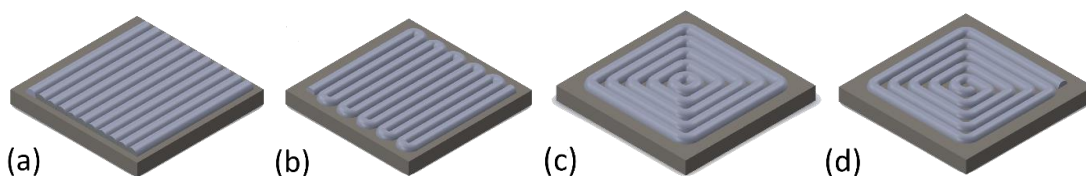


Figura 3. Algumas das mais comuns estratégias de preenchimento encontradas na literatura: raster (a); ziguezague (b); contornos paralelos (c); e espiral (d).

A combinação de contornos mais externamente com um padrão de ziguezague internamente é chamada estratégia híbrida e é concebida buscando uma combinação das vantagens disponíveis para cada método. Outra aproximação interessante é a utilização de curvas fractais, como a curva de Hilbert, que apresenta resultados significativos para a redução da retração do material (Kapil et al., 2016), no entanto, devido ao grande número de mudanças de direção não é comumente utilizada (Sun et al., 2021).

O processo WAAM é particularmente afetado pela interrupção do arco (interrupções na deposição), pois implica em religamentos da tocha de solda. Devido às características inerentes ao processo, a geometria do cordão de solda dentro de um passe não é uniforme, particularmente nas porções de início e extremidade. Na abertura do arco, elevada energia térmica é gerada, levando a falhas e irregularidades que não apenas comprometem a qualidade da superfície como também as características mecânicas da peça, tornando-se ainda mais séria ao longo do empilhamento de camadas. A Fig. 2 (b)

mostra um exemplo de paredes finas construídas por deposição de solda onde há diferenças significativas na geometria das contas entre o início e o fim dos caminhos de solda (Martina et al., 2012). As interrupções também implicam em rotas de conexão entre as passagens – como a deposição de material é o princípio de produção nesse processo, qualquer movimento em vazio também significa uma redução direta da eficiência do processo. Devido ao fato de que um elevado número de interrupções comprometem processos WAAM, estratégias de preenchimento como raster puro e contornos paralelos não são apropriados para esta tecnologia (Ding et al., 2014), por isso as estratégias de ziguezague, espiral e suas variantes adotadas mais comumente.

Zhang et al. (2020) demonstram que a geração de linhas paralelas em ziguezague, além de reduzir a qualidade dos contornos, frequentemente resultam em um grande número de acelerações e desacelerações. Também indicam que ângulos agudos comumente gerados causam irregularidades de sobre-extrusão ou subextrusão como apontado pelos estudos de Jin et al. (2017b) focados em processos como *fused filament fabrication* (FFF). FFF é um processo baseado em extrusão de plástico derretido e depositado por um cabeçote com um bico calibrado. Em outro de seus artigos, Jin et al. (2014) explicam que, ao aproximar a área de deposição do material por uma esfera, se traçarmos o perfil pela trajetória é possível observar que algumas regiões são revisitadas – gerando sobre-extrusões – e outras não são visitadas – gerando falhas, ou subextrusões (Fig. 4 a).

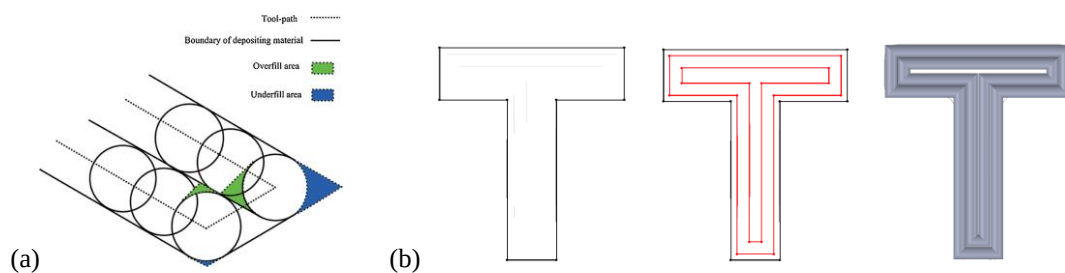


Figura 4. Irregularidades na extrusão em cantos com pequenos ângulos internos (a) (Jin et al., 2014) e geração de contornos paralelos em paredes finas demonstrando típica falha no preenchimento da forma (b).

Ambas as estratégias de contorno e espiral possuem uma grande redução de acelerações e desacelerações, melhor definição da forma geométrica e menor tendência a empenamento, no entanto, tendem a gerar falhas de preenchimento com possíveis lacunas no interior da geometria e tem processamento mais custoso (Ding et al., 2015a). Para o WAAM, a sobreposição de cordões de solda é necessária para alcançar uma superfície lisa. Descobriu-se que os padrões de caminho de contorno deixam lacunas estreitas, uma vez que não há espaço suficiente para deslocar o próximo caminho como a área branca média mostrada em Fig. 4 (b). A área das lacunas produzidas é altamente dependente da distância de passo a passo, que varia para diferentes sistemas AM – para WAAM normalmente varia de 2 mm a 12 mm, dependendo do diâmetro do fio de alimentação, da velocidade de viagem do cabeçote de deposição e da taxa de alimentação do fio. Lacunas resultantes de caminhos mal planejados no WAAM podem ser um problema grave, especialmente para estruturas de paredes finas (Fig. 4 (b)). As lacunas inevitáveis podem potencialmente levar a falhas estruturais de componentes altamente carregados (Ding et al., 2015a).

Ao determinar a ordem e distribuição de material fundido, a estratégia de roteamento influencia na distribuição de calor na superfície e tem impacto direto na distribuição de tensões residuais originadas pela dilatação térmica (aquecimento e resfriamento) do material depositado; este diferencial resulta em tensões residuais e distorções, que não só tem um efeito sobre as tolerâncias de peças, mas também podem causar falhas prematuras e deterioração das qualidades mecânicas das peças fabricadas (Sun et al., 2021). Zhang et al. (2020) analisaram os efeitos de diferentes estratégias de preenchimento em peças produzidas por WAAM. Em seu artigo, os pesquisadores realizaram quatro ensaios com diferentes rotas para fabricar a mesma forma, empregando uma estratégia híbrida com espirais externas de dentro para fora e ziguezagues internos, variando o número de deslocamentos da espiral de zero, dois, quatro e seis voltas. Ao medir os mesmos pontos na geometria gerada, foi possível identificar variação entre compressão e tensionamento em peças fabricadas por estratégias diferentes. Seguindo a mesma linha, Sun et al. (2021) mediram, por meio de análise de elementos finitos, o estresse residual equivalente em um retângulo impresso em uma única camada sobre um substrato (Fig. 5 g) resultante de diferentes padrões de deposição, demonstrando graficamente a distribuição dos estresses como pode ser visto na Fig. 5 (a, b, c, d, e, f).

Considerando que nos gráficos da Fig. 5 cores quentes representam maiores concentrações de estresses residuais e que cores frias representam as menores, é possível observar que as maiores tensões acumuladas ocorrem quando é utilizada a estratégia de espiral de fora para dentro (Fig. 5 d). Os autores indicam que este fato ocorre devido à concentração de altas temperaturas no centro da geometria. Em seguida, os padrões de raster (Fig. 5 a) e ziguezague (Fig. 5 b) têm perfis de tensões muito similares, devido à tendência de concentrarem temperaturas ao depositar trilhas próximas às anteriores em um espaço mais curto de tempo do que as demais estratégias. Apresentando uma distribuição mais favorável dos estresses, a espiral de dentro para fora (Fig. 5 e) possibilita menor gradiente de temperatura, com resfriamento mais homogêneo ao longo da camada. Os melhores resultados foram adquiridos com o uso dos padrões de

linhas alternadas (Fig. 5 c) – preenchimento de raster onde todas as trilhas ímpares são finalizadas primeiro e só então as trilhas pares são depositadas – e o proposto pelos pesquisadores, denominado padrão em S (Fig. 5 f), que será discutido em maiores detalhes na seção 3.

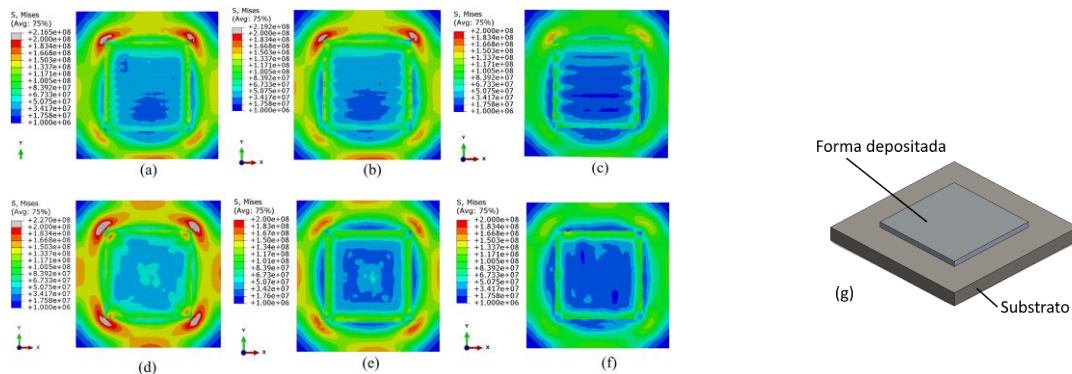


Figura 5. Distribuição de estresse residual equivalente de Zigue-zague (a); Raster (b); Linhas alternadas (c); Espiral de fora para dentro (d); Espiral dentro para fora (e); padrão S (f); e representação do modelo analisado (g). (Vista superior, Unidade: Pa) (Sun et al., 2021)

3. PROPOSTAS DE ESTRATÉGIAS DE PREENCHIMENTO PARA WAAM

Ding et al. (2014) sugerem o uso de caminhos contínuos para minimizar o número de passes de solda para cada camada, de forma a eliminar os efeitos colaterais do arco de partida ou parada. Preenchimento contínuo pode ser considerado uma categoria a parte de estratégias de roteamento, buscando preencher completamente os contornos por meio de um único passe sem intersecções consigo mesmo. Outros exemplos desta estratégia podem ser a utilização do preenchimento de Hilbert como no trabalho de Kapil et al. (2016), a espiral de Fermat, trabalhada na pesquisa de Zhao et al. (2016), ou a divisão em diferentes polígonos de contornos a serem preenchidos com zigue-zague conectados, conforme proposto por Jin et al. (2014).

No trabalho de Ding et al. (2014) os pesquisadores desenvolveram um método de caminho contínuo para o processo por meio de uma estratégia de dividir contornos complexos em polígonos convexos com apenas uma rota de preenchimento híbrida, formada a partir de contornos e ziguezague. A divisão entre polígonos, (Fig. 6 a), se baseia em identificar contornos externos e internos pelo princípio de profundidade de contorno e logo após identificar todos os ângulos internos maiores do que 180 graus, encontrando entalhes na forma. Para se adquirir apenas polígonos convexos, é necessário eliminar todos os entalhes, para isso o algoritmo determina o maior ângulo interno como referência e estende as retas que o formam até encontrarem o próximo contorno (Fig. 6 b). Caso haja um ângulo entre essas extensões, cria-se uma divisão entre este ângulo e o ângulo do entalhe. Se há mais de um ângulo dentro da área, prioriza-se aqueles que fazem entalhes e entre eles aquele mais próximo de uma linha bissectora do ângulo de origem. Caso não haja ângulos nesta área, apenas uma linha, a linha bissectora do ângulo de origem, se torna a divisão do polígono. Cada polígono dividido é preenchido com um contorno e o ângulo de ziguezague é otimizado para diminuir o número de elementos de rota (Fig. 6 c). Ao conectar os polígonos, eles foram capazes de reproduzir o formato dos contornos com apenas um caminho contínuo dentro da camada (Fig. 6 d).

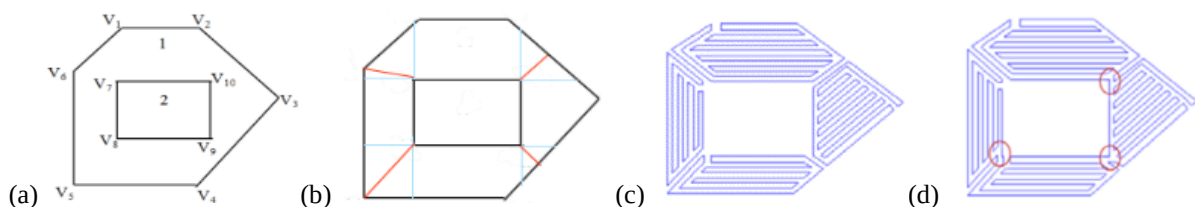


Figura 6. Sequência da criação de rotas de Ding et al. (2014): identificação dos ângulos (a), divisão em polígonos convexos (b), geração de rota para cada polígono (c) e conexão entre as rotas (d).

Ding et al. (2015a) propõem o deslocamento de contornos paralelos partindo do interior da forma a ser preenchida. Este padrão de dentro-para-fora parte da determinação do eixo medial da geometria – tal como descrito por (Blum, 1967) e mostrado em vermelho no exemplo da Fig. 7 (a) –, o que garante melhores resultados ao evitar regiões sem preenchimento no interior das peças. Os pesquisadores apontam que, apesar deste padrão resultar em deslocamentos que extravasam os limites do contorno da geometria, como pode ser observado em verde na Fig. 7 (b), ele ainda é aceitável para esta tecnologia pois peças produzidas por WAAM frequentemente passam por um processo de usinagem.

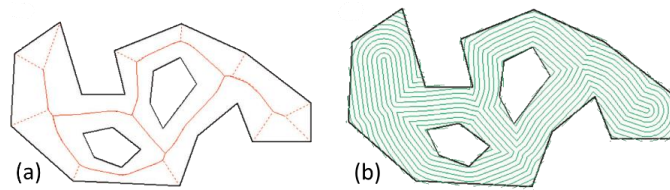


Figura 7. Determinação do eixo medial (a) e deslocamentos a partir do eixo medial (b) (Ding et al., 2015a)

Nguyen et al. (2020) focaram esforços em desenvolver rotas contínuas para geometrias com paredes finas, com principal atenção para estruturas de nervura fabricadas por meio da tecnologia de WAAM. É observado que uma rota contínua para cada camada tem grande impacto na qualidade final da estrutura uma vez que em estruturas de nervura não existe rota contínua com uma única trilha. Isso pode ser observado por meio da representação de uma estrutura de nervura como um grafo, com cada nó sendo uma junção da estrutura real (Fig. 8 a). Se cada caminho pode ser percorrido apenas uma vez, não há como iniciar e terminar a rota em um mesmo nó, portanto se diz que esta seria uma rota não-Euleriana. Para uma estrutura como esta ser Euleriana é necessário que o número de entradas e saídas em cada nó do grafo seja igual, isso se torna possível se cada caminho puder ser percorrido duas vezes (Fig. 8 b). Para evitar que as rotas se cruzem sobre os nós, quando duas rotas seguem pela mesma direção em um caminho, este é dividido pela metade e um par de conectores faz o caminho de ida e volta (Fig. 8 c).

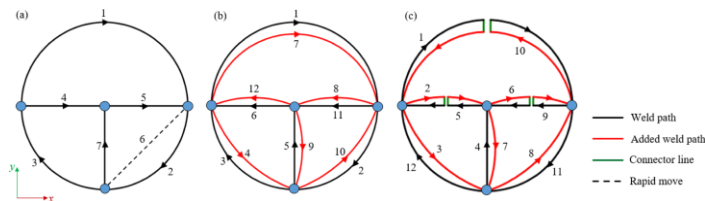


Figura 8. Representação de uma rota de estrutura de nervura em grafo (a); transformação em grafo Euleriano (b); e divisão das rotas para evitar a revisitação dos nós (c) (Nguyen et al., 2020).

Nguyen et al. (2020) ainda destacam, que ao desenhar a rota com duas conexões entre cada nó, isso se traduz em contorno paralelos (*offsets*) dentro da geometria original (Fig. 9 c) e para que seja possível conectar n contornos são necessárias $2(n-1)$ conexões. O lugar onde se realizam as divisões das rotas com conectores são aleatórios nos comprimentos dos caminhos separados, para evitar o acúmulo de irregularidades ao se empilhar camadas (Fig. 9 d). No entanto, é necessário evitar que a determinação dessas conexões ocorra de forma a gerar caminhos desconexos (Fig. 9 e), portanto utiliza-se o mesmo critério do procedimento demonstrado com o grafo (Fig. 8 c). O artigo também busca a compensação de subextrusões que ocorrem no centro das junções, quando mais de três caminhos se cruzam ao deslocar o vértice de uma das rotas até a região onde ocorre a subextrusão. A medida de compensação foi encontrada com o auxílio de uma rede neural ao treinar o sistema com vários testes e medições até que as variáveis envolvidas no algoritmo estivessem calibradas para tornarem-se confiáveis.

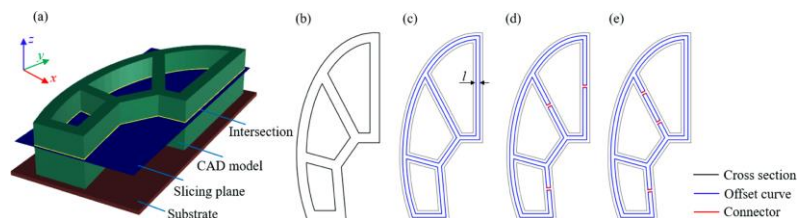


Figura 9. Estrutura de nervura (a), representação de uma camada (b), determinação dos contornos (c), conexão dos caminhos (d) e exemplo de conexão inválida (e) (Nguyen et al., 2020).

Sun et al. (2021) enumeram as características mais importantes para um padrão de preenchimento em processos WAAM. Para a melhor qualidade possível é necessário encontrar um preenchimento com o menor número de passes possíveis, portanto estratégias contínuas de preenchimento são preferíveis. Para obter o menor número de acelerações, é necessário um padrão com menor número de segmentos de retas conectados para formar o padrão. Como forma de melhorar a ligação entre camadas, deve existir a possibilidade de se gerar um padrão ondulado, o que significa a capacidade de mudar a orientação do padrão entre elas. Um menor gradiente de temperatura durante o processo de resfriamento da peça deve ser considerado para se obter o mínimo acúmulo possível de tensões residuais e evitar empenamento. Deve ser possível ajustar o comprimento do padrão para que seja possível gerar as variações necessárias

para se adaptar a diferentes estruturas, bem como ao se reduzir os comprimentos, também é possível reduzir os estresses gerados pela rota. Os pesquisadores também propuseram um padrão em S (Fig. 10) para preenchimento de peças em WAAM e por meio de análise de elementos finitos demonstraram sensível melhora das tensões residuais em comparação com os principais métodos utilizados na literatura (Fig. 5 f).

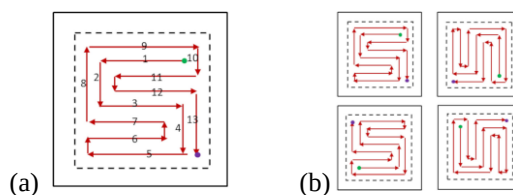


Figura 10. Padrão em S para uma camada (a) e uma sequência de camadas (b) (Sun et al., 2021)

O processo de geração de rotas para a tecnologia WAAM tem semelhanças com o princípio de AM por extrusão de material, também conhecido como tecnologia FFF. Assim como a alimentação de material mais difundida é através de um filamento de maior diâmetro, que é forçado para dentro de um bico aquecido e extrudado através de um bico calibrado de menor diâmetro, as trilhas de material depositado configuram uma geometria de elementos de rota organizados em passes do extrusor, de forma semelhante aos cordões de solda em WAAM. Estas similaridades podem permitir a adaptação de algoritmos inicialmente projetados para a tecnologia de extrusão de material para a tecnologia WAAM.

Jin et al. (2017a) desenvolveram uma técnica para geração de rotas para contornos paralelos para FFF compensando os problemas de subextrusão por meio da compensação da largura das trilhas depositadas (Fig. 11 a). A técnica se baseia na relação entre velocidade do bico extrusor em cada contorno e o volume de material depositado por um fluxo de alimentação constante e também levando-se em consideração a função de nível (Sethian, 1999) – que descreve o comportamento da sobreposição de trilhas. O método proposto determina a distância dos deslocamentos e realiza iterações até que todas tenham a velocidade e tempo adequados para o volume desejado de acordo com distância entre trilhas. Logo após, a velocidade do planejamento de rotas é variada de acordo com a curvatura, promovendo curvas mais suaves em áreas com cantos muito agudos. Depois do passo de suavização de cantos, há a possibilidade de áreas mais finas da geometria sofrerem com falhas geradas pela distribuição desigual dos contornos. Após determinar o eixo medial da figura, o algoritmo traça uma perpendicular nos círculos onde ocorrem as maiores curvaturas da geometria e redistribui as trilhas de forma que as intersecções delas com a perpendicular sejam equidistantes ao longo da perpendicular, processo conhecido na literatura como otimização local e demonstrado na Fig. 11 (a). Os resultados são comparados à geração de contornos deslocados com distância fixa entre as trilhas e pode ser observado em Fig. 11 (b) com grande redução das áreas de subextrusão.

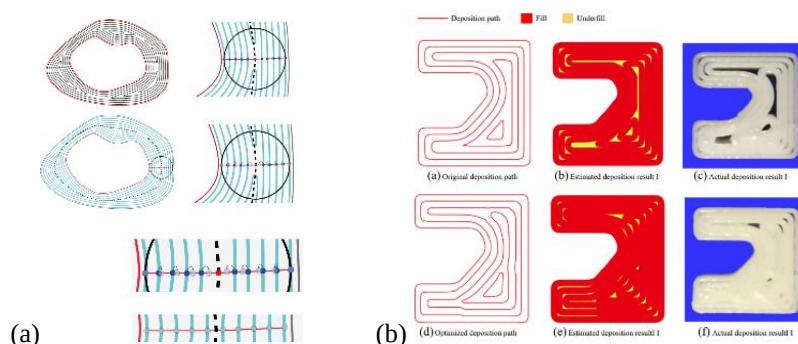


Figura 11. Processo de otimização local (a) e demonstração dos resultados (b) (Jin et al., 2017a).

Jin et al. (2017b) demonstram em sua pesquisa outro padrão de preenchimento que utiliza uma estratégia de ida-e-volta para cada rota dentro de um contorno, reduzindo ou eliminando as retrações de material dentro de uma mesma camada. Dois padrões são propostos, um modificando o ziguezague e outro a espiral, e podem ser observadas na Fig. 12. Cada contorno é preenchido com os padrões modificados, gerando sub-regiões na área interna. Devido ao fato de os caminhos possuírem o ponto inicial igual ao final, qualquer parte das sub-rotas geradas dentro de uma camada pode ser conectada a outra sub-rota vizinha, assim os pesquisadores garantem a geração de um caminho com passe único.

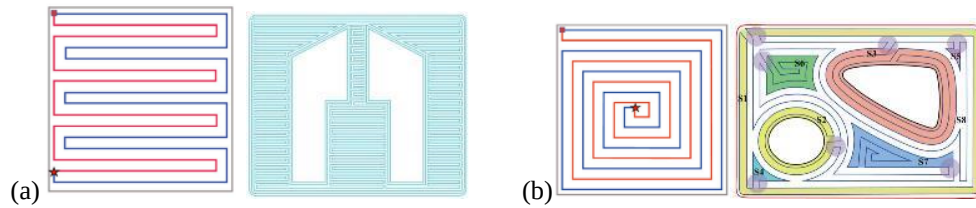


Figura 12. Padrões de ida-e-volta para ziguezague (a) e espiral (b) e exemplos de sua aplicação (Jin et al., 2017b).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A divisão de polígonos não convexos em sub-regiões convexas permite a utilização de padrões de ziguezague para preencher regiões sem as falhas causadas pelos deslocamentos de contornos. A utilização de contornos paralelos, no entanto, obtém grande vantagem ao definir os contornos externos da geometria possibilitando uma reprodução mais fiel do modelo. Assim, uma forma de se determinar padrões eficientes em estratégias híbridas torna-se um caminho promissor, motivo pelo qual diferentes pesquisas buscam encontrar a melhor solução para a geração de rota por meio delas. No entanto, várias possibilidades ainda se apresentam inexploradas até o momento. Por exemplo, a sucessão de deslocamentos (offsets) de contornos pode gerar diferentes oportunidades para preenchimentos antes descartados como viáveis em WAAM. Investigações estas pertencem à área de geometria computacional, área de pesquisa com vasto conteúdo a ser explorado para geração de rotas para AM.

Foram revisados aqui dois métodos focados em desenvolver padrões de geometrias que possibilitem um passe contínuo em polígonos, estes buscam desenvolver rotas Eulerianas, permitindo que cada rota possa ser iniciada e finalizada em qualquer intervalo. Graças a isto, diferentes padrões e estratégias podem ser combinados e ligados por meio de pontes, como demonstrado no trabalho de Jin et al. (2017b).

No entanto, os caminhos de deposição contínua enumerados neste artigo desconsideram os efeitos colaterais das tensões e distorções residuais. Deve-se atentar que a ordem e distribuição dos padrões de deposição podem ter impacto na qualidade final da peça devido à anisotropia que estes podem criar, bem como é necessário desenvolver uma forma confiável de se controlar e planejar as tensões residuais por meio de planejamento do gradiente de resfriamento na peça. O equilíbrio entre estas diferentes prioridades abre espaço para maiores estudos na área de algoritmos de otimização ou metaheurísticas capazes de lidar com a otimização concorrente entre elas. Itens enumerados por Sun et al. (2021) podem ser melhor investigados para as estratégias contínuas de Jin et al. (2017b) buscando a melhor eficiência e menores estresses residuais nas peças. O controle de tensões e distorções residuais é a uma preocupação especialmente para um processo WAAM em larga escala, onde grandes quantidades de material depositado podem significar grandes concentrações de transferência de calor. Para identificar a estratégia ideal para estresses residuais e distorções, tanto experimentos quanto simulações são necessários. Somente quando as tensões e distorções residuais forem reduzidas, os componentes com boa qualidade e precisão poderiam ser alcançados (Ding et al., 2015b).

Ao discriminar as possíveis melhorias em cada método apontado, é possível observar que padrões desenvolvidos para FFF podem ser aplicados juntamente a técnicas específicas de WAAM, de forma a se complementarem e possibilitarem a otimização do planejamento como um todo.

5. REFERÊNCIAS

- Blum, H. (1967). *A transformation for extracting new descriptors of shape* (Vol. 4). MIT press Cambridge.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2014). A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1–4), 173–183.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015a). A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34, 8–19.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015b). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1–4), 465–481.
- Dunlavey, M. R. (1983). Efficient polygon-filling algorithms for raster displays. *ACM Transactions on Graphics*, 2(4), 264–273.
- Farouki, R. T., Koenig, T., Tarabanis, K. A., Korein, J. U., & Batchelder, J. S. (1995). Path planning with offset curves for layered fabrication processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 14(5), 355–368.
- Jayant, A., & Mandeep, S. (2015). Use of Analytic Hierarchy Process (Ahp) To Select Welding Process in High Pressure Vessel Manufacturing Environment. *Int. Journal of Applied Engineering Research*, 10(8), 5869–5884.
- Jin, Yu-an, He, Y., Fu, J., Gan, W., & Lin, Z. (2014). Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing*, 1–4, 32–47.
- Jin, Yuan, Du, J., Ma, Z., Liu, A., & He, Y. (2017). An optimization approach for path planning of high-quality and uniform additive manufacturing. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1–4), 651–662.
- Jin, Yuan, He, Y., Fu, G., Zhang, A., & Du, J. (2017). A non-retraction path planning approach for extrusion-based

- additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48(December 2016), 132–144.
- Kapil, S., Joshi, P., Yagani, H. V., Rana, D., Kulkarni, P. M., Kumar, R., & Karunakaran, K. P. (2016). Optimal space filling for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 22(4), 660–675.
- Martina, F., Mehnen, J., Williams, S. W., Colegrove, P., & Wang, F. (2012). Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(6), 1377–1386.
- Nguyen, L., Buhl, J., & Bambach, M. (2020). Continuous Eulerian tool path strategies for wire-arc additive manufacturing of rib-web structures with machine-learning-based adaptive void filling. *Additive Manufacturing*, 35(March), 101265.
- Rajan, V. T., Srinivasan, V., & Tarabanis, K. A. (2001). The optimal zigzag direction for filling a two-dimensional region. *Rapid Prototyping Journal*, 7(5), 231–241. <https://doi.org/10.1108/13552540110410431>
- Ren, F., Sun, Y., & Guo, D. (2009). Combined reparameterization-based spiral toolpath generation for five-axis sculptured surface machining. *The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(7–8), 760–768.
- Sethian, J. a. (1999). Level set methods and fast marching methods: evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science. In *Cambridge University Press*.
- Siminski, M. (2003). Weld path optimisation for rapid prototyping and wear replacement by robotic gas metal arc welding.
- Sun, L., Ren, X., He, J., & Zhang, Z. (2021). Numerical investigation of a novel pattern for reducing residual stress in metal additive manufacturing. *Journal of Materials Science and Technology*, 67, 11–22.
- Volpato, N. (2017). *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Editora Blucher.
- Zhang, C., Shen, C., Hua, X., Li, F., Zhang, Y., & Zhu, Y. (2020). Influence of wire-arc additive manufacturing path planning strategy on the residual stress status in one single buildup layer. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Zhao, H., Gu, F., Huang, Q.-X., Garcia, J., Chen, Y., Tu, C., Benes, B., Zhang, H., Cohen-Or, D., & Chen, B. (2016). Connected fermat spirals for layered fabrication. *ACM Transactions on Graphics*, 35(4), 1–10.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

A REVIEW ABOUT PATH PLANNING FOR WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURE

Matheus Antunes Chipanski

Rodrigo Minetto

Graduate Program in Electrical Engineering and Industrial Informatics (CPGEI) – UTFPR, 7 de setembro Avenue 3165, CEP80230-901, Curitiba–PR–Brazil
matheuschipanski@hotmail.com, rodrigo.minetto@gmail.com

Neri Volpato

Postgraduate Program in Mechanical and Materials Engineering (PPGEM) – UTFPR Additive Manufacturing and Tooling Group (NUFER), Deputado Heitor Alencar Furtado Street, 5000, Ecoville, CEP 81280-340, Curitiba -PR –Brazil
nvolpato@utfpr.edu.br

Abstract. The wire and arc additive manufacturing (WAAM) process is a promising production technique that uses a metal welding process in which the addition material is fused by an electric arc, forming weld beads to produce three-dimensional structures. However, despite recent advances, there are still a number of important challenges to ensure the quality of the parts produced and their application in the industry, such as high production times, trajectory interruption, residual stresses, lower surface finish, and warping, to list some. Several studies indicate that path planning is an important area to correct these problems. This article discusses some of the most important characteristics of path planning for WAAM processes and presents some of the solutions found in the literature in order to point out trends and possible future research.

Keywords: additive manufacture; additive manufacture by arc and wire; filling strategies; path planning; WAAM.

RESPONSIBILITY NOTICE

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