

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS ANTUNES CHIPANSKI

**MAPEAMENTO DE ROTAS PARA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO
A ARCO UTILIZANDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS**

CURITIBA

2023

MATHEUS ANTUNES CHIPANSKI

**MAPEAMENTO DE ROTAS PARA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO
A ARCO UTILIZANDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS**

**Toolpath Mapping for Wire and Arc Additive Manufacturing using Image
Processing**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Minetto

Coorientador: Prof. Dr. Neri Volpato

CURITIBA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



MATHEUS ANTUNES CHIPANSKI

**MAPEAMENTO DE ROTAS PARA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO UTILIZANDO
PROCESSAMENTO DE IMAGENS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Engenharia De Computação.

Data de aprovação: 27 de Março de 2023

Dr. Rodrigo Minetto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Americo Scotti, Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia (Ufu)

Dr. Ricardo Dutra Da Silva, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/03/2023.

Dedico este trabalho a minha família e aos meus amigos, pelos momentos de ausência. E a todo o povo brasileiro que, mesmo frente a toda as adversidades dos últimos anos, continua lutando por um futuro mais digno para todos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido realizado caso não fossem as incontáveis horas de apoio e paciência dos meus orientadores, Prof. Dr. Rodrigo Minetto e Prof. Dr. Neri Volpato e outros professores e pesquisadores que dividiram comigo seus conhecimentos e momentos de esforços conjuntos, Prof. Dr. Ricardo Dutra da Silva, Prof. Dr. Américo Scotti, Rafael Pereira e muitos outros mais. Estes me permitem hoje dizer que, de fato, me apoio no ombro de gigantes.

Gratidão a todo o apoio que a UTFPR, por meio de seus diversos departamentos, secretarias e profissionais, me deu oportunidade e condições de me dedicar aos estudos (especialmente Prof. Dr. Glauber Brante, Prof. Dr. André Schneider e Prof. Dr. Wilson José da Silva). Agradeço por terem me guiado por todos os passos da formação e do conhecimento que sustenta esse trabalho.

À minha esposa, Thyane Antunes, e nossa cachorrinha, Zelda, que precisaram perseverar minha ausência e dificuldades, bem como um escritório e laboratório dentro de casa. Tudo enquanto me deram total apoio emocional e motivos para seguir dando tudo de mim para seguir com esta carreira tão desafiadora.

Aos meus amigos (em especial Daniel, Diliomar, João, Leonardo, Lucas, Lucian e Milan), que não apenas me deram apoio nos passos da vida acadêmica, como me permitiram viver aventuras incríveis em universos fantásticos, mesmo frente à limitação de nossas vidas tão ocupadas. Gratidão por me mostrarem como o que muitas vezes parecia impossível pode se desenrolar frente a nossos olhos, mesmo que de maneiras completamente imprevisíveis.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"De cada um conforme seus meios, a cada um
conforme suas necessidades"

(BLANC, Louis, 1839)

RESUMO

CHIPANSKI, Matheus Antunes. **Mapeamento de Rotas para Manufatura Aditiva por Deposição a Arco Utilizando Processamento de Imagens**. 2023. 96 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2023.

O avanço da manufatura aditiva possibilitou a criação de várias tecnologias e processos de fabricação capazes de trabalhar com diversos materiais e com aplicações em praticamente todos os setores da indústria. Dentre eles a manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM) despertou nos últimos anos grande interesse no meio produtivo e acadêmico por ser considerada promissora para a fabricação de peças metálicas com tamanhos medianos e grandes. Esta tecnologia possui características únicas relacionadas ao planejamento da deposição do material, detalhes como regiões de paredes finas, regiões com grande massa, estrangulamentos internos no preenchimento, e regiões de contornos precisam ser abordados de forma distinta no planejamento de processo para garantir a qualidade das peças produzidas. Este trabalho propõe um mapeamento destas regiões de interesse através da decomposição de imagens digitais extraídas de modelos 3D. O projeto usa conceitos de processamento de imagens, geometria computacional e teoria de grafos para reconhecer regiões de interesse e utiliza esta classificação para gerar uma rota de deposição de material específica para cada área da imagem. O algoritmo proposto foi implementado em linguagem *Python* para prova de conceito e diversos testes com variadas geometrias são apresentados. Testes de impressões para verificação das rotas geradas foram realizadas com uma impressora de filamentos polimérico de baixo custo. Os resultados mostraram que o algoritmo desenvolvido foi capaz de mapear as principais áreas de interesse, inclusive com a possibilidade do usuário influenciar neste mapeamento.

Palavras-chave: manufatura aditiva. planejamento de rota. processamento de imagens. manufatura aditiva por deposição a arco. planejamento de processo.

ABSTRACT

CHIPANSKI, Matheus Antunes. **Toolpath Mapping for Wire and Arc Additive Manufacturing using Image Processing**. 2023. 96 p. Dissertation (Bachelor's Degree in Electrical Engineering and Industrial Informatics) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2023.

The advancement of additive manufacturing has enabled the creation of various technologies and manufacturing processes capable of working with various materials and applications in virtually all sectors of the industry. Among them, the wire and arc additive manufacture (WAAM) has aroused in recent years great interest in the productive and academic environment because it is considered promising for the manufacture of metal parts with medium and large sizes. This technology has unique characteristics related to the planning of material deposition that are important for the quality of the parts produced, details such as thin walls, areas with large mass, internal fill bottlenecks, and contours need to be addressed differently in process planning. This work proposes a mapping of the regions of interest to this technology through the decomposition of binary digital images extracted from 3D models, focusing on the recognition of these areas. The project uses image processing algorithms, computational geometry and graph theory to recognize areas of interest and uses this classification to generate a material deposition route specific to each image region. The algorithm was implemented in *Python* language for proof of concept and several tests with various geometries are presented. Print tests to verify the routes generated were performed with a low-cost polymer filament printer. The results show that the proposed algorithm was able to map the main areas of interest, including the possibility of the user to influence the mapping.

Keywords: additive manufacturing. path planning. image processing. WAAM. process planning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma das etapas principais da AM.	12
Figura 2 – Esquema do processo WAAM	13
Figura 3 – Exemplos de elementos estruturantes	17
Figura 4 – Erosão de A por B	17
Figura 5 – Dilatação de A por B	18
Figura 6 – Abertura de A por B	19
Figura 7 – Transformada <i>hit-or-miss</i>	20
Figura 8 – Identificação de contorno	20
Figura 9 – Exemplo de figura monotônica em relação ao eixo Y	21
Figura 10 – <i>Labeling</i>	22
Figura 11 – Transformada da distância	23
Figura 12 – Exemplos de figuras bidimensionais e seus eixos mediais	24
Figura 13 – Exemplos de geometrias com ou sem gargalos	25
Figura 14 – Algumas das estratégias de preenchimento encontradas na literatura	26
Figura 15 – Irregularidades resultantes da sobreposição de cordões de solda	27
Figura 16 – Irregularidades na extrusão em cantos com pequenos ângulos internos	29
Figura 17 – Geração de contornos paralelos	29
Figura 18 – Tensões residuais de acordo com o número de contornos	30
Figura 19 – Distribuição de estresse residual equivalente	31
Figura 20 – Padrão de preenchimento S.	32
Figura 21 – Determinação do eixo medial e deslocamentos a partir do eixo medial	33
Figura 22 – Comparação entre rotas geradas por deslocamento sem (linha superior) e com otimização (linha inferior).	34
Figura 23 – Sequência da criação de rotas contínuas de Ding	35
Figura 24 – Padrões de ida-e-volta	36
Figura 25 – Exemplo de grafo de uma estrutura de nervura	36
Figura 26 – Exemplo de planejamento de rota de uma estrutura de nervura	37
Figura 27 – Estratégias de preenchimento de paredes finas	38
Figura 28 – Segmentações de Ren et al. (2010)	40
Figura 29 – Segmentação de Michael et al.	41
Figura 30 – Sequência de passos para preenchimento de Zhai e Chen	41
Figura 31 – Visão atual do algoritmo proposto.	42
Figura 32 – Cálculo do eixo medial	44
Figura 33 – Divisão do eixo medial	45
Figura 34 – <i>Kernels</i> utilizados	45
Figura 35 – Poda do eixo medial	46
Figura 36 – Cálculo de paredes finas	46
Figura 37 – Determinação de áreas de paredes finas	47
Figura 38 – Geração das imagens dos níveis de deslocamento	48
Figura 39 – Iterações de erosão	49
Figura 40 – Individualização de <i>loops</i>	50
Figura 41 – Separação entre <i>loops</i> externos e internos	50
Figura 42 – Agrupamento de <i>loops</i>	51
Figura 43 – Hierarquia de <i>loops</i> externos	52

Figura 44 – Hierarquia de <i>loops</i> internos	52
Figura 45 – Falhas de preenchimento	54
Figura 46 – Construção das regiões de contornos	55
Figura 47 – Referências das pontes de contornos	56
Figura 48 – Construção das pontes de contornos	57
Figura 49 – Identificação de gargalos geométricos do preenchimento interno	57
Figura 50 – Exemplos de preenchimentos em gargalos geométricos	58
Figura 51 – Diferentes tipos de pontes utilizadas no algoritmo	59
Figura 52 – Separação das regiões monotônicas	60
Figura 53 – Reagrupamento das regiões monotônicas	61
Figura 54 – Entrelaçamento de camadas	62
Figura 55 – Estratégias de trajetórias para diferentes mapeamentos.	63
Figura 56 – Rotas de ponte de contorno	64
Figura 57 – Rotas de ponte de <i>crossover</i>	64
Figura 58 – Rotas de ponte de ziguezague	65
Figura 59 – Algoritmo de transformação de <i>pixels</i> para linhas	66
Figura 60 – Transformação de grafo para sequência de coordenadas	66
Figura 61 – Algoritmo de simplificação de polígonos	67
Figura 62 – Paredes finas na peça 3	72
Figura 63 – Paredes finas na peça 4	73
Figura 64 – Contornos e conexões na peça 2	74
Figura 65 – Contornos e conexões na peça 5	75
Figura 66 – Regiões de estrangulamento na peça 1	76
Figura 67 – Regiões de estrangulamento na peça 4	76
Figura 68 – Regiões monotônicas da peça 3	77
Figura 69 – Regiões monotônicas da peça 5	78
Figura 70 – Exemplo de conflito de separação de áreas monotônicas	79
Figura 71 – Resultado de mapeamento da peça 1	80
Figura 72 – Resultado de mapeamento da peça 2	80
Figura 73 – Resultado de mapeamento da peça 3	81
Figura 74 – Resultado de mapeamento da peça 4	82
Figura 75 – Resultado de mapeamento da peça 5	82
Figura 76 – Planejamento das rotas da peça 1	83
Figura 77 – Planejamento das rotas da peça 2	84
Figura 78 – Resultado do processo produtivo peça 1	85
Figura 79 – Resultado do processo produtivo peça 2	86
Quadro 1 – Peças para testes	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações dos testes planejados em impressora FFF	69
Tabela 2 – Experimentos realizados	70
Tabela 3 – Número de interrupções de deposição do material para as peças produzidas .	83
Tabela 4 – Tempos de processo para as peças produzidas	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	OPORTUNIDADE DE PESQUISA	14
1.3	OBJETIVO GERAL	15
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.5	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	15
2	REVISÃO DE CONCEITOS E LITERATURA	16
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	16
2.1.1	Transformações morfológicas	16
2.1.1.1	Elemento estruturante	16
2.1.1.2	Erosão morfológica	16
2.1.1.3	Dilatação morfológica	18
2.1.1.4	Abertura morfológica	18
2.1.1.5	Algoritmo <i>Hit-or-Miss</i>	19
2.1.1.6	Identificação de contornos	19
2.1.2	Geometria computacional e processamento de imagens	20
2.1.2.1	Regiões monotônicas	21
2.1.2.2	Componentes conexos	22
2.1.2.3	Transformada da distância	23
2.1.2.4	Eixo medial	23
2.1.2.5	Gargalos geométricos	24
2.1.3	Manufatura aditiva por deposição com energia direcionada (DED) e manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM)	25
2.1.4	Planejamento de trajetória	26
2.2	DESAFIOS EM WAAM RELACIONADOS AO PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIAS	26
2.2.1	Forças internas à poça de fusão	26
2.2.2	Abertura e interrupção do arco	27
2.2.3	Falhas de origem geométrica	28
2.2.4	Tensões residuais	30
2.3	SOLUÇÕES EM PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA	31
2.3.1	Trajetoórias para a redução de tensões residuais	32
2.3.2	Adaptações da estratégia de contornos paralelos	33
2.3.3	Rotas de caminho contínuo	34
2.3.4	Paredes finas	35
2.3.5	Processamento de imagens em manufatura aditiva	37
2.3.6	Segmentação e zoneamento de camadas em AM	39
3	METODOLOGIA	42
3.1	GERAÇÃO DE IMAGENS	43
3.2	MAPEAMENTO DE REGIÕES DE INTERESSE EM WAAM	44
3.2.1	Mapeamento de paredes finas	44
3.2.2	Mapeamento de contornos e suas conexões	47
3.2.2.1	Geração de contornos	47

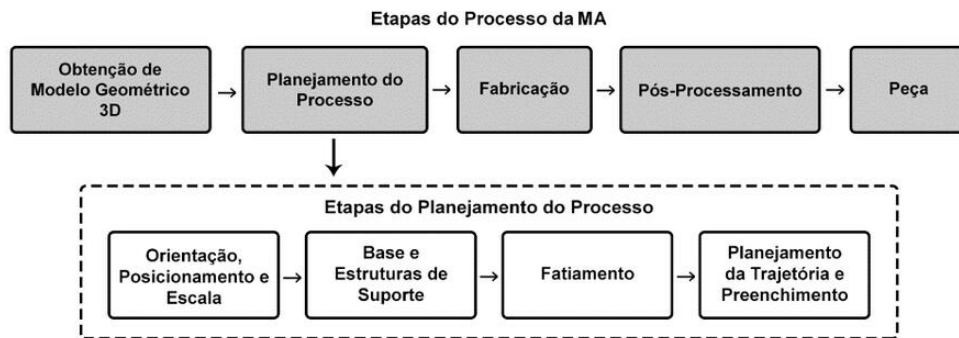
3.2.2.2	Agrupamento de <i>loops</i>	51
3.2.2.3	Filtragem de <i>loops</i> por identificação de falhas de preenchimento	53
3.2.2.4	Conexão de contornos	54
3.2.3	Mapeamento de regiões internas	56
3.2.3.1	Regiões de estrangulamentos	57
3.2.3.2	Áreas remanescentes	60
3.3	GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS E MANUFATURA	61
3.3.1	Entrelaçamento de Camadas	61
3.3.2	Definição de estratégias de trajetórias	62
3.3.3	Código de máquina	65
3.4	AMOSTRAGEM E EXPERIMENTOS	68
3.4.1	Geometrias testadas	68
3.4.2	Equipamento	68
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	71
4.1	MAPEAMENTO DE REGIÕES	71
4.1.1	Paredes finas	71
4.1.2	Contornos e conexões	71
4.1.3	Regiões de estrangulamento	73
4.1.4	Regiões monotônicas	77
4.1.5	Mapeamento completo	78
4.2	PLANEJAMENTO DE ROTAS E FABRICAÇÃO DE PEÇAS	83
5	CONCLUSÕES	88
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5.2	TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A *manufatura aditiva* (AM, do inglês *Additive Manufacturing*), é o processo de fabricação de objetos tridimensionais pelo princípio de adição de camadas de material, de acordo com uma representação geométrica computacional do objeto (VOLPATO, 2017). As etapas de um processo AM são: modelagem 3D, planejamento de processo, fabricação, e pós-processamento, conforme pode ser visto na Figura 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 sustentação de superfícies sem área de apoio; *fatiamento*, que consiste na divisão do modelo tridimensional em contornos bidimensionais; e *planejamento de trajetória*, que identifica as melhores rotas para deposição de contornos, deposição de preenchimento, movimentos sem deposição de material, além de outras variáveis importantes como temperatura e velocidade do processo.

Figura 1 – Fluxograma das etapas principais da AM.



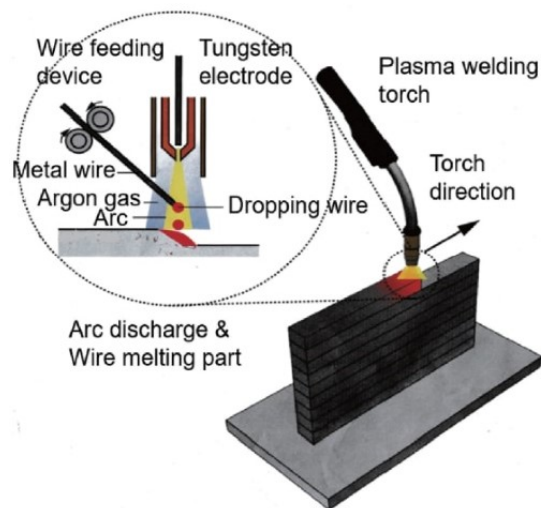
Fonte: Volpato (2017)

Soldagem é tradicionalmente um processo de união de partes através de uma operação que visa obter a coalescência localizada pelo aquecimento (JAYANT; DHILLON, 2015). O processo de *manufatura aditiva por deposição a arco* (WAAM do inglês *Wire and Arc Additive Manufacturing*), é categorizado como um processo AM por deposição com energia direcionada (descrito em maiores detalhes na Seção 2.1.3). Por definição, emprega um processo de soldagem em que o material metálico de adição (arame, pó, entre outros) é fundido por um arco elétrico formando cordões de soldas de tal forma a produzir estruturas tridimensionais.

A Figura 2 mostra um esquema do processo WAAM utilizando a tecnologia *Tungsten*

Inert Gas (TIG). A tecnologia WAAM é considerada promissora para a fabricação de peças metálicas com tamanhos medianos e grandes (DING et al., 2014). Exemplos incluem — mas não se limitam em — fabricação de componentes aeroespaciais, construção civil e peças para o setor de óleo e gás.

Figura 2 – Esquema do processo WAAM



Fonte: Watanabe et al. (2020)

O processo WAAM, no entanto, ainda apresenta uma série de desafios (DING et al., 2015b), dentre eles: minimização de interrupções do arco; tempos de produção que ainda podem ser melhorados; distorção; estresses residuais; distribuição irregular de material nos cordões de solda; precisão geométrica e acabamento superficial “grosseiros” das peças produzidas. Todos esses fatores estão ligados direta ou indiretamente à *geração de rotas de deposição*, última subdivisão da etapa de planejamento de processo. Um levantamento sobre esta relação foi publicado por Chipanski et al. (2021).

Apesar dos diversos estudos já realizados na área de planejamento de rotas para WAAM — conforme revisados no Capítulo 2 — as técnicas desenvolvidas apresentam ganhos e perdas em diferentes aspectos do processo. Um exemplo seria as rotas de contornos paralelos que possuem um melhor acabamento superficial das laterais da peça e melhor distribuição de tensões internas, mas que aumentam o número de interrupções do arco elétrico e produzem falhas de preenchimento originadas da própria geometria sendo depositada.

Diversos problemas enfrentados pela tecnologia WAAM estão ligados ao comportamento dinâmico do material depositado, resultado de forças internas à peça de fusão, diferentes geometrias que podem resultar em diferentes represamentos da peça, sobre-deposição ou sub-deposição de material em áreas onde o ângulo da mudança da trajetória é muito pequeno,

diferentes distribuições da energia utilizada para a fusão do material de adição, ou do substrato, ou o acúmulo de material de acordo com a distribuição de calor e tensões residuais na peça. Todos fatores que podem implicar em defeitos e perda de qualidade no objeto produzido (MICHEL et al., 2019).

Tal como sugerido por Michel et al. (2019), o mapeamento de áreas, ou frações da geometria ao longo do eixo de construção (eixo Z) pode permitir a determinação de parâmetros de processo de acordo com as exigências de cada topologia criada pelo empilhamento das camadas, e em seu trabalho essas áreas são determinadas manualmente por um usuário especialista no processo. No entanto, para que tal mapeamento seja possível em processos produtivos devido ao grande número de camadas a serem processadas, é necessário um método automatizado de identificação de regiões, o que possibilita a distinção e caracterização de cada região e envolve o uso de técnicas de análise da geometria em questão. O mesmo princípio de segmentação de geometrias também pode ser utilizado para endereçar os demais fatores de irregularidades da deposição do material.

1.2 OPORTUNIDADE DE PESQUISA

Conforme discutido na Seção 2, diversos trabalhos descritos na literatura usam algoritmos baseados em conceitos de geometria computacional para a geração de rotas de deposição em processos de AM. Apesar de bons resultados e melhorias para cada problema em particular, pouco ainda é discutido sobre a identificação, e também indicações de estratégias e parâmetros, de geometrias que apresentam combinações de características desafiadoras para tecnologias desenvolvidas para processos WAAM. A utilização de algoritmos voltados a geometrias discretizadas, como no caso de imagens binárias, abrem caminhos para o processamento de camadas mais complexas através do uso de operações simples de processamento de imagens. É importante destacar que o uso de imagens binárias para definição de rotas de deposição em processos WAAM é um assunto marginalmente explorado.

A principal hipótese desse trabalho é que é possível realizar o mapeamento de regiões das fatias bidimensionais da peça de forma automatizada, por meio de representações em imagens binárias; bem como criar rotas de deposição que possam promover distribuição mais uniforme de material de acordo com as particularidades das regiões mapeadas, reduzindo assim os defeitos de preenchimento. Espera-se que, por meio deste mapeamento, o usuário possa dispor da ferramenta necessária para melhor definir e controlar as variáveis do processo de manufatura que precisam

de adaptações ao longo da construção de cada camada.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um algoritmo capaz de mapear as regiões da geometria de cada camada do processo WAAM, através da identificação de características relevantes para a tomada de decisão quanto à estratégia de preenchimento por meio do processamento das imagens das camadas, e, assim, permitir a seleção de diferentes estratégias e parâmetros de processo para cada região mapeada.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Listar quais são as características determinantes para a escolha da estratégia do preenchimento em processo WAAM;
- Desenvolver métodos e representações capazes de identificar tais características;
- Possibilitar meios de indicação de diferentes estratégias de preenchimento e parâmetros de produção para cada divisão mapeada, de acordo com a escolha do usuário;
- Determinar a ordem de visitação de cada região de acordo com a vizinhança;
- Avaliar a eficiência do método proposto, por meio de testes em amostras de geometrias variadas.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O restante do documento utiliza a seguinte estrutura: no Capítulo 2 são descritos os conceitos básicos utilizados para descrever problemas e soluções referentes ao método proposto e também são discutidos trabalhos anteriores realizados na área de planejamento de trajetória para WAAM e outras técnicas que podem ser adaptadas a esta tecnologia. O Capítulo 3 traz a descrição geral do algoritmo proposto para mapeamento de regiões, seguido do detalhamento de cada passo. No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos testes com diferentes amostras de imagens de camadas, buscando exemplificar a aplicabilidade do método a diferentes geometrias. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos, bem como possíveis desenvolvimentos futuros.

2 REVISÃO DE CONCEITOS E LITERATURA

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo apresenta inicialmente os conceitos fundamentais relativos às técnicas de processamento de imagem que são relevantes para este trabalho. Na sequência, são abordados os conceitos de WAAM, as características relevantes a serem observadas e as abordagens empregadas para geração e trajetórias para este processo.

2.1.1 Transformações morfológicas

Segundo Gonzalez e Woods (2009), a *morfologia matemática*, no contexto de processamento digital de imagens, consiste em um conjunto de técnicas para extração, representação e descrição de formas de objetos. De acordo com o autor, a linguagem da morfologia matemática é baseada na teoria de conjuntos, tal que um conjunto se refere aos *pixels* que representam um objeto na imagem, ou seja, são membros do espaço 2-D de números inteiros, tal que cada elemento de um conjunto é um par de coordenadas (x, y) de um *pixel* de objeto.

2.1.1.1 Elemento estruturante

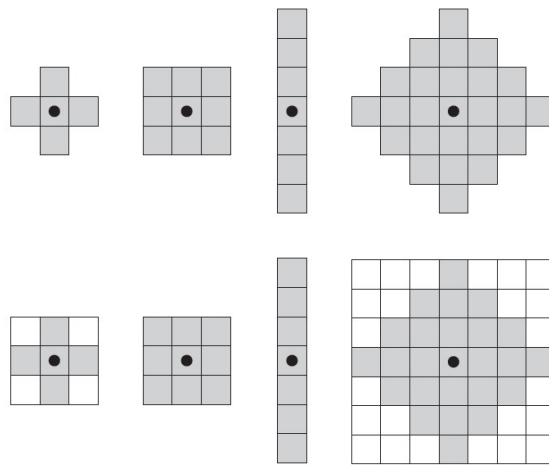
Um conceito fundamental em morfologia matemática é a definição de *elemento estruturante*, que consiste em um conjunto reduzido e bem definido, representado através de uma matriz (ou sub-imagem), que identifica o *pixel* na imagem que está sendo processado e define a vizinhança utilizada no processamento daquele *pixel*. No contexto de processamento de imagens, é importante que um elemento estruturante seja representado por uma matriz retangular e que seja determinado por um ponto de origem do elemento. Exemplos de elementos estruturantes podem ser vistos na Figura 3. Operações morfológicas consistem em processamentos iterados de um elemento estruturante, que é transladado ao longo da imagem.

2.1.1.2 Erosão morfológica

A operação de erosão em morfologia matemática, indicada por $A \ominus B$, é definida por

$$A \ominus B = \{\tau | (B)_\tau \subseteq A\}. \quad (1)$$

Figura 3 – Exemplos de elementos estruturantes (linha superior) e suas respectivas representações matriciais (linha inferior).

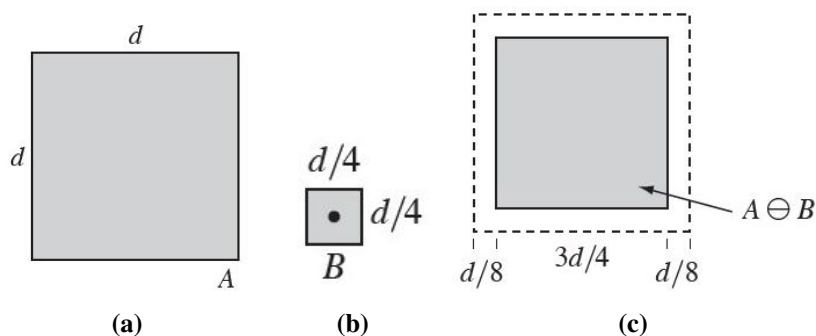


Fonte: Gonzalez e Woods (2009)

onde τ é a operação de translação do elemento estruturante B ao longo da imagem A , ambos conjuntos de \mathbb{Z}^2 .

A operação de erosão, conforme pode ser observado na Figura 4, consiste em todos os elementos onde B transladado por τ está totalmente contido em A . O objetivo principal ao utilizar uma operação de erosão é a *redução* de componentes de uma imagem (GONZALEZ; WOODS, 2009).

Figura 4 – Erosão da imagem de entrada A pelo elemento estruturante B : (a) conjunto de entrada A com dimensão d ; (b) elemento estruturante quadrado B com dimensão $d/4$; e (c) operação de resultado da erosão de A por B , representada na cor cinza, tal que a borda pontilhada é a fronteira do conjunto A (apresentada apenas como referência).



Fonte: Gonzalez e Woods (2009)

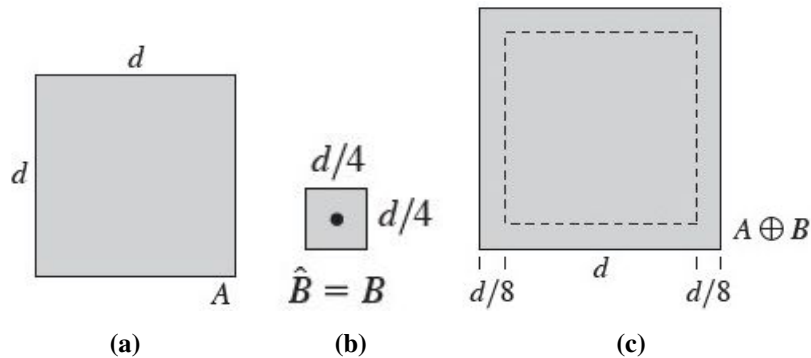
2.1.1.3 Dilatação morfológica

Se considerarmos \hat{B} a reflexão de B em sua origem, τ a operação de translação do elemento estruturante \hat{B} ao longo da imagem A , ambos conjuntos de \mathbb{Z}^2 , então a dilatação, indicada por $A \oplus B$, pode ser definida por

$$A \oplus B = \{\tau | (\hat{B})_{\tau} \cap A \neq \emptyset\}. \quad (2)$$

A operação de dilatação, conforme pode ser observado na Figura 5, consiste em todos os elementos onde \hat{B} transladado por τ se sobrepõe com pelo menos um elemento de A . O objetivo principal ao utilizar uma operação de dilatação é a *expansão* de componentes de uma imagem (GONZALEZ; WOODS, 2009).

Figura 5 – Dilatação da imagem de entrada A pelo elemento estruturante B : (a) conjunto de entrada A com dimensão d ; (b) elemento estruturante quadrado B com dimensão $d/4$; e (c) operação de resultado da dilatação de A por B , representada na cor cinza, tal que a borda pontilhada é a fronteira do conjunto A (apresentada apenas como referência).



Fonte: Gonzalez e Woods (2009)

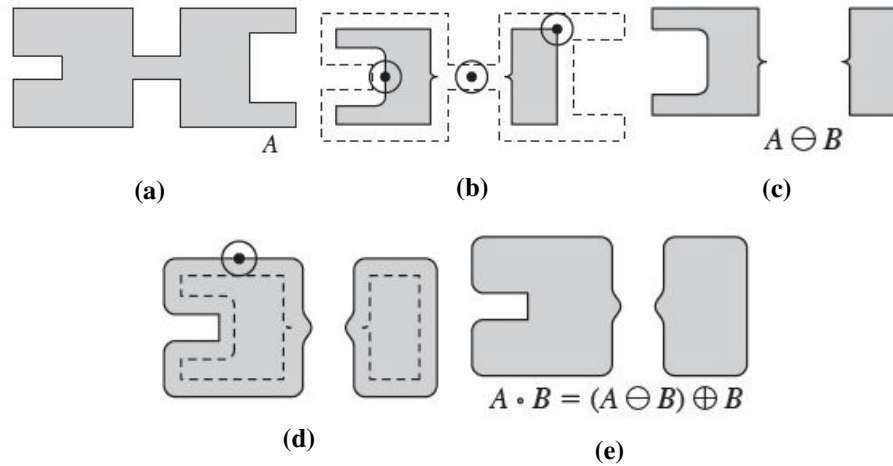
2.1.1.4 Abertura morfológica

Operações mais complexas em morfologia matemática podem ser descritas em termos de operações elementares. Um exemplo deste tipo de operação é a abertura, indicada por $A \circ B$, definida por

$$A \circ B = \{(A \ominus B) \oplus B\} \quad (3)$$

em outras palavras, significa que A é primeiramente erodido por B e depois dilatado por B . Esta operação pode ser observada na Figura 6. Os principais efeitos da abertura são a suavização de contornos, eliminação de saliências finas e rompimento dos istmos (GONZALEZ; WOODS, 2009). Outra interpretação possível é que o resultado mostra todos os elementos de A que contém totalmente o elemento estruturante B .

Figura 6 – Abertura de A por B : (a) conjunto de entrada A ; (b) deslocamento de B ao longo de A , tal que o elemento estruturante é o pequeno círculo mostrado em várias posições, onde o ponto é o centro do elemento estruturante; (c) erosão de A por B ; e (d) dilatação da etapa de erosão anterior; e resultado final da abertura de A por B .



Fonte: Gonzalez e Woods (2009)

2.1.1.5 Algoritmo *Hit-or-Miss*

O algoritmo *hit-or-miss* é também conhecido como transformada *hit-or-miss*, essa operação morfológica tem como objetivo a detecção de padrões dentro de uma imagem. Se considerarmos o elemento estruturante B como sendo o par $B = (B_1, B_2)$, tal que B_1 é a forma a ser detectada com *pixels* presentes no objeto e B_2 a representação dos *pixels* vazios desejados em torno de B_1 , então a transformada *hit-or-miss*, indicada por $A \circledast B$, é definida por (GONZALEZ; WOODS, 2009):

$$A \circledast B = \{ \{A \ominus B_1\} \cap \{A^c \ominus B_2\} \} \quad (4)$$

tal que A^c é o complemento de A .

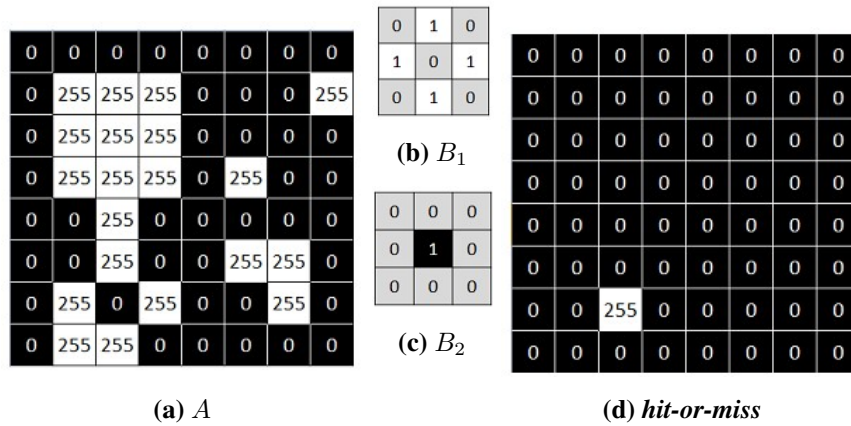
Um exemplo de transformação através da operação *hit-or-miss* pode ser observado na Figura 7.

2.1.1.6 Identificação de contornos

Contornos, denominados aqui como β , podem ser extraídos de qualquer imagem binária por meio da diferença entre o conjunto da imagem A de entrada e a sua erosão por um elemento estruturante B apropriado, geralmente um círculo de raio de um *pixel*. Precisamente

$$\beta(A) = A - (A \ominus B) \quad (5)$$

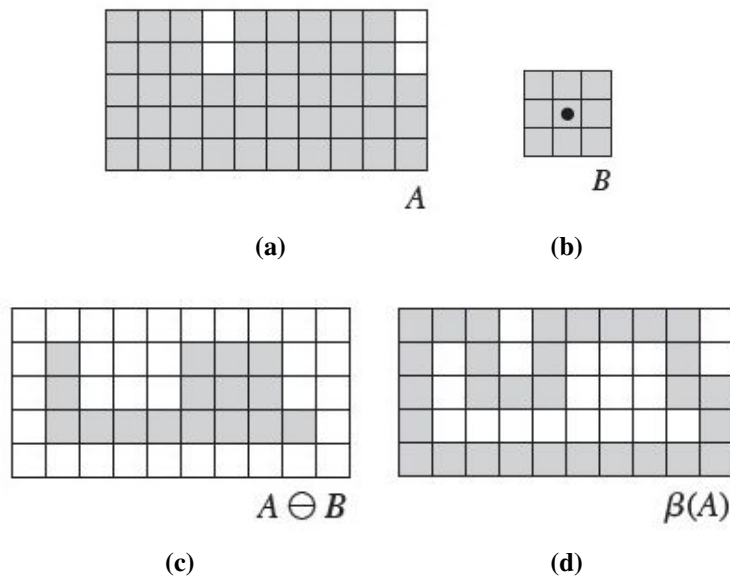
Figura 7 – Transformada *hit-or-miss*: (a) conjunto de entrada A ; (b) elemento estruturante B_1 representando *pixels* de objeto; (c) elemento estruturante B_2 representando *pixels* vazios; e (d) resultado da transformada *hit-or-miss* de A por B .



Fonte: OpenCV (2023)

Um exemplo de extração de contornos através da equação acima pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Identificação de contorno: (a) conjunto A ; (b) elemento estruturante B ; (c) A erodido por B ; e (d) contorno, dado pela diferença entre A e sua erosão.



Fonte: Gonzalez e Woods (2009)

2.1.2 Geometria computacional e processamento de imagens

Geometria Computacional, de acordo com Franco (1985), é um ramo da Ciência da Computação que estuda a resolução de problemas geométricos por meio de algoritmos e estruturas de dados. Pesquisadores nessa área estudam tanto problemas geométricos clássicos, a

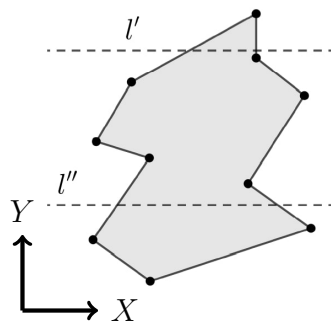
exemplo de triangulação de Delaunay, diagrama de Voronoi, programação linear, triangulação de polígonos, como também problemas motivados por diversas áreas da computação como computação gráfica, projeto e manufatura assistidos por computador (CAD/CAM), robótica, sistemas de informação geográfica, visão computacional, otimização combinatória, processamento de imagens, teoria dos grafos, desenho de circuitos integrados, aprendizagem de máquina, etc.

Quando imagens precisam ser interpretadas por algoritmos, existem diversas ferramentas capazes de condensar as informações necessárias para o processamento e identificação de formas. Ferramentas estas que correspondem a estruturas de dados e algoritmos tratados em termos de objetos geométricos elementares como pontos, retas, segmentos de reta, polígonos, etc. A utilização destas ferramentas para a interpretação da imagem e seus elementos é o que possibilita aplicações como a visão robótica utilizada em diversos processos de controle em AM. Como exemplo, tem-se o trabalho de Lu et al. (2021), que regula parâmetros do processo WAAM de acordo com informações resgatadas de imagens de uma câmera observando as dimensões da poça de deposição de metal.

2.1.2.1 Regiões monotônicas

Uma região monotônica, de acordo com Rodrigues (2019), surge de uma relação entre uma área de contorno fechado e uma reta. Precisamente, em geometria, um polígono no plano é chamado monótono em relação a uma linha reta l , se cada linha ortogonal a l intercepta o limite do polígono no máximo duas vezes. Neste caso, quando temos uma figura monotônica em relação ao eixo Y do sistema de coordenadas cartesiano, podemos dizer que é uma figura Y -monotônica. A Figura 9 ilustra uma forma Y -monotônica.

Figura 9 – Exemplo de figura monotônica em relação ao eixo Y .



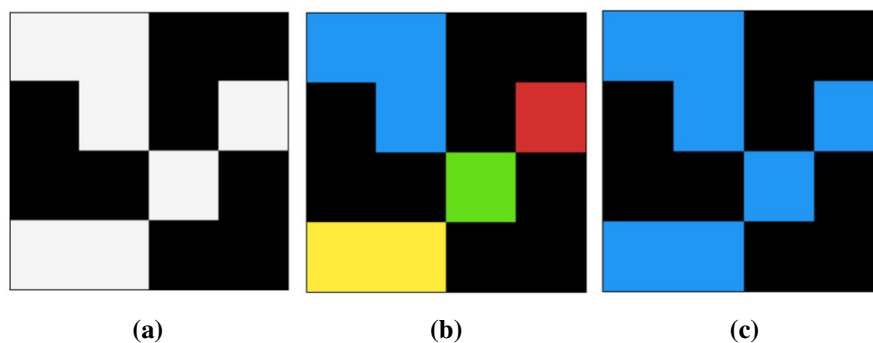
Fonte: Bradski e Kaehler (2008)

2.1.2.2 Componentes conexos

Um *pixel* p na coordenada (x, y) tem quatro vizinhos horizontais e verticais cujas coordenadas são dadas por $(x + 1, y)$, $(x - 1, y)$, $(x, y + 1)$, $(x, y - 1)$. Esse conjunto de *pixels* é chamado em processamento de imagens de *vizinhança-4* de p , é expresso por $\mathcal{N}_4(p)$, tal como descrito por (GONZALEZ; WOODS, 2009). Os quatro vizinhos diagonais de p têm coordenadas: $(x + 1, y + 1)$, $(x + 1, y - 1)$, $(x - 1, y + 1)$ e $(x - 1, y - 1)$, que juntos com o conjunto $\mathcal{N}_4(p)$, compõem o conjunto de *vizinhança-8* de p , ou seja, $\mathcal{N}_8(p)$. Logo, dois *pixels* p e q são adjacentes-8 se q estiver no conjunto $\mathcal{N}_8(p)$. Além disso, conforme descrito por (GONZALEZ; WOODS, 2009): “seja S um conjunto de *pixels* em uma imagem, dizemos que dois *pixels* p e q são conexos em S se houver um caminho entre eles consistindo inteiramente de *pixels* em S — caminho este de acordo com alguma vizinhança estabelecida. Para qualquer *pixel* p em S , o conjunto de *pixels* que são conectados a ele em S é chamado de um *componente conexo* de S ”.

Existem diversos algoritmos para a extração de componentes conexos em imagens, um forma simples de implementação e entendimento é o algoritmo de duas passadas, também conhecido como algoritmo de Hoshen–Kopelman (BABALIEVSKI, 1998). Este algoritmo realiza duas iterações sobre a imagem, a primeira associando cada *pixel* com uma etiqueta temporária, ou *label*, e gravando equivalências; e a segunda, substituindo cada etiqueta pelo menor valor da equivalência. A Figura 10 mostra uma sequência de separação de componentes conexos, operação também conhecida como *labeling*, em uma imagem em diferentes áreas, que assim, podem ser processadas como objetos à parte.

Figura 10 – Labeling: (a) *pixels* da imagem de entrada referentes ao objeto na cor branca; (b) componentes conexos ao utilizar uma vizinhança-4, tal que cada grupo é representado por uma cor diferente; e (c) componentes conexos ao utilizar uma vizinhança 8.

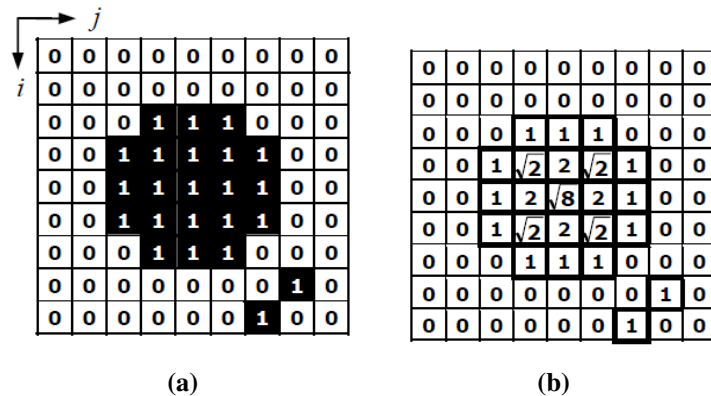


Fonte: (SILVERSMITH, 2023)

2.1.2.3 Transformada da distância

A *transformada da distância Euclidiana*, de acordo com Bradski e Kaehler (2008), é uma operação que converte uma imagem binária composta de pontos de objeto e de fundo em outra, chamada mapa de distâncias Euclidianas, onde o valor armazenado em cada ponto corresponde à menor distância Euclidiana entre este ponto e o fundo da imagem. O uso de distâncias Euclidianas se deve ao fato de que o mapa se torna invariável à rotação. Apesar do conceito simples, o cálculo pode ser computacionalmente oneroso (TORELLI, 2005), portanto uma série de algoritmos foram desenvolvidos para calcular a transformada como nos trabalhos de Costa (2000), Torelli (2005), Eggers (1998) e Danielsson (1980). Um exemplo do resultado para uma imagem binária pequena pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Transformada da distância: (a) exemplo de imagem binária com elementos de fundo (0) em branco e de objeto (1) em preto; e (b) Transformada da distância Euclidiana da imagem.



Fonte: Torelli (2005)

2.1.2.4 Eixo medial

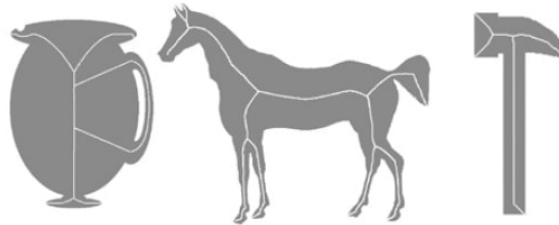
De acordo com Chaussard et al. (2011), o conceito de eixo medial tem duas interpretações principais na literatura:

- O conjunto dos centros dos círculos circunscritos pelo contorno fechado da forma, mas que não pertencem a nenhum outro círculo incluso neste contorno.
- O conjunto de pontos dentro do contorno fechado que contém mais de um resultado para o ponto mais próximo nos limites do contorno.

Como pode ser visto na Figura 12, quando o eixo medial de uma figura é combinado aos valores das distâncias de cada ponto até os contornos, é possível reconstruir a imagem original

(MONTERO; LANG, 2012). Esta combinação de informações é denominada transformação do eixo medial. Intuitivamente podemos concluir que o valor da distância de qualquer ponto desta transformação informa a largura dos contornos relativos a este ponto.

Figura 12 – Exemplos de figuras bidimensionais e seus eixos mediais



Fonte: (MONTERO; LANG, 2012)

Das diversas formas de se calcular o eixo medial encontradas na literatura, podemos separar duas linhas principais de métodos de obtenção de eixos mediais: geométricas contínuas ou baseadas em imagens discretizadas.

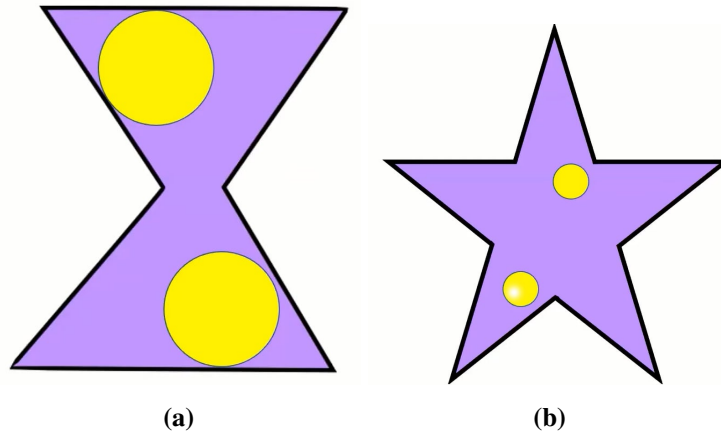
Métodos contínuos como Giesen et al. (2012), Nhangumbe et al. (2017), Sintunata e Aoki (2017), Lee (1982) e Quadros et al. (2004), podem se provar eficientes para formas geométricas mais simples e compostos por segmentos de retas, no entanto, frente ao aparecimento de arcos e geometrias mais complexas, a tarefa torna-se mais desafiadora (ZHANG et al., 2020b). Frente a isso, a utilização de algoritmos voltados a geometrias discretizadas, como baseadas em campos de distância por Xia e Tucker (2009) e transformada da distância de Borgefors (1986), abrem caminho para o processamento de geometrias de formas livres, muitas vezes de grande custo computacional para o primeiro grupo de algoritmos.

2.1.2.5 Gargalos geométricos

Gargalo geométrico, de acordo com Zhang et al. (2020), se refere a uma ou mais áreas existentes na forma, tal que não existe curva contínua onde um par de círculos com mesmo raio, circunscritos no contorno desta forma, possam se deslocar até uma mesma posição. Essa definição é construída intuitivamente na ideia de um gargalo onde objetos de um determinado tamanho são incapazes de passar.

No contexto deste trabalho, o círculo utilizado pode ser considerado a projeção pela vista superior da trilha de deposição, ou cordão de solda. Na Figura 13 (a) é possível observar um contorno fechado onde há gargalos e outro, Figura 13 (b), onde mesmo existindo áreas inalcançáveis para o círculo, não há gargalos dividindo áreas da figura.

Figura 13 – Exemplos de geometrias com e sem gargalos: (a) exemplo de área com gargalo no centro da ampulheta; e (b) forma geométrica sem a presença de gargalos.



Fonte: Zhang (2020)

2.1.3 Manufatura aditiva por deposição com energia direcionada (DED) e manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM)

Manufatura aditiva por deposição com energia direcionada, do inglês *Directed Energy Deposition* (DED), tal como discutido por Dass e Moridi (2019), é uma tecnologia que utiliza como princípio produtivo o uso de uma fonte de energia concentrada direcionada ao fluxo de material, ambos convergindo em um único ponto focal, onde o material é fundido, no que resulta em uma poça. Uma vez fora do foco da energia o material é solidificado novamente, permitindo a sobreposição de camadas.

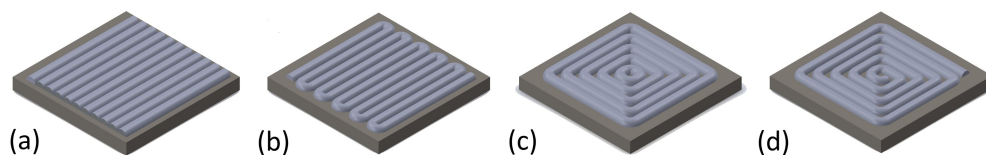
As tecnologias DED podem ser subdivididas de acordo com o tipo do material ou fonte de energia utilizados, citados por Dass e Moridi (2019), mas não limitados a esses exemplos, temos: processos baseados em alimentação por arame ou pó; e processos baseados em fusão ou em energia cinética. As tecnologias baseadas em fusão podem ser ainda subdivididas entre processos à base de laser, feixe de elétrons ou arco elétrico.

O processo de manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM), caracteriza-se como um processo DED empregando a alimentação de um arame metálico fundido por um arco elétrico sobre a presença de uma atmosfera de gases inertes para proteção da poça de fusão.

2.1.4 Planejamento de trajetória

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*, Figura 14 (a), se constitui por uma série de linhas paralelas cobrindo a área a ser preenchida, geralmente alternando a sua direção de movimento e com interrupções nas extremidades de cada linha (DUNLAVEY, 1983). Sua derivada mais utilizada é a técnica de ziguezague (RAJAN et al., 2001), que conecta o fim de cada linha paralela com o início da próxima para criar uma continuidade entre as linhas de *raster*, Figura 14 (b). O contorno paralelo, Figura 14 (c), consiste em uma sequência de repetições do formato externo da geometria, com deslocamentos até o centro da forma, o que produz vários contornos desconexos (FAROUKI et al., 1995). A espiral (REN et al., 2009) é uma derivação da estratégia de contornos buscando um passe de rota contínuo por meio de conexões entre os contornos, Figura 14 (d). Outros padrões de caminho comumente são variações ou combinações dessas estratégias gerais (DING et al., 2014).

Figura 14 – Algumas das estratégias de preenchimento encontradas na literatura: (a) *raster*; (b) ziguezague; (c) contornos paralelos; e (d) espiral.



Fonte: Autoria própria

A combinação de contornos em partes externas da peça com um padrão de ziguezague nas partes internas é chamada estratégia híbrida e é concebida buscando uma combinação das vantagens disponíveis para cada método.

2.2 DESAFIOS EM WAAM RELACIONADOS AO PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIAS

2.2.1 Forças internas à poça de fusão

O efeito Marangoni, como explicado por Dass e Moridi (2019), ocorre devido ao surgimento de forças dentro de um fluido por diferenças de tensão superficial. As variações de tensões superficiais podem surgir na poça de fusão por vários motivos, incluindo (mas não limitados por) resfriamento do material, contato com áreas já depositadas e impurezas diluídas

no material ou presentes na atmosfera. Essas forças produzem irregularidades no espalhamento e geometria da poça de fusão enquanto ainda líquida, tornando-se uma característica crítica para sistemas DED em geral.

Também é necessário observar que além da força de fluxo de Marangoni, outras forças, como as causadas pelo fluxo de ar formado acima da poça de fusão, movimentos devido a mudanças de densidade causadas por gradientes térmicos e forças devido a campos elétricos e magnéticos gerados pela fonte de energia empregada no processo de produção também podem estar presentes e modificar a geometria final da deposição.

2.2.2 Abertura e interrupção do arco

Devido às características inerentes ao processo explicadas na seção anterior, a geometria do cordão de solda dentro de um passe — segmento ininterrupto de deposição — não é uniforme, particularmente nas porções de início e fim de cada trilha de deposição. Graças a isso, o processo WAAM é particularmente afetado pela interrupção do arco (interrupções na deposição). Na abertura do arco elevada energia térmica é gerada, levando a falhas e irregularidades no cordão, que não apenas comprometem a qualidade da superfície como também as características mecânicas da peça (MARTINA et al., 2012). Segundo os autores, estes problemas tornam-se ainda mais sérios ao longo do empilhamento de camadas devido ao acúmulo das irregularidades como, por exemplo, a falta de material devido ao espalhamento irregular causado no momento de abertura do arco elétrico. A Figura 15 mostra alguns cordões de solda onde há diferenças significativas na geometria do material depositado entre o início e o fim dos caminhos de solda.

Figura 15 – Irregularidades resultantes da sobreposição de cordões de solda: o início de cada cordão (à direita) apresentando falta de material enquanto a porção final (à esquerda) apresenta excesso.



Fonte: Martina et al. (2012)

Outro problema gerado pelas interrupções diz respeito à eficiência do processo, pois qualquer movimento sem deposição de material para posicionamento da tocha de solda, também chamado de movimento em vazio, consome tempo do processo produtivo sem aumento do volume de material depositado (WAH et al., 2002).

Devido ao fato de que um elevado número de interrupções compromete qualquer processo de AM dependente de trajetórias, estratégias de preenchimento como *raster* puro e contornos paralelos não são apropriados para esta tecnologia, por isso as estratégias de ziguezague, espiral e suas variantes são adotadas mais comumente (DING et al., 2014).

2.2.3 Falhas de origem geométrica

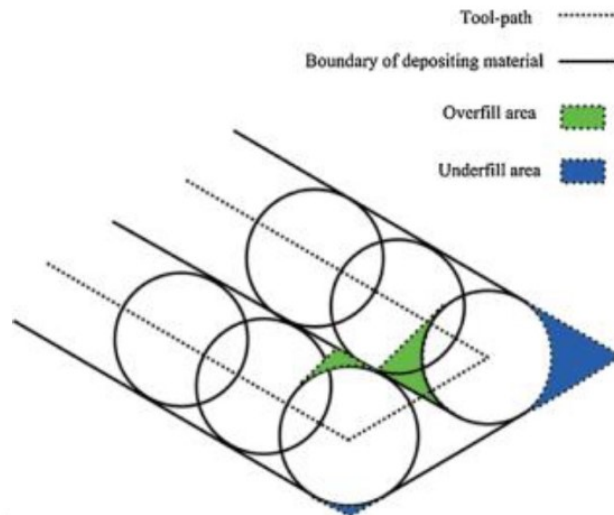
Zhang et al. (2020a) mostraram que a geração de linhas paralelas em ziguezague, além de reduzir a qualidade dos contornos, frequentemente resultam em um grande número de acelerações e desacelerações. Também indicam que ângulos agudos, comumente gerados, causam irregularidades de sobre-deposição ou sub-deposição como apontado pelos estudos de Jin et al. (2014), que são focados em processos como *fused filament fabrication* (FFF).

FFF é um processo baseado na extrusão de material, geralmente um polímero fundido. O processo de geração de rotas para a tecnologia WAAM tem semelhanças com o FFF acerca do fato de que ambos são processos baseados em trajetórias de deposição de materiais extrudados na forma de cordões ou filamentos. Estas similaridades podem permitir a adaptação de algoritmos inicialmente projetados para a tecnologia de extrusão de material para a tecnologia WAAM, com a ressalva de que os materiais se comportam de maneiras diferentes durante o processo de deposição.

Outro tipo de falha de trajetória, conforme discutido por Jin et al. (2014), acontece ao aproximar a área de deposição do material por um círculo. Observe na Figura 16 que 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 sub-extrusões.

Já as estratégias baseadas em contorno e espiral, tendem a gerar falhas de preenchimento com possíveis lacunas no interior da geometria devido à impossibilidade de se criar um novo contorno em espaços muito pequenos, como pode ser observado na Figura 17. Isso ocorre principalmente, se figuras complexas são preenchidas por trilhas de deposição de larguras grandes em comparação às dimensões finais da peça (DING et al., 2016). Segundo os autores, este tipo de estratégia quando comparada as estratégias de ziguezague, possuem uma grande redução

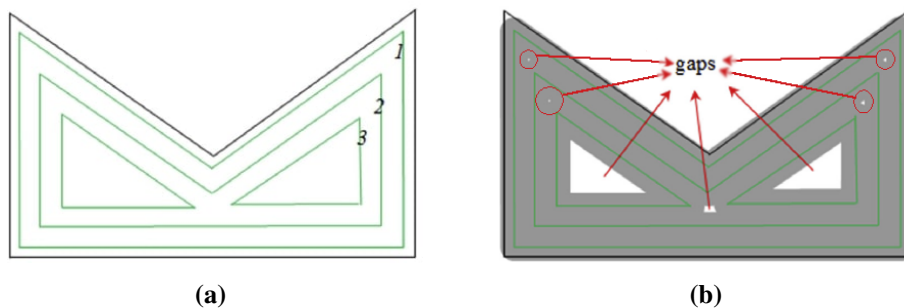
Figura 16 – Irregularidades na extrusão em cantos com pequenos ângulos internos



Fonte: Jin et al. (2014)

de acelerações e desacelerações, melhor definição da forma geométrica e menor tendência a empenamento.

Figura 17 – Geração de contornos paralelos: (a) rotas de contornos paralelos (verde); e (b) típica falha no preenchimento da forma por meio das áreas internas mostradas em branco.



Fonte: Adaptado de Ding et al. (2016)

Outro fator para a geometria da trilha de deposição pode ser o espaço físico disponível para a dinâmica da poça de fusão como espaços entre trilhas já depositadas, limitando a possibilidade de expansão do material, bem como apresentando condições variadas para o efeito Marangoni devido à distribuição de tensões superficiais e diferenças de temperatura entre trilhas vizinhas (Seção 2.2.1).

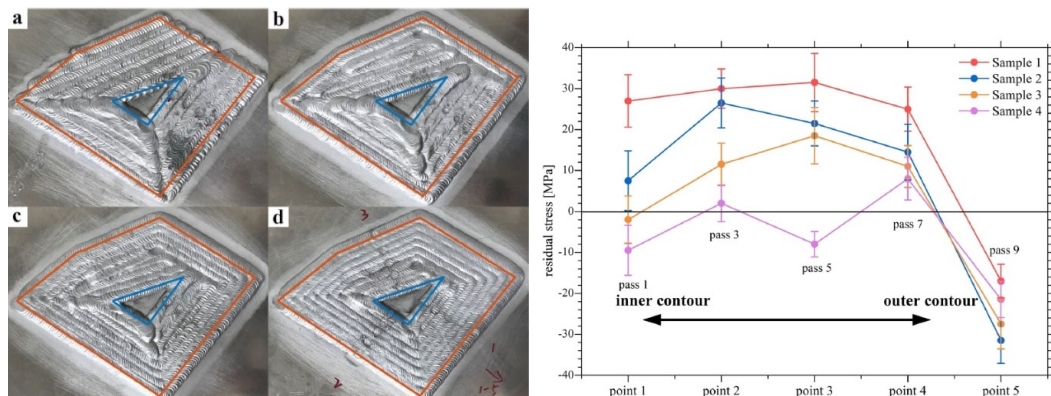
Lacunas resultantes de caminhos mal planejados no WAAM podem ser um problema grave, especialmente para estruturas de paredes finas, onde as lacunas podem potencialmente levar a falhas estruturais de componentes altamente carregados (DING et al., 2015a).

2.2.4 Tensões residuais

Ao determinar o caminho de deposição do material fundido, a estratégia de deposição influencia na distribuição de calor na superfície e tem impacto direto nas tensões residuais originadas pela contração térmica (por aquecimento e resfriamento) do material depositado. O gradiente de temperaturas resulta em tensões residuais e distorções, que não só tem um efeito sobre as tolerâncias mecânicas, mas também podem causar falhas prematuras e deterioração na qualidade das peças fabricadas (SUN et al., 2021).

Zhang et al. (2020a) analisaram os efeitos de diferentes estratégias de preenchimento em peças produzidas por WAAM. Em seu trabalho, 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 em zero, duas, quatro ou seis voltas. Como pode ser visto na Figura 18, ao medir os mesmos pontos nas peças, foi possível identificar variação entre tensões residuais entre peças fabricadas por estratégias diferentes. A estratégia em ziguezague obteve os valores mais altos para tensões residuais entre todas as amostras, todas as regiões medidas com tensões de tração e apenas a mais externa com compressão. A partir do momento que dois contornos são usados, os pontos medidos mostram redução das tensões, com quatro as regiões mais internas passam a apresentar uma tensão de compressão e com seis contornos é possível ver que as tensões se tornam muito pequenas.

Figura 18 – Tensões residuais de acordo com o número de contornos

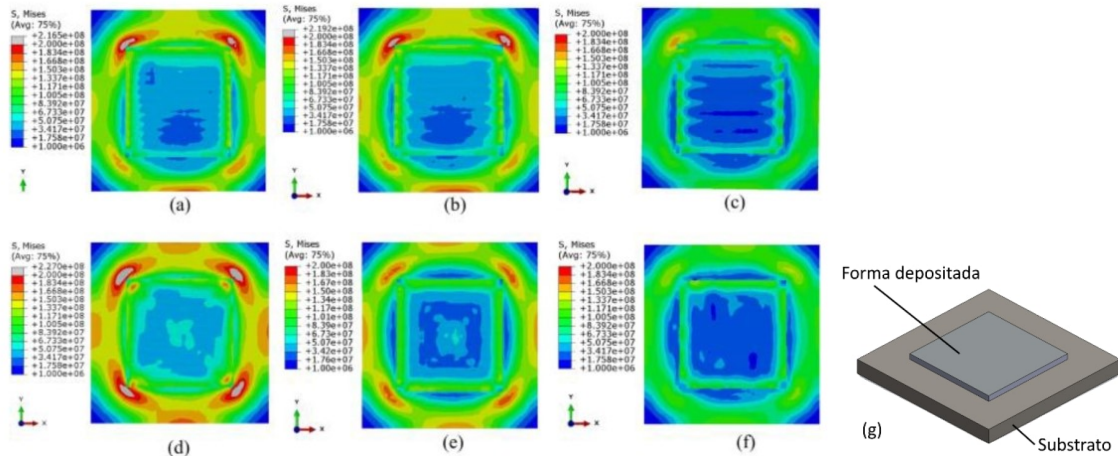


Fonte: Zhang et al. (2020a)

Seguindo a mesma linha, Sun et al. (2021) mediram, por meio de análise de elementos finitos as distribuições de temperatura e características mecânicas, portanto as tensões residuais equivalentes, em um retângulo impresso em uma única camada sobre um substrato (Figura 19

(g)) resultante de diferentes padrões de deposição, mostrando graficamente a distribuição das tensões como pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Distribuição de estresse residual equivalente: (a) ziguezague; (b) *raster*; (c) linhas alternadas; (d) espiral de fora para dentro; (e) espiral dentro para fora; (f) padrão S; e (g) representação do modelo analisado. (Vista superior, Unidade: Pa)



Fonte: Sun et al. (2021)

Considerando que nos gráficos da Figura 19 cores quentes representam maiores concentrações de tensões 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 (Figura 19 (d)). Os autores indicam que este fato ocorre devido à concentração de altas temperaturas no centro da geometria. Em seguida, os padrões de *raster* (Figura 19 (a)) e ziguezague (Figura 19 (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 das tensões, a espiral de dentro para fora (Figura 19 (e)) possibilita menor gradiente de temperatura, com resfriamento mais homogêneo ao longo da camada. Os melhores resultados foram obtidos com o uso dos padrões de linhas alternadas (Figura 19 (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 (Figura 19 (f)), que será discutido em maiores detalhes na Seção 2.3.1.

2.3 SOLUÇÕES EM PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA

Uma vez determinadas as diversas falhas que podem surgir devido a escolha de estratégia de preenchimento, algumas soluções referentes a estudos passados tornam-se essenciais para a

área de planejamento de trajetórias em WAAM.

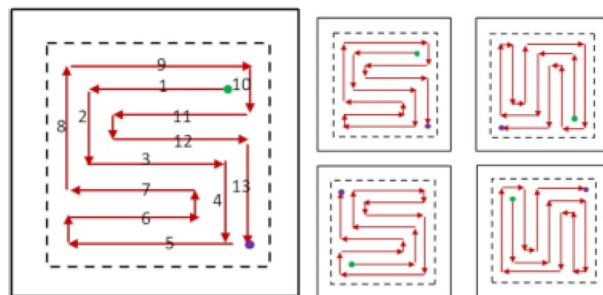
2.3.1 Trajetórias para a redução de tensões residuais

Sun et al. (2021) enumeram as características mais importantes para um padrão de preenchimento em processos WAAM segundo as análises discutidas anteriormente, ver Seção 2.2.4, acerca das tensões residuais e as diferentes estratégias de preenchimento. Estas servem, no contexto deste trabalho, como indicadores da qualidade da rota gerada pelo algoritmo proposto, bem como pontos de observação para determinação de características chave para o mapeamento das camadas da geometria em análise.

Os autores sugerem uma série de medidas para a melhoria da qualidade de uma peça quanto à geração de uma estratégia de preenchimento. Dentre elas podemos destacar: o menor número de interrupções possíveis, portanto estratégias contínuas de preenchimento são preferíveis; para obter o menor número de acelerações e desacelerações da ferramenta do processo, é necessário um padrão com menor número de segmentos de retas conectados em ângulos agudos para formar o padrão; como forma de melhorar a ligação entre camadas, deve existir a possibilidade de se gerar um padrão entrelaçado, 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.

Os pesquisadores também propuseram um *padrão em S*, mostrado na Figura 20 para preenchimento de peças em WAAM, e por meio de análise de elementos finitos mostraram sensível melhora das tensões residuais em comparação com os principais métodos utilizados na literatura, evidenciado pelas cores frias no gráfico da Figura 19 (f).

Figura 20 – Padrão de preenchimento S.



(a) Uma camada

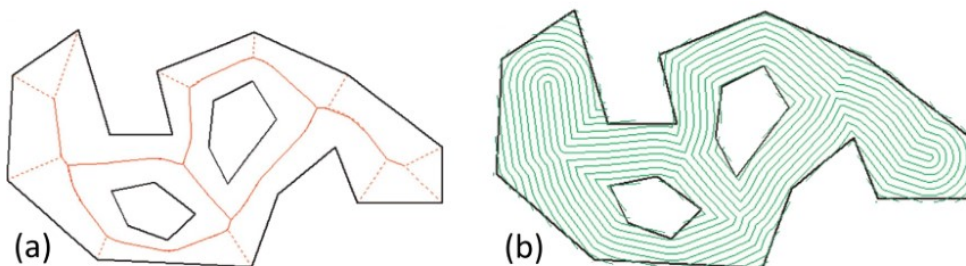
(b) sequência de camadas

Fonte: Sun et al. (2021)

2.3.2 Adaptações da estratégia de contornos paralelos

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, garantindo melhores resultados ao evitar regiões sem preenchimento no interior das peças, tal como descrito por (BLUM, 1967) e mostrado em vermelho no exemplo da Figura 21 (a). 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 Figura 21 (b), ele ainda é aceitável para esta tecnologia, pois peças produzidas por WAAM frequentemente passam por um processo de usinagem. Outra desvantagem a se destacar é o grande número de interrupções do arco elétrico.

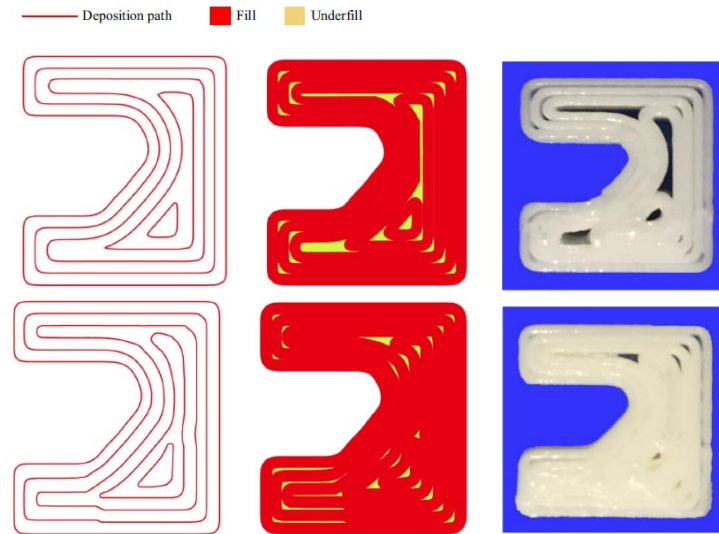
Figura 21 – Determinação do eixo medial (a) e deslocamentos a partir do eixo medial (b).



Fonte: Ding et al. (2015a).

Jin et al. (2017a) desenvolveram uma técnica para geração de rotas em contornos paralelos para FFF compensando os problemas de sub-deposição por meio da compensação da largura das trilhas depositadas (Figura 22). 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 a distância entre trilhas. Logo após, a velocidade da rota 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.

Figura 22 – Comparação entre rotas geradas por deslocamento sem (linha superior) e com otimização (linha inferior).



Fonte: Jin et al. (2017a)

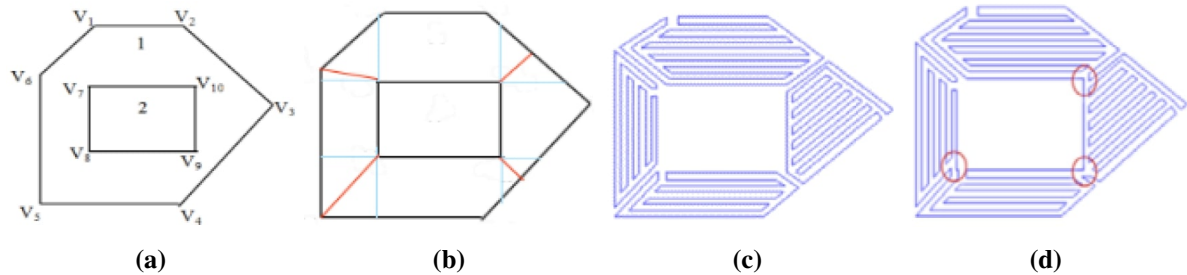
2.3.3 Rotas de caminho contínuo

Ding et al. (2014) sugerem o uso de caminhos contínuos para minimizar o número de desligamentos e religamentos do arco de solda para cada camada, de forma a eliminar os efeitos colaterais dessas operações. Preenchimento contínuo pode ser considerado uma categoria a parte de estratégias de roteamento, buscando preencher completamente os contornos por meio de um único caminho 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 ziguezague 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 WAAM 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. As etapas podem ser observadas na Figura 23.

A divisão entre polígonos, Figura 23 (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 selecionar 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

Figura 23 – Sequência da criação de rotas contínuas de Ding: (a) identificação dos ângulos; (b) divisão em polígonos convexos; (c) geração de rota para cada polígono; e (d) conexão entre as rotas



Fonte: Ding et al. (2014)

contorno (Figura 23 (b)). Caso haja um vértice entre essas extensões, cria-se uma divisão entre este vértice e a origem do entalhe. Se há mais de um ângulo dentro da área, prioriza-se aqueles que fazem entalhes mais próximos a uma linha bissetora do ângulo de origem. Caso não haja ângulos nesta área, apenas uma linha, a linha bissetora 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 (Figura 23 (c)). Ao conectar os polígonos, eles foram capazes de reproduzir o formato dos contornos com apenas um caminho contínuo dentro da camada (Figura 23 (d)).

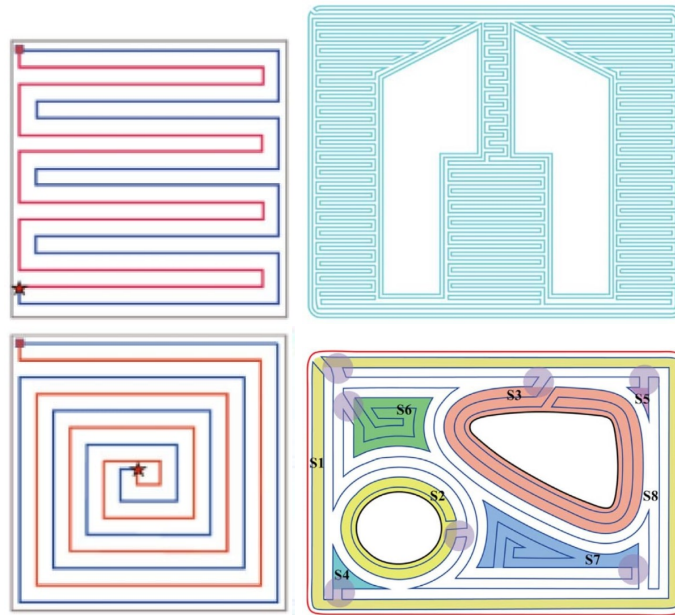
Jin et al. (2017c) mostraram em sua pesquisa outro padrão de preenchimento que utiliza uma estratégia de ida-e-volta para cada rota dentro de um contorno, reduzindo ou eliminando as interrupções de deposição dentro de uma mesma camada. Dois padrões são propostos, um modificando o ziguezague e outro a espiral, e podem ser observados na Figura 24. 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 uma rota única.

2.3.4 Paredes finas

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, conforme discutido na Seção 2.2.2

Estruturas de nervura geralmente não comportam rotas únicas caso haja espaço de apenas uma trilha de deposição. Isso pode ser observado por meio da representação de uma

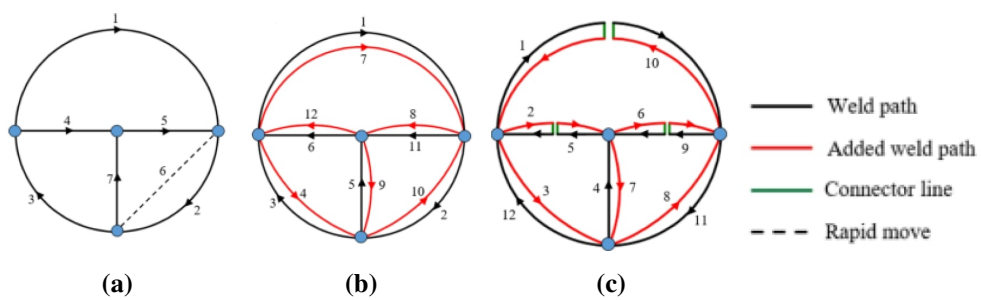
Figura 24 – Padrões de ida-e-volta



Fonte: Jin et al. (2017c)

estrutura de nervura como um grafo, com cada nó sendo uma junção da estrutura real (Figura 25 (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 (NGUYEN et al., 2020).

Figura 25 – Exemplo de grafo de uma estrutura de nervura: (a) representação em forma de grafo; (b) transformação em grafo Euleriano; e (c) divisão das rotas para evitar a revisitação dos nós.

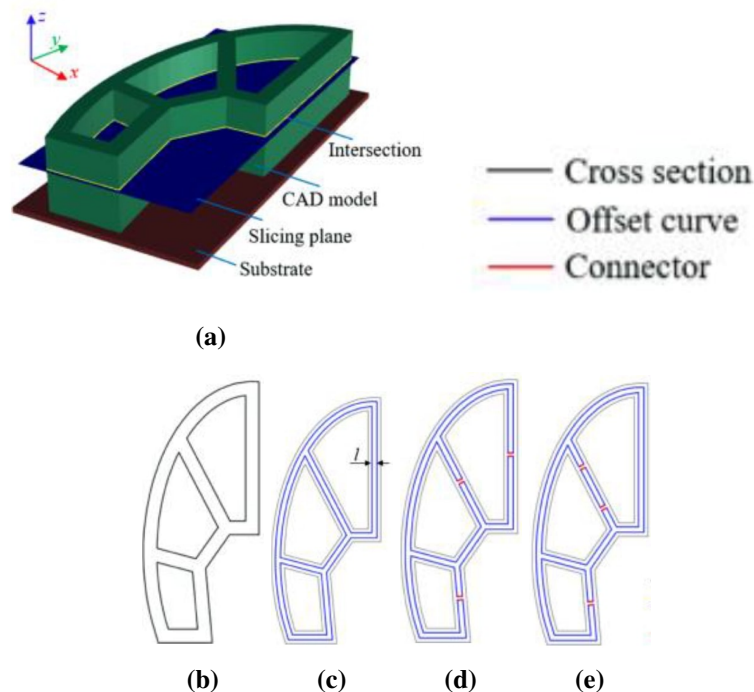


Fonte: Nguyen et al. (2020)

Para a estrutura acima 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, como é possível observar na Figura 25 (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 (Figura 25 (c)).

Nguyen et al. (2020) ainda destacam, que ao desenhar a rota com duas conexões entre cada nó, isso se traduz em contornos paralelos (*offsets*) dentro da geometria original (Figura 26 (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 (Figura 26 (d)). No entanto, é necessário evitar que a determinação dessas conexões ocorra de forma a gerar caminhos desconexos (Figura 26 (e)).

Figura 26 – Exemplo de planejamento de rota de uma estrutura de nervura: (a) estrutura de nervura; (b) representação de uma camada; (c) determinação dos contornos; (d) conexão dos caminhos; e (e) exemplo de conexão inválida.



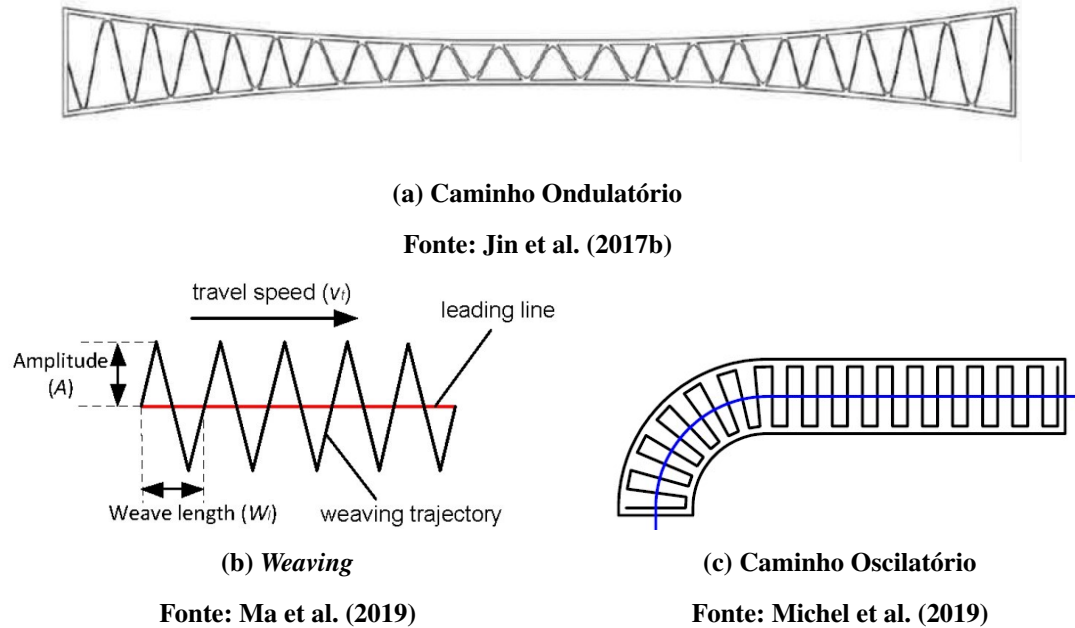
Fonte: Nguyen et al. (2020)

Alguns pesquisadores também investigaram diversas formas de preenchimento voltadas para geometrias de paredes finas com o objetivo de garantir maior uniformidade do preenchimento. É possível destacar os trabalhos que consideram a variação da largura da geometria como a técnica ondulada de Jin et al. (2017b), o *weaving* de Ma et al. (2019) e também o padrão oscilatório do trabalho de Michel et al. (2019). Todos mostrados na Figura 27.

2.3.5 Processamento de imagens em manufatura aditiva

O uso de imagens discretizadas na área da AM varia de acordo com a tecnologia empregada. Algumas das tecnologias utilizam imagens durante a etapa de produção como

Figura 27 – Estratégias de preenchimento de paredes finas



princípio de construção das camadas, como é o caso de processos de estereolitografia por projeção de imagens ou máscara, do inglês *mask-image-projection-based stereolithography* (MIP-SL), onde uma resina fotossensível é exposta a luz de frequência capaz de promover a cura e solidificação do material. Nestas tecnologias, seja por meio de projeção direta da luz ou por meio da aplicação de uma máscara para bloquear a mesma, cada camada é diretamente salva e aplicada como um *bitmap* (VOLPATO, 2017). O processamento de imagens nestes casos se concentra, mas não se resume, na discretização das camadas originadas pelo fatiamento de modelos tridimensionais (YE et al., 2017); em técnicas de variação da exposição da resina como forma de aceleração do processo, ou melhoria da resolução, como em Zhou et al. (2021) e em Zhao et al. (2020).

Outra área onde se utilizam imagens em processos AM é o pós-processamento, mais especificamente na área de controle de qualidade do processo. Trabalhos como o de Wong (2020) buscam gerar dados para comparação direta entre as peças produzidas e os modelos de referência através de imagens binárias extraídas em alturas pré-determinadas na peça, como uma forma de avaliação. A mesma técnica de obtenção de dados por meio da discretização de amostras por imagens é utilizada no trabalho de Mao (2021).

Imagens digitais também são parte do controle de processos, em sistemas de realimentação em tempo real elas são utilizadas como forma de equilibrar efeitos dinâmicos em processos AM durante a deposição de material. Exemplos podem ser observados nos trabalhos

de Yao et al. (2018), onde uma câmera alimenta um processo de tomada de decisão buscando alterar parâmetros de produção sempre que falhas de processo em uma camada são detectadas, minimizando assim seus efeitos ao longo da fabricação; e de Wang et al. (2020), onde o monitoramento das imagens da poça de fusão de um processo WAAM alimenta uma rede de predição do comportamento dinâmico dessa poça, buscando alterar parâmetros para uniformizar a deposição do material durante a produção.

Outra área que se beneficia do processamento de imagens como uma aproximação para resolução de problemas é a geometria computacional aplicada a geração de trajetórias. A transformação do eixo medial já foi utilizada como ferramenta de interpretação de geometrias e aplicada em diversas áreas, como por exemplo a correspondência de forma (EEDÉ et al., 2006), segmentação de forma (ZENG et al., 2008), reconhecimento óptico de características (SEBASTIAN; KIMIA, 2005), casamento de forma e reconstrução (DAMON, 2005), e redução dimensional em problemas de valor de contorno (SURESH, 2003).

Na AM essa ferramenta foi utilizada para a geração de trajetórias dentro de uma única camada como nos trabalhos de Ding et al. (2015a) e Jin et al. (2017a) (já mencionados anteriormente). Um destaque importante a se fazer no contexto deste trabalho é a geração de rotas de escaneamento para laser, conforme descrito por Zhang et al. (2020b), utilizadas no processo de *selective laser melting* (SLM), que explicitam o uso de imagens binárias para a obtenção do eixo medial como uma forma de melhorar a eficiência e precisão em comparação a métodos contínuos.

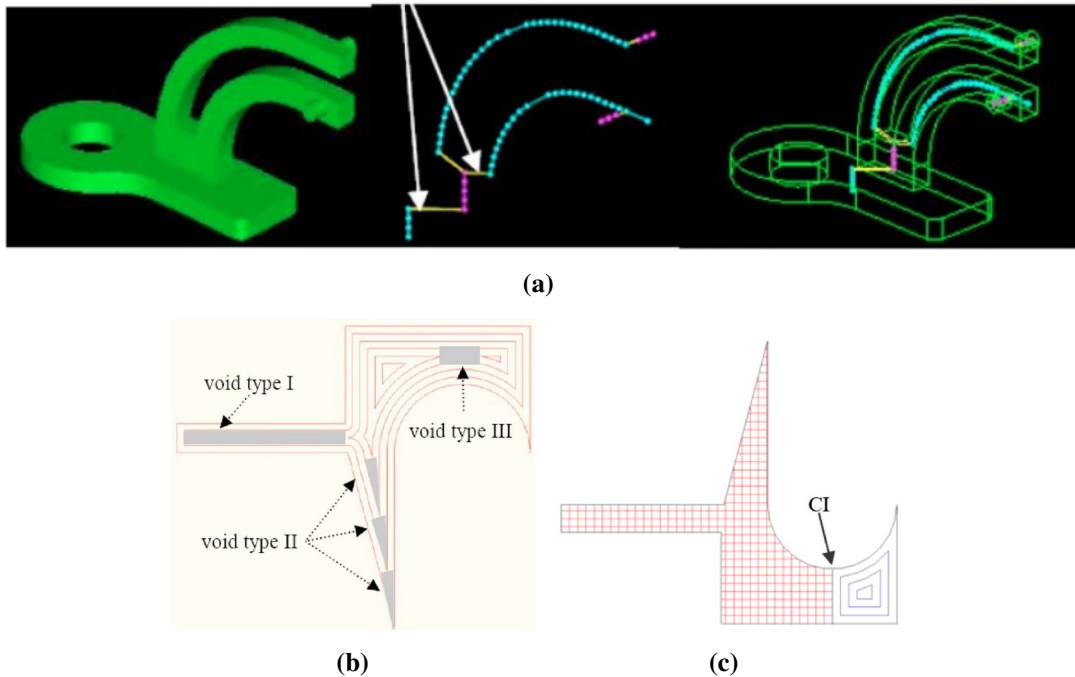
2.3.6 Segmentação e zoneamento de camadas em AM

Algoritmos de segmentação de geometrias para o planejamento de rotas são aplicados à área de robótica móvel como forma de planejamento de deslocamento de ferramentas ou de translado do robô. Estes buscam automatizar a geração das trajetórias com a mínima influência humana possível e lidam com problemas que possuem paralelos com o planejamento de processos para a AM. Como no trabalho de Choset (2000) onde se busca uma rota de circulação para um robô que seja capaz de visitar todos os pontos de uma geometria por meio de uma estratégia de ziguezague. Neste trabalho, o objetivo principal é a redução de divisões para então aplicar a rota em cada célula devido ao fato de que divisões desnecessárias podem aumentar a complexidade do planejamento de uma rota contínua de varredura.

Ren et al. (2010) utilizaram o conceito de segmentação da geometria de peças para

possibilitar o uso de sistemas com múltiplos eixos para atuadores robóticos com maior número de graus de liberdade, ou DOF (do inglês *degrees of freedom*). A separação de corpos é baseada no conceito de eixo central, uma variação do eixo medial para três dimensões. Também é tratada a divisão da geometria de camadas individuais baseada na identificação de potenciais falhas de preenchimento (Figura 28).

Figura 28 – Segmentações de Ren et al. (2010): (a) divisão de um modelo tridimensional baseado no eixo central; (b) exemplos de falhas de preenchimento em estratégia única para a camada; e (c) segmentação de uma camada para redução de falhas de preenchimento.

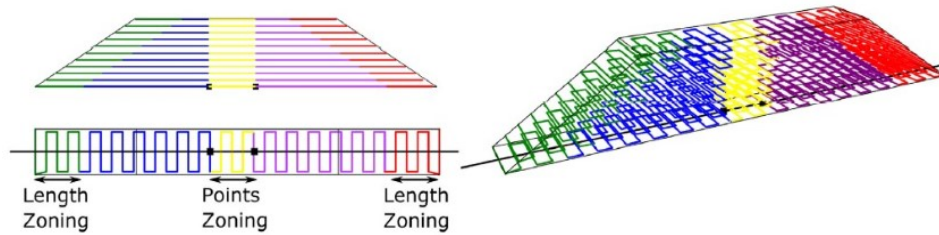


Fonte: Ren et al. (2010)

A divisão da geometria de cada camada como uma solução para o comportamento dinâmico da deposição foi apresentada por Michel et al. (2019), com foco nas variações acumuladas ao longo do empilhamento das camadas e as diferentes relações entre energia aplicada ao material sendo depositado e dissipada aquecendo partes já produzidas da peça. Os pesquisadores propõem a divisão de áreas onde parâmetros devem ser alterados devido à geometria da peça, cada uma dessas regiões apontadas pelo usuário durante o planejamento de processo, no entanto, estas divisões ainda são realizadas manualmente pelo usuário, sem critérios ou métodos de divisão de acordo com características da peça. A Figura 29 mostra um exemplo desse zoneamento ao longo de uma amostra.

Uma forma automatizada de divisão da geometria de uma camada para o planejamento de rotas em AM é apresentada por Zhai e Chen (2019) ao utilizar o diagrama de Voronoi e sua operação dual, dessa forma possibilitando que relações do próprio contorno da peça delimitem a

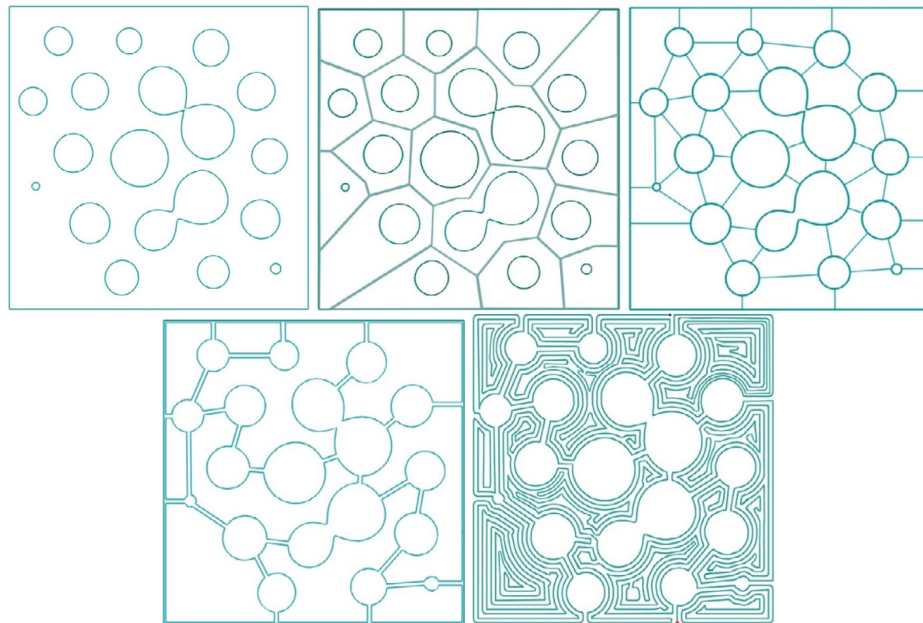
Figura 29 – Segmentação de Michael et al.: exemplos da segmentação proposta pelos autores em várias camadas.



Fonte: Michel et al. (2019)

divisão interna. O objetivo da divisão é criação de diferentes células preenchidas por espirais a serem conectadas entre si para criar uma rota única de preenchimento da forma. A Figura 30 mostra o passo a passo da geração de rotas para uma estrutura porosa.

Figura 30 – Sequência de passos para preenchimento de Zhai e Chen: o uso do diagrama de Voronoi, bem como a operação dual permitem a criação de uma série de espirais e sua interconexão.

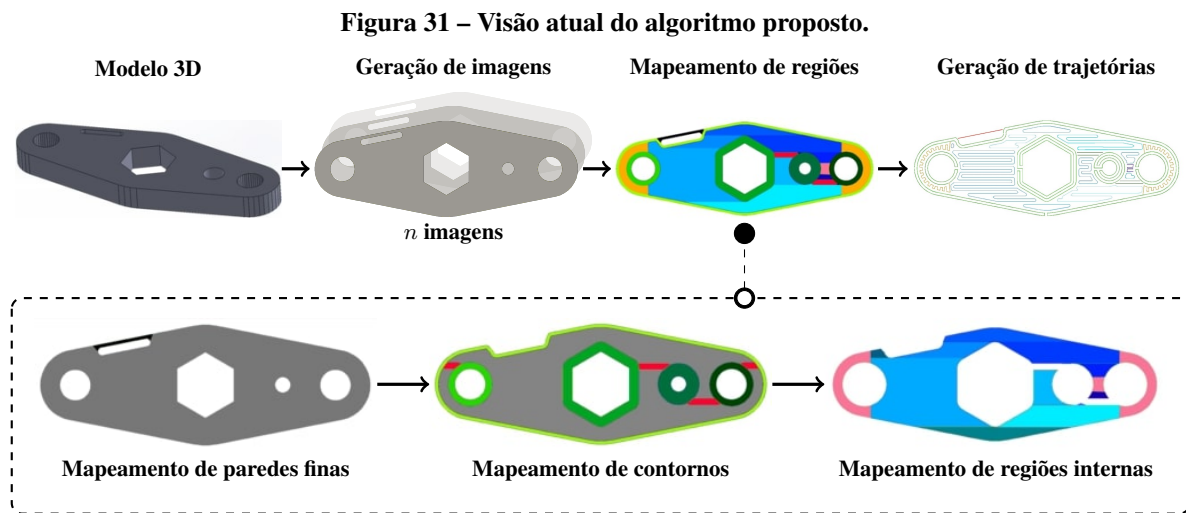


Fonte: Zhai e Chen (2019)

Outra solução para a divisão de áreas em AM foi o seccionamento de camadas por algoritmo genético para processos com laser, conforme descrito por Liu et al. (2021). O algoritmo discutido busca gerar divisões da estrutura baseado na geração de diversas formas geométricas menores. Estas são comparadas à forma original por meio de uma equação de *fitness* e para cada nova iteração do algoritmo genético aquelas que se encaixam melhor na forma são reintroduzidas e usadas como base para novas formas, enquanto as menos apropriadas são descartadas.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta em detalhes o algoritmo proposto baseado em processamento de imagens, conforme mostra a Figura 31, para mapeamento de regiões e planejamento de trajetórias em processos WAAM. Detalhes sobre os conceitos fundamentais necessários ao projeto também são discutidos.



Fonte: Autoria própria (2022)

De uma maneira geral, o módulo de *geração de imagens*, conforme detalhado na Seção 3.1, recebe como entrada um modelo tridimensional formado por uma malha de triângulos e parâmetros do processo, produzindo como saída uma pilha com n imagens binárias. O módulo de *mapeamento de regiões*, Seção 3.2, recebe como entrada uma imagem binária e produz como saída uma imagem segmentada entre regiões com estreitamento (paredes finas), contornos (ou *offsets*) e regiões internas (monotônicas). O módulo de *geração de trajetórias*, Seção 3.3, tem por objetivo conectar regiões segmentadas em caminhos e a geração de código G para a impressão da peça física.

Cada uma das regiões mapeadas por este algoritmo representa uma área onde as estratégias de preenchimento e os parâmetros de processo ligados a elas podem ser indicadas pelo usuário de maneira a atender as exigências específicas do processo para estas geometrias. Portanto, apesar da segmentação ocorrer de forma automática, esta é uma ferramenta para auxiliar no controle do processo e depende do conhecimento do profissional ao utilizar estas divisões de maneira eficaz para a qualidade do processo.

3.1 GERAÇÃO DE IMAGENS

A entrada para a etapa de geração de imagens consiste em: um modelo 3D $m[x, y, z]$, tal que m_x, m_y e m_z , em milímetros, definem um volume mínimo que contém o objeto m ; a espessura da camada desejada (s_t); a largura prevista do cordão de solda (n_w), que é utilizado para definir a largura da trilha; e a densidade de *pixels* por polegada (d_p).

Ao dividir a altura da peça, m_z , pela espessura de cada camada, s_t , são produzidas n imagens, tal que uma imagem $I_i, i = 0, \dots, n - 1$ tem as seguintes dimensões

$$I_i[w] = \frac{d_p \times m_x}{25.4} \quad I_i[h] = \frac{d_p \times m_y}{25.4} \quad (6)$$

onde o valor 25.4 é o equivalente em milímetros para uma polegada, e w e h , denotam respectivamente, a largura e comprimento da imagem em *pixels*.

O preenchimento das imagens é então realizado através dos polígonos gerados pela etapa de fatiamento (MINETTO et al., 2017), os quais são utilizados como entrada em um algoritmo de varredura, e que produz como saída uma imagem binária, tal que o valor 1 (**true**), representado pela cor branca, simboliza a presença de material, e 0 (**false**), representado pela cor preta, a ausência.

É necessário observar que este processo de transformação de representações poligonais para uma versão discretizada por imagens pode implicar em perda de precisão, devido a arredondamentos por exemplo, e portanto, é importante para a qualidade do procedimento determinar a densidade adequada de *pixels* (parâmetro d_p) para representar a geometria de forma a reduzir os impactos desta transição.

Conforme detalhado posteriormente, o algoritmo proposto se baseia em operações morfológicas para o processamento das imagens binárias. No entanto, para algumas dessas operações é necessário que o elemento estruturante (Seção 2.1.1.1), que simula a área de um círculo com o mesmo raio da largura da trilha de deposição do material (n_w), esteja totalmente dentro da imagem, e para assegurar essa condição, são adicionadas bordas nas imagens com dimensão igual a metade do elemento estruturante, que simulam espaços sem material, ou seja, preenchidas com *pixels* de fundo (pretos).

3.2 MAPEAMENTO DE REGIÕES DE INTERESSE EM WAAM

O mapeamento de regiões, conforme mostrado no esquema do algoritmo proposto na Figura 31, é realizado em função de três estruturas: paredes finas 3.2.1, contornos 3.2.2, e regiões internas 3.2.3.

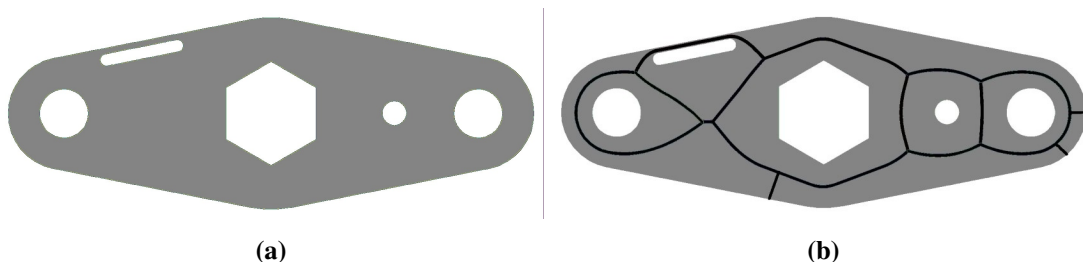
3.2.1 Mapeamento de paredes finas

Regiões de estreitamento do tipo *paredes finas* são descritas na literatura (Jin et al. (2017b), Ma et al. (2019), Nguyen et al. (2020)) como aquelas com pouco material entre os espaços externos e internos de uma peça, não necessariamente determinando um critério explícito para a diferenciação entre estas e outras regiões da figura. No contexto deste trabalho, paredes finas têm como característica uma largura reduzida, de tal forma que apenas uma passagem da trilha de deposição (cordão) de solda é o suficiente para preencher quase que totalmente a região. Especificamente, são locais que não comportam a passagem de duas trilhas paralelas, ou seja, não permitem trajetórias de ida e de retorno. Portanto, a largura de uma região de parede fina é menor que duas vezes n_w .

Ding et al. (2015a) também observaram que o preenchimento de regiões de paredes finas por estratégias de zig-zague leva a problemas estruturais devido ao fato de que a varredura em uma direção pode levar a muitas inversões de sentido nestas áreas, levando a problemas de construção, distribuição irregular do material e conseqüente fragilidade da estrutura.

A identificação de regiões de paredes finas neste trabalho é realizada através do uso de transformações de eixo medial, conforme detalhado na Seção 2.1.2.4, e mostrado na Figura 32. Este tipo de transformação permite condensar informações sobre a geometria alvo, pois obtém-se não apenas a largura de áreas em relação à sua localização como também as linhas do eixo medial podem ser a base de rotas de preenchimento apropriadas para paredes finas.

Figura 32 – Cálculo do eixo medial: (a) imagem original da camada; e (b) imagem do eixo medial sobreposta.

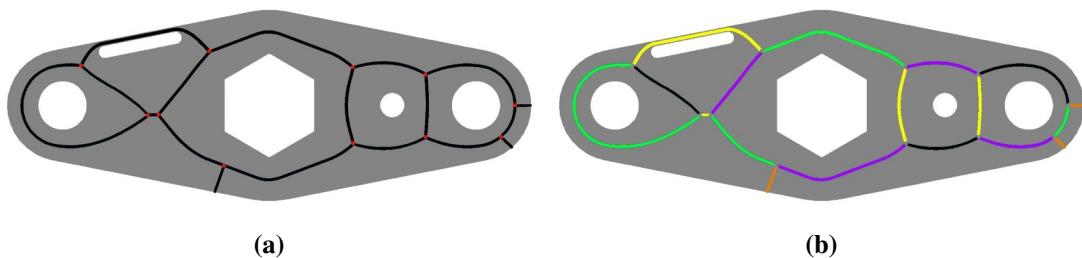


Fonte: Autoria própria (2022)

O eixo medial, junto às informações das distâncias dos limites da figura para cada ponto, pode ser utilizado para reconstruir a forma original da figura. Portanto, cada segmento de linha que constitui o eixo medial representa uma área da figura original, possibilitando assim uma divisão da área de acordo com as larguras entre os limites da forma.

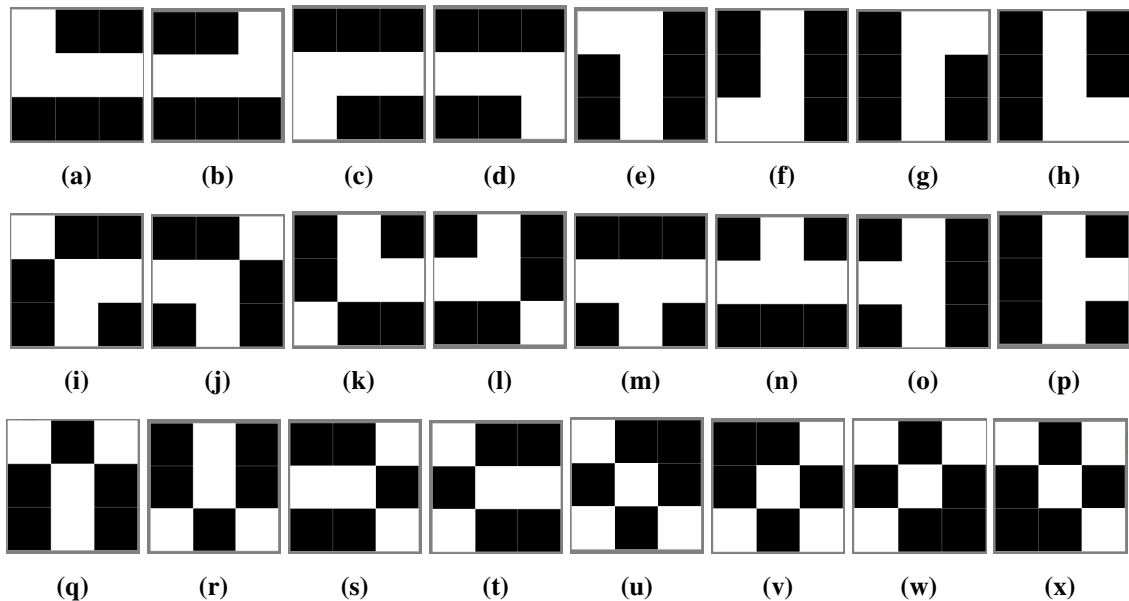
A separação ocorre por meio da identificação de pontos de encontro entre três ou mais dessas linhas, veja Figura 33 (a). Para tanto é utilizada a transformada *hit-or-miss*, com diferentes configurações de *kernels* com dimensão de 3×3 *pixels*, listados na figura 34 (detalhes sobre essa transformação na Seção 2.1.1.5). Após a remoção dos pontos de conexão, uma operação de *labeling* (detalhes na Seção 2.1.2.2) permite separar cada trecho do eixo medial, veja Figura 33 (b).

Figura 33 – Divisão do eixo medial: (a) eixo medial na cor preta, com pontos de encontro em vermelho; e (b) segmentação do eixo medial, tal que as cores identificam cada um dos segmentos, tal que os segmentos em laranja identificam os galhos e os demais segmentos os troncos.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 34 – Todos os *Kernels* utilizados para o algoritmo *hit-or-miss* separando os elementos do eixo medial



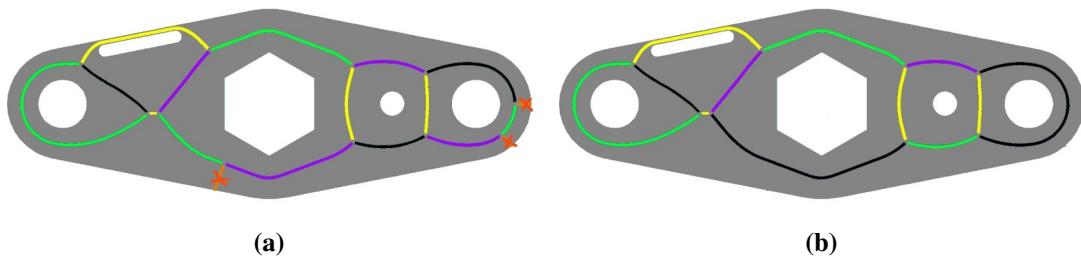
Fonte: Autoria própria (2023)

Quando o eixo medial da peça é dividido em segmentos de linhas, é possível separar a

geometria da peça entre áreas com pontas soltas, denominadas aqui como *galhos*, que representam pontas ou protuberâncias na forma do eixo medial; e áreas de ligação entre os segmentos, denominados *troncos*, que representam áreas da figura, centrais à geometria da peça, de onde partem as protuberâncias. A união de troncos forma um contorno fechado.

Chaussard et al. (2011) destacam que o eixo medial possui uma considerável sensibilidade a pequenas perturbações de contorno, em seu trabalho eles chamam a operação de simplificação do eixo medial de *poda*. Contornos complexos ou com problemas de continuidade ou degeneração tendem a gerar muitos galhos. Um processo de poda também é realizado neste algoritmo excluindo os galhos do processo para apenas serem utilizados os troncos do eixo medial, conforme pode ser visto na Figura 35.

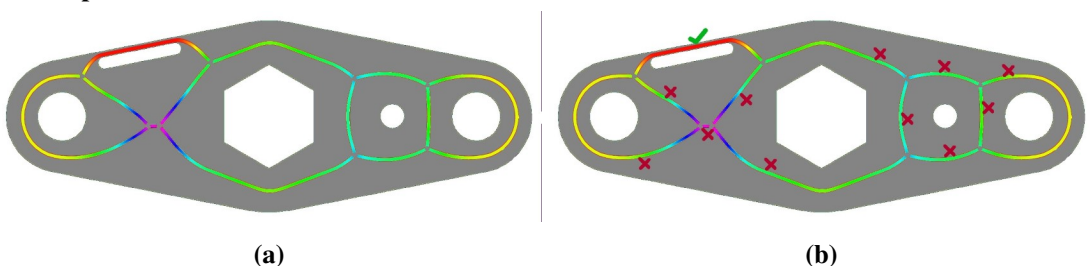
Figura 35 – Poda do eixo medial: (a) remoção dos galhos do eixo medial; e (b) resultante com a separação de troncos.



Fonte: Autoria própria (2022)

A identificação de paredes finas é feita por meio da sobreposição de cada tronco com a transformação do eixo medial. Dessa maneira é possível isolar os segmentos com distâncias as quais a divisão por n_w é inferior a duas larguras de trilha, como na Figura 36. Esta é a indicação de gargalos geométricos como descritos na Seção 2.1.2.5, tal que não é possível traçar os contornos da forma sem a sobreposição parcial ou total do elemento estruturante, e por consequência da trilha de deposição de solda.

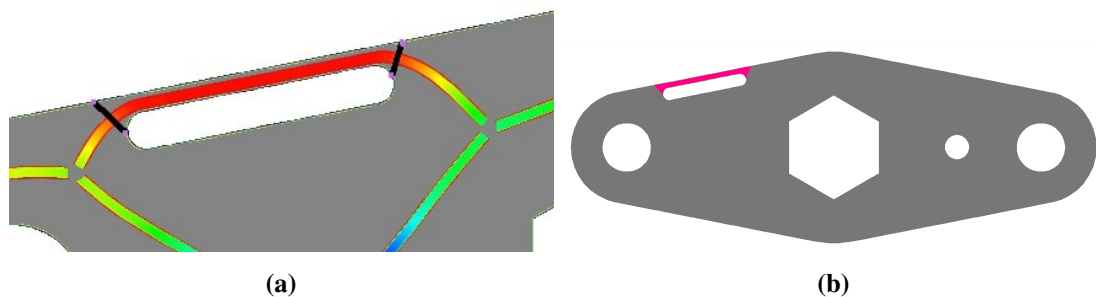
Figura 36 – Cálculo de paredes finas: (a) transformada do eixo medial com poda (filtrada), onde cores quentes representam menores distâncias da borda; e (b) seleção de segmentos candidatos a regiões de paredes finas.



Fonte: Autoria própria (2022)

Para cada novo segmento separado, são determinados os pontos de limite do estrangulamento ao eliminar todos os pontos correspondentes a distâncias acima de $2n_w$ do segmento do eixo medial. Logo após é delimitada a área de estrangulamento ao se encontrar os pontos do contorno mais próximos dos pontos no limite do estrangulamento e traçando uma reta entre eles (Figura 37 (a)). Os novos contornos fechados delimitam áreas que serão denominadas *regiões de paredes finas*. Nestas regiões cabem estratégias de preenchimento diferentes das outras áreas que ainda são necessárias separar, devido ao fato de que a poça de derretimento pode percorrer a área apenas uma vez.

Figura 37 – Determinação de áreas de paredes finas: (a) detalhe da determinação de limites para a região; e (b) resultante do mapeamento de paredes finas (violeta).



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.2 Mapeamento de contornos e suas conexões

Ao remover as regiões de paredes finas da figura, obtém-se uma nova geometria com as áreas onde ainda é possível utilizar uma maior variedade de estratégias de preenchimento. Estudos apontam (Zhang et al. (2020a), Jin et al. (2013), Jin et al. (2014)) que o deslocamento de contornos paralelos em sucessão é uma das mais adequadas formas de se delimitar o contorno de uma peça de tal forma a obter um acabamento de superfície melhor, pois definem um movimento ininterrupto da tocha enquanto deposita material. Dessa forma, esse trabalho propõe, na sequência, o mapeamento das regiões que podem ser melhor atendidas por este tipo de estratégia.

3.2.2.1 Geração de contornos

A geração de rotas através de contornos neste trabalho é baseada em operações morfológicas, detalhadas na Seção 2.1.1, nas imagens binárias que representam as fatias do objeto

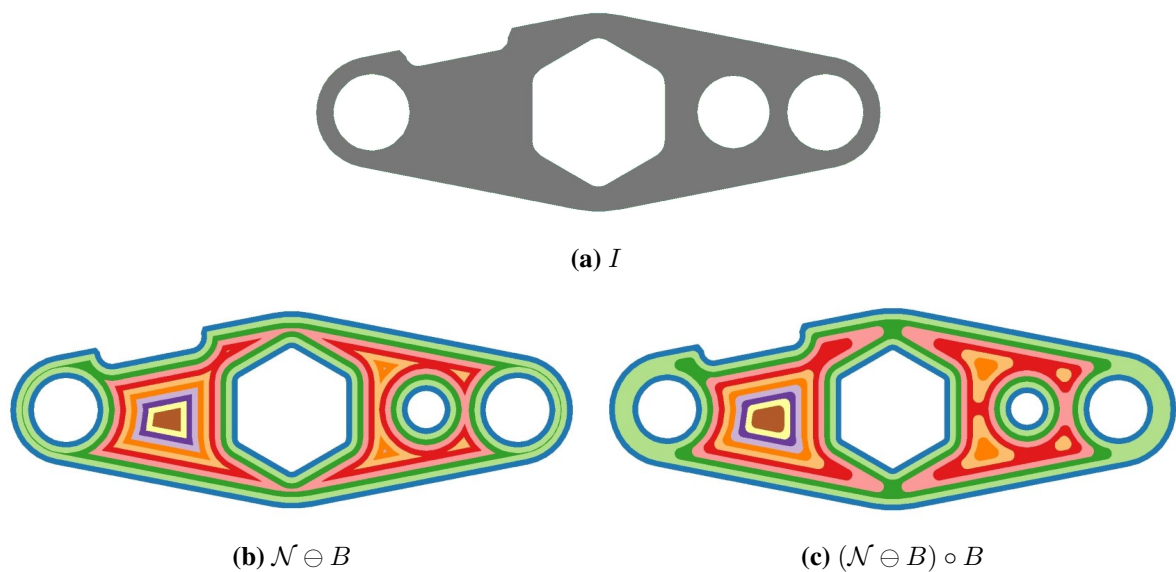
depois da eliminação de áreas de paredes finas. A primeira etapa nesse processo consiste em gerar *níveis de deslocamento* (\mathcal{N}) sobre uma imagem binária I de entrada, de tal forma a simular a passagem do bico de solda durante a impressão da forma. Precisamente, são definidos como níveis de deslocamento o uso de uma operação morfológica de erosão seguida de uma operação morfológica de abertura

$$\mathcal{N}^{(i+1)} = (\mathcal{N}^{(i)} \ominus B^{(i)}) \circ B^{(0)} \quad (7)$$

para $i = \{0, 1, \dots, n - 2\}$, tal que $\mathcal{N} = \{\mathcal{N}^{(0)}, \mathcal{N}^{(1)}, \dots, \mathcal{N}^{(n-1)}\}$ e $\mathcal{N}^{(0)} = I$ para a primeira iteração; onde B é o elemento estruturante da operação morfológica, e que será discutido mais adiante.

A Figura 38 (a) mostra a imagem de entrada I referente a uma fatia do objeto sem as paredes finas; a Figura 38 (b) mostra o resultado da operação de erosão para cada um dos níveis gerados, tal que as cores representam cada um dos $i = \{0, 1, \dots, n - 1\}$ níveis; já a Figura 38 (c) mostra a suavização devido a operação morfológica de abertura. A finalidade da operação de abertura é evitar que a tocha de solda realize movimentos que revisitem uma área já depositada. Desta forma, áreas muito finas da imagem são excluídas da trajetória com essa operação, o que pode evidenciar as potenciais falhas de preenchimento. Estas são identificadas e assimiladas para mais tarde quantificar a qualidade de preenchimento a cada nova operação de deslocamento.

Figura 38 – Geração das imagens dos níveis de deslocamento: (a) imagem original; (b) resultados das seguidas iterações de erosões; e (c) resultado das seguidas operações de abertura das regiões equivalentes.



Fonte: Autoria própria (2022)

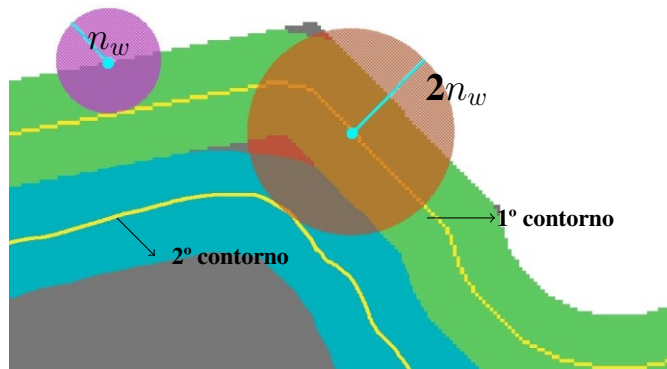
O elemento estruturante B utilizado na Equação (7) tem formato circular e é definido de acordo com o processo de deposição do material, ou seja, é o resultado da dimensão lateral

(largura) da poça de fusão e em função da iteração k ,

$$B^{(k)} = \begin{cases} n_w, & \text{se } k = 0 \\ 2n_w, & \text{se } k > 0 \end{cases} \quad (8)$$

tal que n_w se refere a largura da poça de fusão, ou seja, da trilha de deposição de material. Observe que para a iteração inicial o elemento estruturante tem o mesmo diâmetro da trilha de deposição, e para as demais iterações tem o dobro do diâmetro. O motivo, conforme pode ser visto na Figura 39, é que para o primeiro nível a imagem resultante tem como contornos a distância onde a trilha de deposição de material centralizada reproduz, da melhor maneira possível, o contorno externo da forma. Já para as iterações seguintes, no entanto, são realizadas com um diâmetro duas vezes maior para possibilitar o distanciamento entre contornos de uma trilha completa. É possível observar na figura que dessa forma as trilhas geradas pelos contornos não se sobrepõem.

Figura 39 – Iterações de erosão: a primeira com $d = n_w$ em roxo, gerando o primeiro contorno (amarelo) e a segunda com elemento $d = 2n_w$ em vermelho



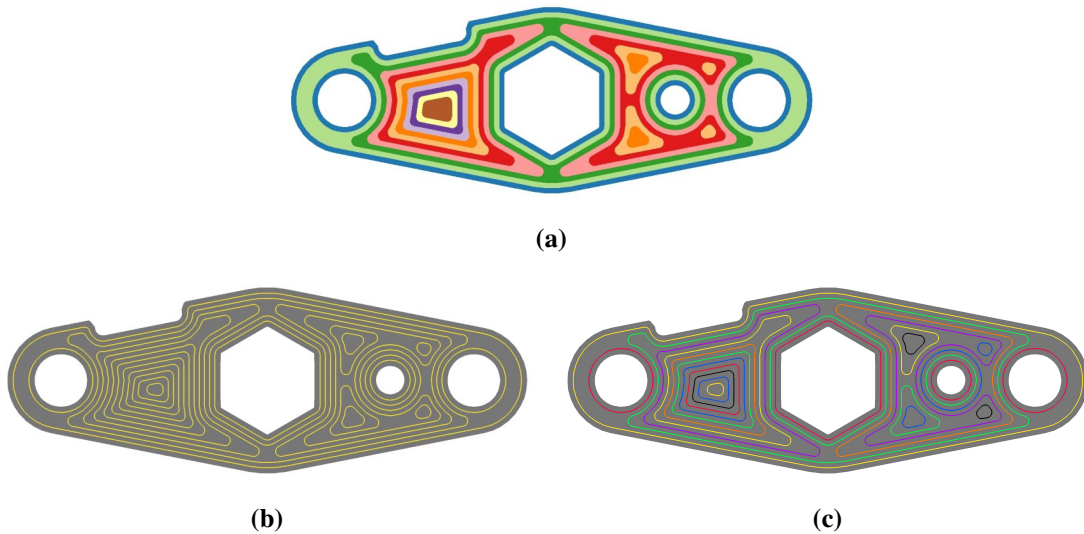
Fonte: Autoria própria (2022)

As regiões de níveis de deslocamento \mathcal{N} são então utilizadas, mais a frente, para definir as rotas baseadas em contornos. Para este propósito, é necessário inicialmente detectar as bordas de cada um dos níveis — para o qual foi utilizado o algoritmo de detecção de bordas de Suzuki et al. (1985), descrito na Seção 2.1.1.6 — conforme pode ser visto na Figura 40 (b), e identificar cada componente conexo nessas imagens, conforme a Figura 40 (c). Os componentes conexos definem os contornos fechados, desconectados dos demais, e nomeados aqui como *loops*. Note que um mesmo nível pode possuir um ou mais *loops*.

O conjunto ℓ de *loops* para uma fatia de imagem é então definido por

$$\ell^{(0,1,\dots,m-1)} = \text{LABELING}(\text{EDGE-DETECTOR}(\mathcal{N})) \quad (9)$$

Figura 40 – Individualização dos *loops*: (a) níveis de deslocamento; (b) detecção de contornos; e (c) representação em cores diferentes de *loops* individuais encontrados.

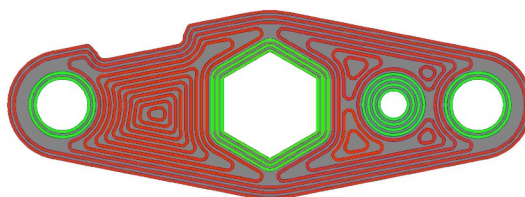


Fonte: Autoria própria (2022)

onde m define a quantidade total. Cada objeto do tipo *loop* $\ell^{(i)}$ é um elemento chave no algoritmo proposto, pois armazena: o nível ao qual pertence; um *id* único; distinção entre contorno externo ou interno; a trajetória para deposição de material; a simulação da trilha de deposição de solda quando esta trajetória é utilizada; as falhas de preenchimento previstas para essa trajetória; e o grupo de contornos a que pertence.

Sempre que um nível passa pela separação de *loops*, o algoritmo de Suzuki et al. (1985) identifica uma hierarquia dos contornos, essa hierarquia é a informação sobre quais contornos envolvem completamente ou não os demais. Neste contexto, é possível distinguir entre os contornos que são originados pelos contornos externos ou pelos contornos dos furos da forma. Quando um contorno, no contexto do seu nível de deslocamento, é envolvido por qualquer outro, este é classificado como um *loop interno*, caso contrário ele é um *loop externo*. O resultado da separação pode ser observado na Figura 41, mostrando *loops externos* originados pelo contorno da forma em distinção daqueles originados pelos furos (*loops internos*).

Figura 41 – Separação entre *loops* externos (vermelho) e internos (verde).



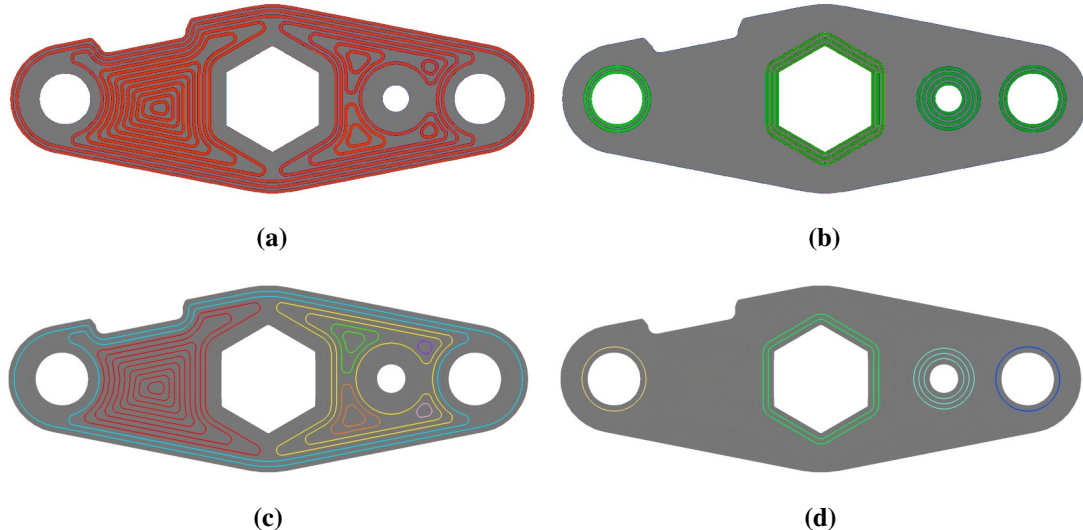
Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.2.2 Agrupamento de *loops*

O agrupamento de *loops* tem por objetivo criar uma relação de hierarquia entre eles, tal que seja possível, por exemplo, excluir todo um conjunto de *loops* que estão contidos (internos) a um outro, caso a inclusão deste como trajetória implique em uma falha de preenchimento (*void*) acima do aceitável de acordo com os critérios definidos pelo usuário, detalhados mais a frente.

Nesta etapa, os conjuntos de *loops* com origem a partir de um contorno externo são tratados de forma diferente daqueles com origem a partir de contornos internos (provenientes de furos na forma). Conforme visto na Seção 3.2.2.1, a etapa de criação de cada *loop* já identifica cada um deles entre origem interna e externa, conforme pode ser visto na Figura 42 (a) e (b). No entanto, não é possível diferenciar para os internos, por exemplo, qual furo que os deu origem (observe na Figura 42 (b) que todos os contornos internos estão com a mesma cor verde). Portanto, nessa etapa, o objetivo é separar entre os diferentes grupos, tal como mostra a Figura 42 (c) e (d), onde cada grupo está representado em uma cor distinta.

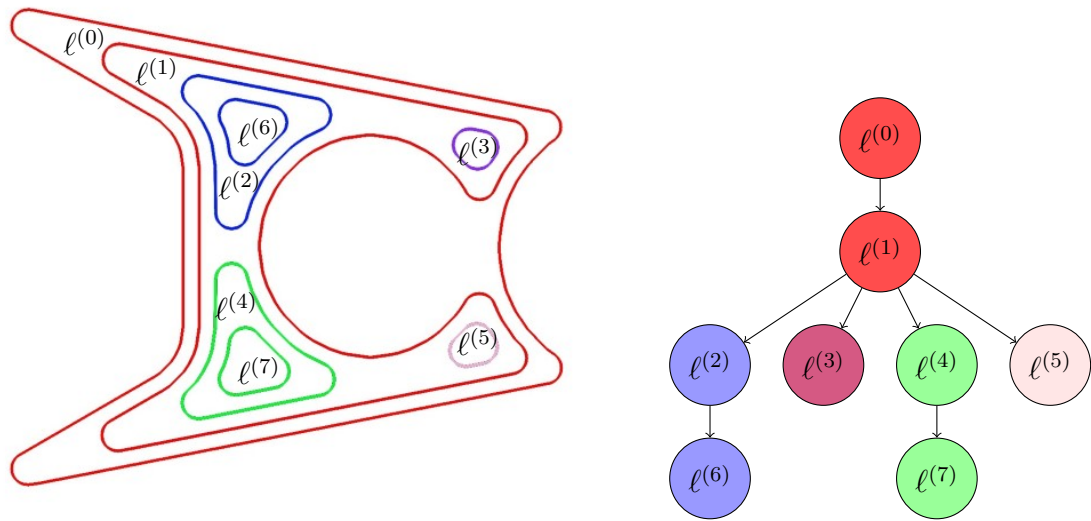
Figura 42 – Agrupamento de *loops*: (a) e (b) mostram os *loops* externos e internos como entrada do processo, antes do agrupamento; (c) e (d) mostram os mesmos *loops* após o agrupamento, em cores distintas.



Fonte: Autoria própria (2022)

A divisão dos *loops* provenientes de contornos externos em grupos é conforme mostrado na Figura 43, onde o *loop* mais externo é representado como raiz da árvore, e os seus filhos diretos são aqueles imediatamente contidos em sua área, tal que um *loop* pode ter um ou mais filhos, e quando é considerado uma folha significa que não tem mais *loops* internos a ele. É importante destacar, que *loops* provenientes de contornos internos são considerados de fontes distintas, portanto, têm suas árvores separadas dos externos como discutido a seguir.

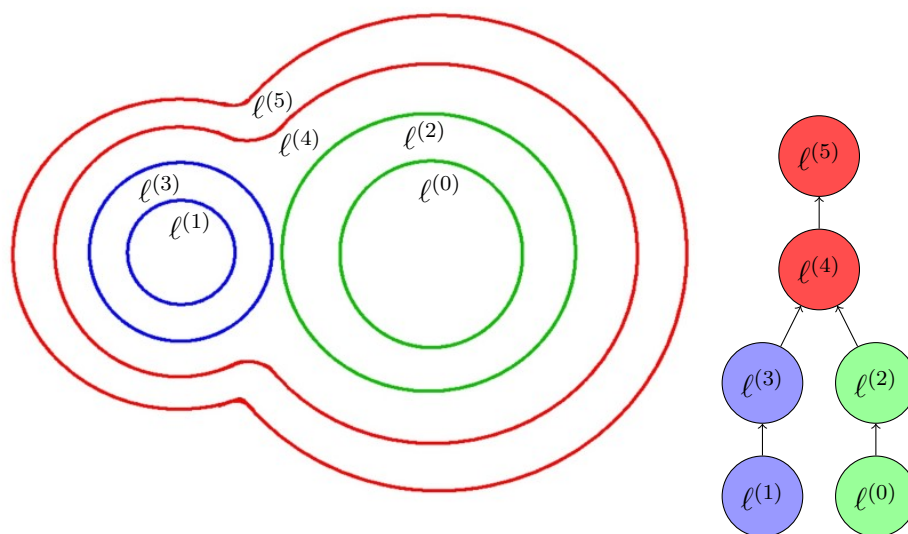
Figura 43 – Hierarquia de *loops* externos: na esquerda, *loops* externos referentes a um pedaço da peça de exemplo utilizada nesse projeto de pesquisa; na direita, a árvore com a hierarquia dos *loops* mostrados na esquerda, tal que cada divisão gera um novo grupo.



Fonte: Autoria própria (2022)

Em contraste, os *loops* internos são gerados do mais interno ao mais externo, distanciando-se cada vez mais do furo de origem. Portanto, a varredura precisa ser feita em ordem inversa. Como pode ser visto na Figura 44, após a inversão a classificação ocorre da mesma forma, com a diferença que a união agora dá origem a novos grupos.

Figura 44 – Hierarquia de *loops* internos: na esquerda, *loops* internos criados para este exemplo; na direita, a árvore com a hierarquia dos *loops* mostrados na esquerda, tal que cada união gera um novo grupo.



Fonte: Autoria própria (2022)

Os diferentes grupos resultantes desta etapa são utilizados como base para a filtragem de

loops discutida na próxima seção, possibilitando o interrompimento da sequência para cada região assim que o critério de *voids* não seja mais atendido. Diferentes regiões de contornos podem possuir quantidades diferentes de *loops*, maximizando a cobertura da estratégia de contornos paralelos no interior da peça.

3.2.2.3 Filtragem de *loops* por identificação de falhas de preenchimento

O preenchimento da forma através do uso de *loops* sucessivos pode implicar em áreas sem preenchimento de material (*voids*), conforme citado na Seção 2.2.3, e que prejudica a peça devido à falta de material, o que consequentemente implica em defeitos, irregularidades e maior fragilidade.

Desta forma, é necessário filtrar um *loop* e todos aqueles derivados dele — descendentes de um nó conforme mostrado nas hierarquias por árvore nas Figuras 43 e 44 — sempre que a inclusão deste gere falhas de preenchimento acima de um limite pré-estabelecido pelo usuário, conforme detalhado a seguir.

Para tanto, *regiões de referência* \mathcal{R} são definidas através de uma operação morfológica de erosão sobre a mesma imagem utilizada para os contornos, ou seja, a imagem original sem as áreas de paredes finas

$$\mathcal{R}^{(j+1)} = \mathcal{R}^{(j)} \ominus B^{(j)} \quad (10)$$

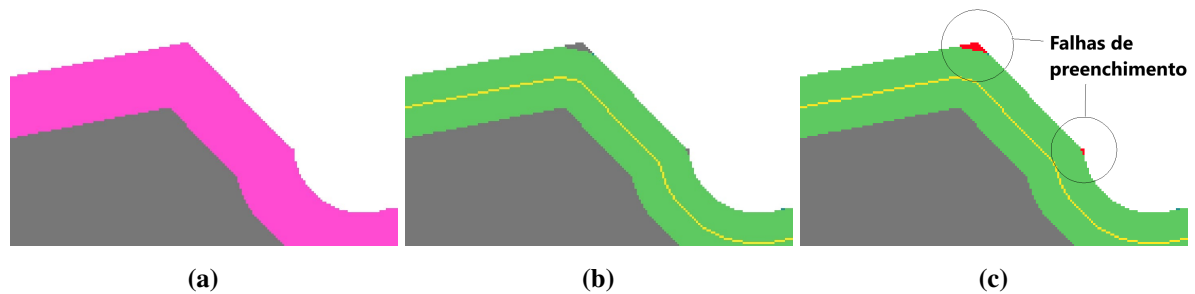
para $j = \{1, \dots, n - 2\}$, tal que $\mathcal{R}^{(1)} = I$ para a primeira iteração, e onde B é o elemento estruturante da operação, conforme definido na Equação (8).

É importante ressaltar que as regiões de referência representam um preenchimento ideal da forma, pois elas incluem áreas que não seriam capazes de conter o elemento estruturante que representa a deposição de material. A diferença, portanto, entre duas áreas de referência consecutivas, destaca uma faixa da imagem que está sendo analisada, tal como pode ser visto na Figura 45 (a).

O próximo passo consiste em selecionar um objeto *loop* dentro da faixa destacada, e simular uma deposição de material ao deslocar o elemento estruturante B , com diâmetro n_w , sobre o *loop*, através de uma operação de dilatação, como pode ser visto na Figura 45 (b). A diferença entre a região coberta por essa simulação e a faixa de referência em destaque indica as falhas de preenchimento, como é mostrado na Figura 45 (c).

As regiões de falha são separadas das demais por meio de uma operação de *labeling*.

Figura 45 – Falhas de preenchimento: (a) região de referência (em rosa); (b) linha do contorno (em verde) que define o *loop* associado, bem como a trilha de deposição do mesmo (em amarelo); e (c) resultado da comparação, mostrando as falhas de preenchimento em vermelho.



Fonte: Autoria própria (2022)

Como critério de classificação, nenhuma região de falha, analisada de forma individual, deve possuir área superior a uma porcentagem da área de deposição de material determinada pelo usuário por meio de um parâmetro de tolerância de falhas p_{err} . Portanto, cada *loop* é associado a maior área de falha em termos de quantidade de *pixels* situados naquela região.

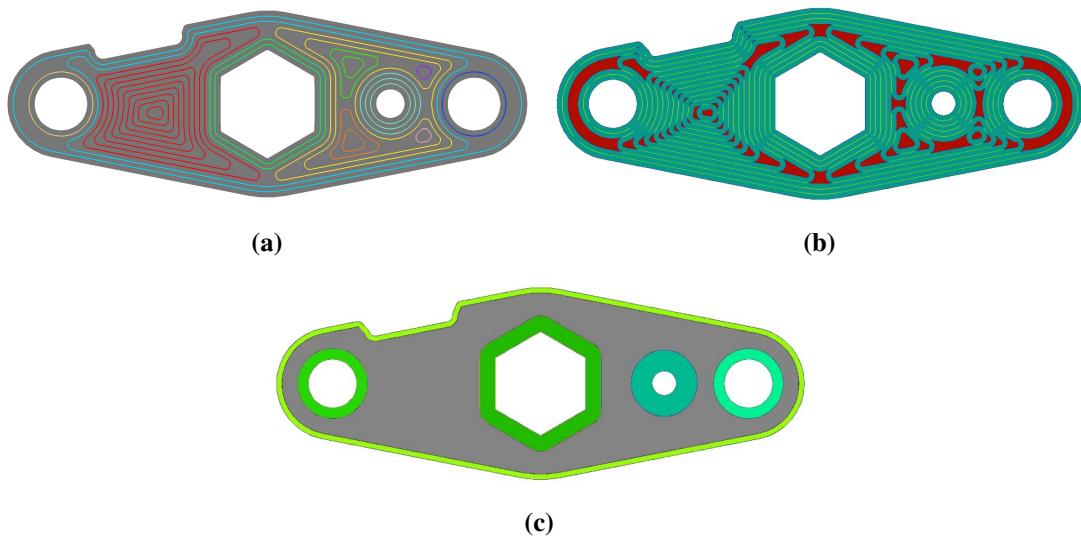
O processo de filtragem acontece por grupos, conforme mostra a Figura 46 (a). Precisamente, a cada iteração, um *loop* dentro de um determinado grupo é selecionado e avaliado respeitando a hierarquia entre eles, conforme mostram as Figuras 43 e 44, tal que cada grupo é analisado da raiz em direção as folhas para *loops* externos e vice-versa para os internos, ou seja, do *loop* mais externo em direção aos internos e dos mais internos para os mais externos, respectivamente.

A Figura 46 (b) mostra todas as falhas de preenchimento, na cor vermelha, ao simular a deposição de cada um dos *loops*, na cor verde. Assim que a inclusão de um *loop* não atende aos requisitos de limite de falhas previstas, dado pelo parâmetro de tolerância p_{err} , ele é descartado e a sequência a partir dele no grupo é interrompida. Observe na Figura 46 (c) que regiões conexas com considerável presença de falhas não são preenchidas por contornos. Desta forma, é importante destacar também, que a quantidade máxima de contornos é variável para diferentes regiões da peça e depende da área total de *voids* produzida a cada adição de um novo *loop*.

3.2.2.4 Conexão de contornos

A deposição de material em regiões de contornos, tanto de paredes internas quanto externas, antes do preenchimento interno, conforme observado por (ZHANG et al., 2020a), auxilia na qualidade final da superfície e no controle das tensões residuais. Mas os saltos entre

Figura 46 – Construção das regiões de contornos: (a) grupos de *loops*; (b) demonstração de cobertura simulada (verde) em todos os níveis com falhas simuladas (vermelho); e (c) regiões de contornos resultantes após filtragem.



Fonte: Autoria própria (2022)

essas regiões criam interrupções de arco que degeneram a qualidade da peça, como discutido na Seção 2.2.2. Além disso, também é importante ressaltar que movimentos sem deposição, também chamados de *movimentos vazios*, consomem tempo improdutivo que é acumulado ao longo da construção da peça.

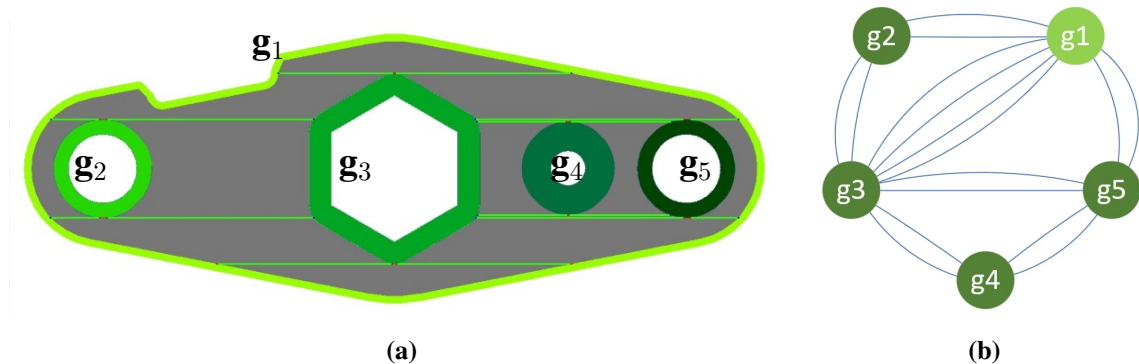
O algoritmo proposto busca, portanto, minimizar o número de interrupções durante o preenchimento ao interligar as diferentes regiões de contornos através de *pontes de contorno*, isto é, caminhos de ida e retorno e com custo determinado de acordo com a distância Euclidiana entre eles. Apesar destas pontes serem parte do planejamento de rotas (detalhadas mais a frente), e não necessariamente identificação de regiões de interesse, o espaço a ser utilizado para estas rotas precisa ser considerado para os próximos passos do algoritmo. Portanto, alguns aspectos do planejamento de rotas já influenciam os próximos passos. O primeiro reflexo dessa aproximação híbrida é a determinação de pontes de acordo com o sentido do *raster* a ser utilizado na camada sendo processada. Determinando previamente o preenchimento das áreas internas é possível definir os melhores locais para estas pontes.

O primeiro passo para interligar os grupos de contornos, é determinar para cada um deles um retângulo mínimo que contém todos os *loops* que o integra. Então, para cada retângulo existente, são criados dois pontos da seguinte forma: sejam y_{min} e y_{max} as coordenadas de menor e maior valor no eixo Y , respectivamente; considere então uma linha horizontal a partir dessas coordenadas, tanto para a esquerda quanto direita, em direção ao grupo mais próximo,

interrompendo a linha ao atingir o grupo vizinho em cada uma das direções.

A Figura 47 (a) mostra, para todos os grupos de contornos, a construção dessas linhas de interligação. Observe que, os possíveis caminhos entre cada grupo de contorno podem ser representados através de um grafo, conforme mostra a Figura 47 (b), tal que um vértice nesse grafo representa um grupo de *loops*, as arestas bidirecionais são as conexões existentes, e o peso de cada aresta, não mostrado na figura, é dado pela distância Euclidiana entre eles.

Figura 47 – Referências das pontes de contornos: (a) indicação de possíveis pontes partindo de cada uma das regiões; e (b) grafo representando todas as possíveis ligações entre regiões de contornos.



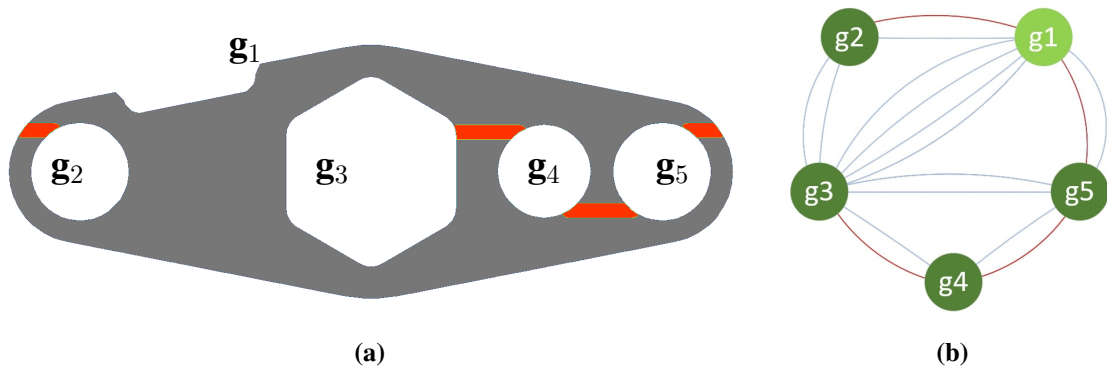
Fonte: Autoria própria (2022)

A representação em forma de grafo para as possíveis interligações de contornos permite a utilização de algoritmos clássicos da área para determinar as sequências de visitação. Como o objetivo é visitar cada vértice ao menos uma vez, foi utilizado um algoritmo de árvore geradora mínima (CORMEN et al., 2001), que assegura conexões com custo total mínimo entre todos os nós, conforme pode ser visto na Figura 48 (b). As linhas das pontes selecionadas dão origem a retângulos de altura equivalente a duas larguras de trilha (para rotas de ida e de volta) e são isolados de outras regiões internas, restantes da subtração de regiões de paredes finas e contornos.

3.2.3 Mapeamento de regiões internas

A última etapa do mapeamento consiste em determinar uma estratégia de preenchimento para as partes remanescentes da fatia após a exclusão das regiões de paredes finas e de contornos. O objetivo principal nessa etapa é minimizar o número de interrupções do arco elétrico, para tanto, são identificados dois tipos de regiões que ajudam nessa questão: regiões de estrangulamento e áreas remanescentes.

Figura 48 – Construção das pontes de contornos: (a) áreas destinadas a pontes de contornos (vermelho); e (b) grafo representando a solução da árvore geradora mínima (em vermelho) para as pontes existentes.

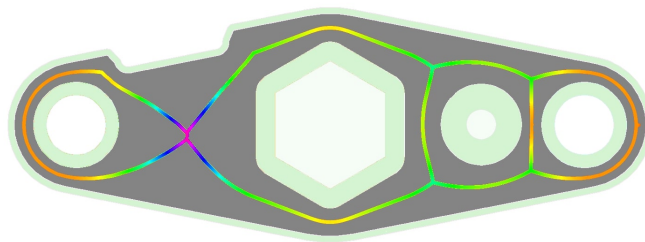


Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.3.1 Regiões de estrangulamentos

Após a definição e exclusão das regiões de contorno de uma fatia, é importante observar que as áreas ainda não processadas podem apresentar gargalos geométricos como discutidos na Seção 2.1.2.5. Esses gargalos são similares a paredes finas, mas são internos a peça, como pode ser visto na Figura 49 com o auxílio da transformação do eixo medial.

Figura 49 – Identificação de gargalos geométricos do preenchimento interno: transformação do eixo medial da região interna, como anteriormente, cores quentes representam menores larguras entre contornos da imagem. Os gargalos da geometria acontecem em regiões onde existem larguras menores entre espaços maiores.

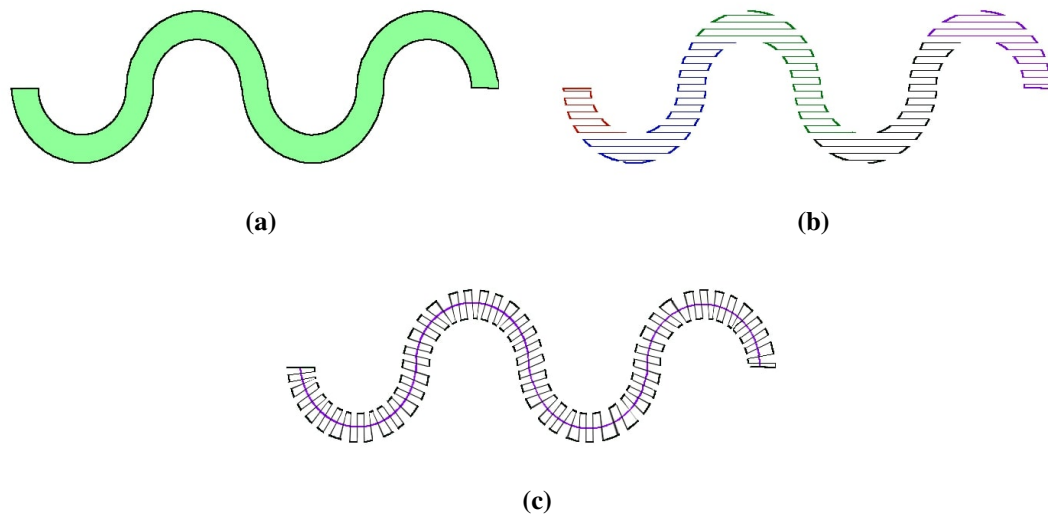


Fonte: Autoria própria (2022)

Nestas regiões há uma limitação na passagem de trilhas de deposição, e técnicas de preenchimento do tipo ziguezague, conforme descrito na Seção 2.1.4, podem resultar em diversas interrupções de arco e irregularidades na distribuição do material depositado devido ao distanciamento das trilhas em caso de uma varredura unidirecional, como mostra a Figura 50 (b). Portanto, estratégias de deposição apropriadas para este tipo de região são necessárias.

No entanto, não são todos os gargalos em uma camada que geram problemas de preenchimento durante o processo de produção. Algumas destas regiões ainda possuem área o

Figura 50 – Exemplos de preenchimentos em gargalos geométricos: (a) área de exemplo; e (b) preenchimento com ziguezague de *raster* unidirecional; e (c) preenchimento com rota oscilatória como no trabalho de Michel et al. (2019).



Fonte: Autoria própria (2022)

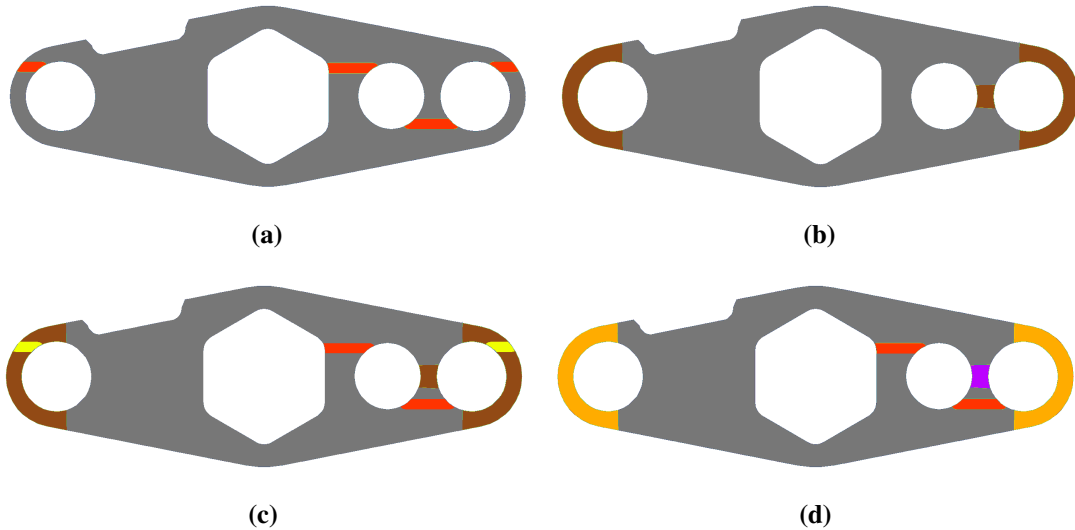
suficiente para que o preenchimento com estratégias de ziguezague obtenha resultados considerados aceitáveis de acordo com critérios do usuário. É então por meio da determinação de número máximo de trilhas (N_{max}), novamente por parte de um usuário com experiência em soldagem, que são determinados os gargalos que necessitam de uma estratégia de preenchimento diferente: as *regiões de estrangulamento*.

A solução para o preenchimento destas regiões em particular envolve estratégias de preenchimento como o preenchimento oscilatório (MICHEL et al., 2019), conforme mostra a Figura 50 (c). Observe que a técnica oscilatória gera uma rota contínua de um extremo do eixo medial da região sendo preenchida até o outro, possibilitando o sequenciamento entre as áreas mais largas ao redor. Esta estratégia, no entanto, não será aplicada para paredes finas externas pois o grande número de inversões de sentido sem o represamento existente nas regiões internas resultaria em perdas da precisão geométrica (JIN et al., 2014), sendo resguardada apenas para situações como estas, pois estes estrangulamentos se encontram represados por outras regiões — no nosso algoritmo elas se situam sempre entre dois contornos depositados anteriormente.

A identificação de regiões de estrangulamento acontece conforme os mesmos passos descritos na Seção 3.2.1, ou seja, após a exclusão das regiões de contornos — mas ainda sem considerar, por hora, as pontes entre os contornos — é calculado o eixo medial da imagem resultante, conforme mostra a Figura 49. Através de um limiar fixo N_{max} que representa o número máximo de trilhas de largura n_w a se considerar como um estrangulamento, são identificadas e

segmentadas regiões com largura menores que N_{max} , como mostra a Figura 51 (b).

Figura 51 – Diferentes tipos de pontes utilizadas no algoritmo: (a) pontes de contorno (em vermelho); (b) áreas de estrangulamento (em marrom); (c) sobreposição de pontes de contorno e estrangulamentos (em amarelo); e (d) pontes de contorno em conjunto com as pontes de ziguezague (roxo) e *crossover* (laranja).



Fonte: Autoria própria (2022)

Regiões classificadas como regiões de estrangulamento (Figura 51 (b)) podem conter áreas em intersecção com pontes de contornos (Figura 51 (a)), como pode ser visto nas alças esquerda e direita da peça de exemplo mostrada na Figura 51 (c). Quando isso ocorre, é desejável que toda a região seja preenchida como uma região de estrangulamento, eliminando assim a outra região, pois caso contrário, a rota oscilatória da maior região seria interrompida pela ponte de contorno.

No entanto, ainda é necessário que a conexão entre contornos ocorra antes do preenchimento interno, isto cria a situação onde há regiões de estrangulamento que devem ser preenchidas ligando contornos e outras que ligam regiões internas. Portanto é necessária a diferenciação destas para facilitar sua identificação.

Neste sentido, determinou-se que estrangulamentos sem cruzamento com pontes de contornos são denominadas *pontes de ziguezague*, pois elas conectam através de rotas oscilatórias áreas maiores onde é sugerido o preenchimento através da estratégia de ziguezague, conforme será detalhado na Seção 3.3. Os estrangulamentos que possuem ligações entre regiões de contorno precisam de uma adaptação da estratégia oscilatória (discutida na Seção 3.3.2), desta forma, este tipo de região foi reclassificado como *pontes de crossover*.

O resultado da classificação das diferentes pontes — de contornos e *crossover* a serem realizadas durante a formação de áreas de contornos e de ziguezague para serem executadas

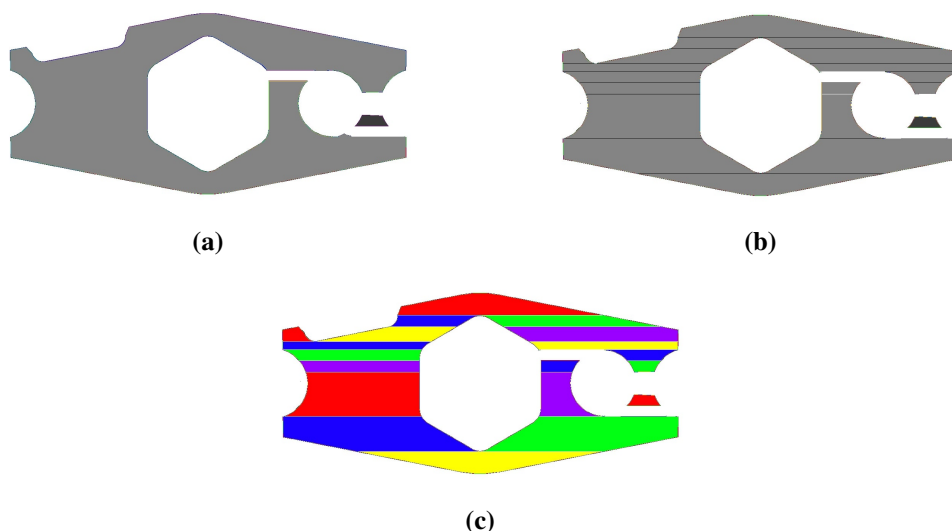
durante o preenchimento das regiões internas da camada — pode ser observado na Figura 51 (d).

3.2.3.2 Áreas remanescentes

A última etapa do mapeamento tem por objetivo segmentar as regiões remanescentes da fatia, ou seja, ao excluir dessa etapa paredes finas, pontes e contornos, sobram regiões internas geralmente com dimensões ideais para o preenchimento por estratégias simples como o ziguezague ou suas variações. No entanto, como um dos objetivos do algoritmo proposto é minimizar o número de interrupções do arco de solda, é necessário dividir estas regiões remanescentes de forma apropriada, isso é alcançável por meio da aplicação do conceito das *regiões monotônicas*, como citado na Seção 2.1.2.1.

O primeiro passo nesse processo é identificar nas regiões internas as componentes conexas, através de um algoritmo de *labeling* (Seção 2.1.2.2), como pode ser observado na Figura 52 (a). O processo de separação em regiões monotônicas é aplicado então para cada componente conexa, ao iniciar um processo de varredura, linha por linha da imagem, do topo para a base, considerando o eixo Y , de acordo com a escolha do usuário e do ângulo de *raster* da camada anterior. Tal que para cada região de furo interno na componente conexa, é adicionado uma linha divisória com cor de fundo (representando a ausência de material) com largura de um *pixel* (Figura 52 (b)). Uma nova operação de *labeling* determina a separação entre as diferentes candidatas a regiões monotônicas, conforme pode ser visto na Figura 52 (c).

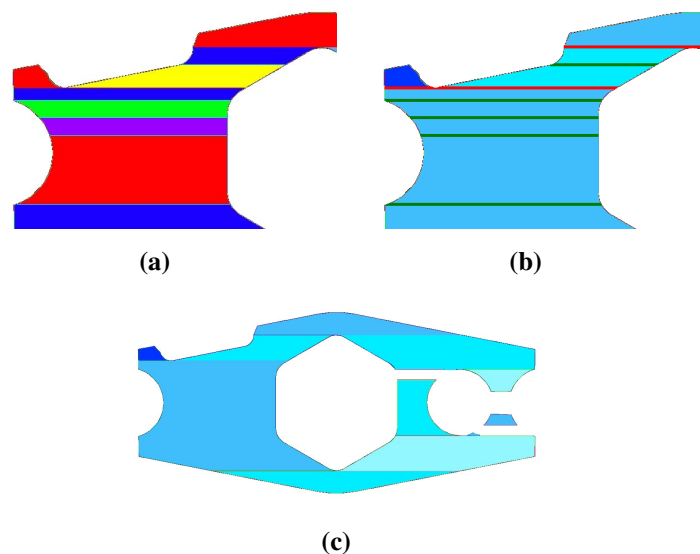
Figura 52 – Separação das regiões monotônicas: (a) regiões remanescentes da figura após uma operação de *labeling*, resultando em duas áreas principais; (b) linhas divisórias encontradas pela varredura; e (c) regiões monotônicas resultantes em diferentes cores.



Fonte: Autoria própria (2022)

A separação da área interna em regiões monotônicas com a estratégia acima, no entanto, acaba por dividir as áreas em toda a extensão da linha horizontal, desde que dentro de cada componente conexa. Para eliminar divisões desnecessárias, as regiões monotônicas são então unidas a outras regiões similares adjacentes toda vez que uma linha divisória separe apenas duas regiões, como pode ser visto na Figura 53 (b).

Figura 53 – Reagrupamento das regiões monotônicas: (a) detalhes das regiões; (b) detalhe das linhas divisórias pertencentes a duas divisões (verdes) e mais divisões (vermelho); e (c) regiões monotônicas resultantes em diferentes tonalidades de azul.



Fonte: Autoria própria (2022)

3.3 GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS E MANUFATURA

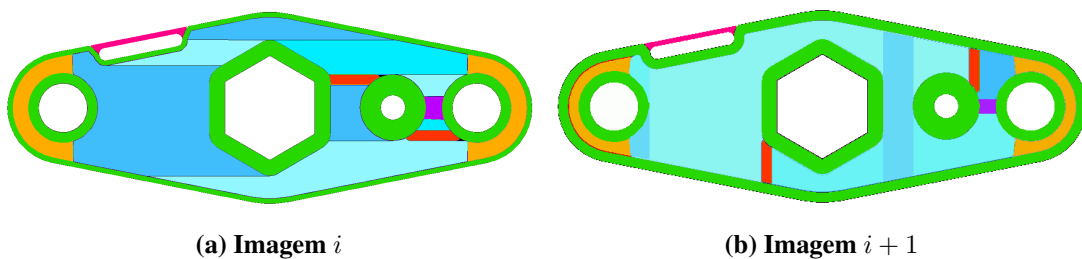
A geração de trajetórias para a produção da peça a partir das imagens com os mapeamentos é dividida em quatro etapas principais: entrelaçamento de camadas, geração de rotas para cada região mapeada, conversão de *pixels* para segmentos, e geração de código máquina.

3.3.1 Entrelaçamento de Camadas

A deposição entrelaçada de camadas, tal como descrito na literatura (SUN et al., 2021), melhora a adesão entre elas e traz benefícios à distribuição de tensões residuais ao mesmo tempo que auxilia na qualidade da superfície, diminuindo o acúmulo de imperfeições ao longo do eixo Z. É necessário observar que as áreas monotônicas geralmente têm uma diferença de ângulo de 90° em relação à camada anterior.

No algoritmo proposto, o entrelaçamento das regiões de ziguezagues acontece entre camadas adjacentes conforme pode ser visto na Figura 54. No entanto, as modificações necessárias são mínimas, pois para alternar as direções das linhas de raster em regiões monotônicas basta rotacionar a imagem da figura em 90° e realizar as demais etapas do mapeamento sem alterações. É importante observar que as regiões após a rotação continuam monotônicas, mas agora em relação ao eixo de construção das linhas paralelas. No final do mapeamento, a imagem é rotacionada novamente à posição original.

Figura 54 – Entrelaçamento de camadas: (a) mapeamento de regiões considerando um ângulo de raster de 0° ; e (b) mapeamento de regiões considerando um ângulo de raster de 90° .



Fonte: A autoria própria (2022)

3.3.2 Definição de estratégias de trajetórias

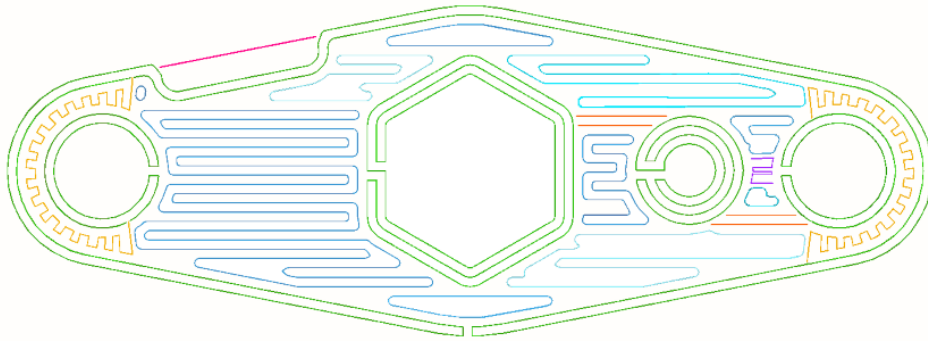
Após o mapeamento de regiões, é possível definir estratégias de trajetórias independentes de acordo com as particularidades de cada área encontrada. Estas estratégias podem ser definidas para otimizar um ou mais objetivos, no caso desta pesquisa nosso foco é na redução das interrupções de arco e melhora na qualidade do preenchimento por meio da redução dos vazios de preenchimento. Por este motivo, depois de previstas as interações entre as regiões para o mapeamento, cada região mapeada pelo algoritmo é tratada em separado para a criação da própria rota. É importante observar que uma região pode permitir uma ou mais possibilidades de uso de diferentes estratégias desenvolvidas anteriormente na literatura. Os critérios de escolha, bem como a aplicação das variadas estratégias possíveis, não foram explorados em detalhes neste trabalho, ficando para serem abordados em estudos futuros.

A Figura 55 mostra diferentes estratégias de preenchimento, ainda no domínio de imagem: contornos e suas conexões são mostrados na cor verde; pontes de crossover na cor laranja; regiões monotônicas e suas pontes de ziguezague em tons de azul; e por fim, as regiões de paredes finas em vermelho.

Observe como as particularidades de cada região influenciam no preenchimento das

formas por meio das diferentes estratégias de geração de rotas empregadas para cada região mapeada. Como exemplo, nas regiões de contorno os *loops* pertencentes a cada grupo são interligados através de caminhos de vai-e-volta, conforme sugerido por Jin et al. (2017c), tal que é possível percorrê-los sem a necessidade de interrupções.

Figura 55 – Estratégias de trajetórias para diferentes mapeamentos.



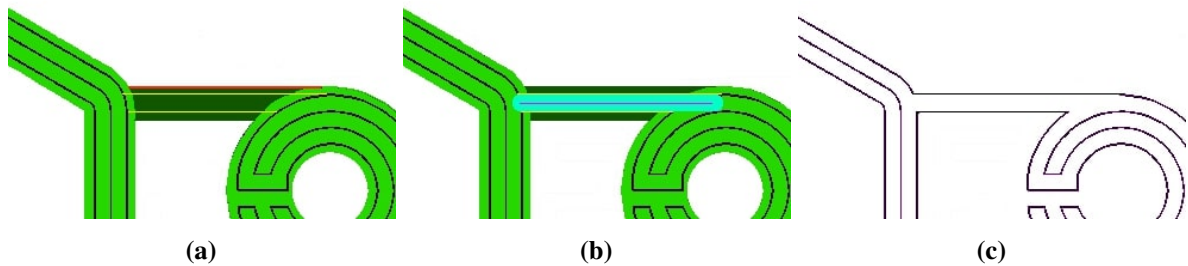
Fonte: Autoria própria (2022)

As regiões monotônicas são preenchidas através de uma estratégia zigzague de ida-e-volta Jin et al. (2017c), também com o objetivo de evitar interrupções, pois as linhas de *raster* são feitas com um deslocamento intercalado, hora adjacente, outrora espaçado, o que possibilita que metade do preenchimento seja realizado na ida e a outra metade na volta — construindo uma rota fechada de caminho único dentro da região. A exemplo das conclusões de (SUN et al., 2021) para estratégias como o *raster* intercalado, esta estratégia também minimiza o aporte térmico.

As regiões classificadas como pontes de contornos, são processadas de forma a criar linhas paralelas em sua extensão, tal como mostra a Figura 56 (a), com o objetivo de interligar os grupos de contornos. A ideia é preencher a ponte com um caminho de ida e outro de retorno, distanciadas de acordo com a largura da trilha de solda. Para garantir a conexão entre as regiões, uma linha paralela, exatamente à metade da altura da ponte é estendida entre as rotas e depois uma dilatação é realizada por uma largura de $n_w - 2 \text{ pixels}$, como mostra a Figura 56 (b), esta nova forma *B* é então retirada da imagem das rotas *A* por meio de uma operação $A \text{ AND}(\text{NOT } B)$. A intersecção das rotas existentes com essa área permite interromper as rotas dos dois contornos a serem conectados, tal como pode ser visto na Figura 56 (c).

As regiões de *crossover* são preenchidas por meio de uma estratégia de rotas oscilatórias, tal como descrito por Michel et al. (2019), usando como referência o eixo medial da região, conforme mostra a Figura 57 (a). Dois elementos de interrupção também são gerados para promover a quebra dos contornos conectados, como mostra a Figura 57 (b). Para garantir a

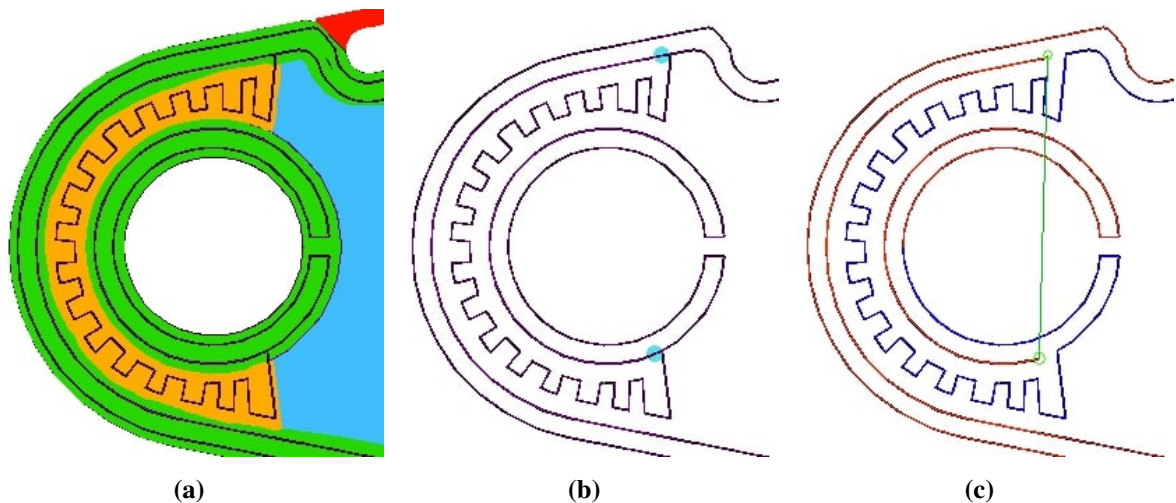
Figura 56 – Rotas de ponte de contorno: (a) extensão das paralelas (amarelo) em relação à linha original da ponte (vermelho); (b) extensão da bissetriz da região (azul) e dilatação da linha (azul claro); e (c) rotas de contornos de regiões interconectadas pela ponte de contorno.



Fonte: Autoria própria (2022)

continuidade da sequência de movimentos, os pontos de interrupção são então interligados por um movimento em vazio, como mostra a Figura 57 (c).

Figura 57 – Rotas de ponte de *crossover*: (a) detalhe das rotas envolvidas no processo de conexão com destaque para a rota oscilatória na área em laranja; (b) áreas de interrupção das rotas de contornos (azul claro); e (c) resultante mostrando os movimentos de ida (vermelho), saltos em vazio (verde) e volta (azul).

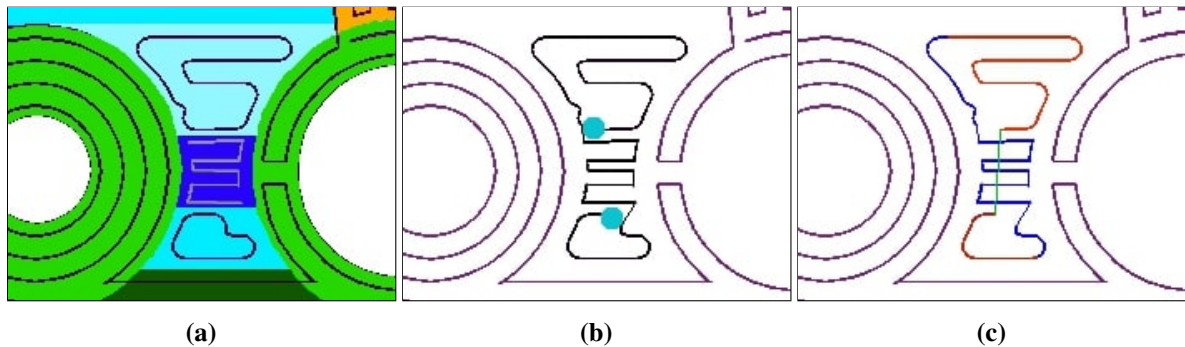


Fonte: Autoria própria (2022)

Observe que, devido ao fato de a rota oscilatória possuir início e fim em pontos distintos, não há como evitar a interrupção do arco quando há necessidade de retornar ao contorno. No momento, há apenas uma tentativa de reduzir o movimento em vazio, mas existe a necessidade de se estudar como outras estratégias, ou um fluxo diferente entre regiões, poderia eliminar a necessidade de retorno, o que evitaria o movimento em vazio.

No caso das pontes de ziguezague, rotas oscilatórias também são utilizadas e interrupções também se fazem necessárias, mas dessa vez são dois ziguezagues de ida-e-volta interligados, veja a Figura 58.

Figura 58 – Rotas de ponte de ziguezague: (a) detalhe das rotas envolvidas no processo de conexão; (b) áreas de interrupção das rotas de contornos (azul claro); e (c) resultante mostrando os movimentos de ida (vermelho), saltos em vazio (verde) e volta (azul), bem como as rotas já realizadas anteriormente (roxo).



Fonte: Autoria própria (2022)

Uma vez que, no estado atual de desenvolvimento, rotas de pontes de ziguezague e *crossover* exigem sempre a interrupção do arco e o uso de rotas oscilatórias, há a necessidade de determinar a ordem apropriada dos preenchimentos, o caminho de ida entre duas regiões precisa ser aquele onde a interrupção ocorre para que, na volta, o caminho oscilatório seja realizado dentro de espaços já preenchidos, como pode ser visto na Figura 58. Essa medida busca o represamento da poça de fusão da solda para mitigar os efeitos da rota oscilatória por meio do contato com áreas menos aquecidas da forma já depositada, como estudos de Zhang et al. (2020a) e Sun et al. (2021) apontam.

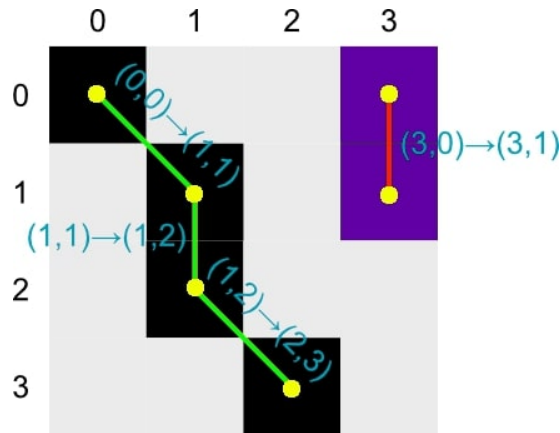
3.3.3 Código de máquina

As rotas de deposição descritas até então estão definidas em termos de coordenadas de *pixels* (domínio da imagem). Embora existam impressoras 3D que aceitem imagens como entrada, este não é o padrão em WAAM. Portanto, é necessário converter os caminhos baseados em *pixels* para segmentos de retas conforme comumente utilizado em códigos de máquina.

A tradução de sequências de *pixels* para segmentos de reta acontece conforme mostrado na Figura 59. Inicialmente, uma operação de *labeling* determina as regiões conexas na imagem. Para cada componente conexa é então criado um grafo, onde um nó deste grafo representa um *pixel*, representados por círculos na Figura 59, tal que as arestas são criadas para cada um dos nós toda vez que existir um *pixel* vizinho a ele, considerando uma vizinhança-8, conforme mostram as linhas na Figura 59.

No entanto, como cada operação de conexão entre rotas ocorre por meio da manipulação

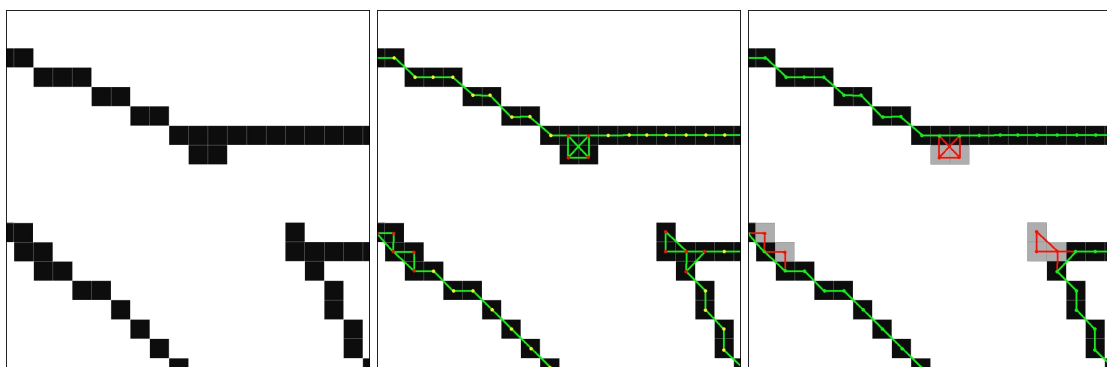
Figura 59 – Algoritmo de transformação de *pixels* para linhas: os diferentes componentes conexos são representados pelos *pixels* de cores diferentes (preto e roxo). A representação em forma de gráfico mostrada por meio da sobreposição de nós (amarelo) e arestas (verde e vermelho)



Fonte: Autoria própria (2022)

de imagens, não há a garantia de que as rotas sejam formadas apenas por traços com a largura de um *pixel*, nem de que exista apenas uma rota possível para a sequência de *pixels* que descreva a forma poligonal final do caminho. Afim de criar um caminho mínimo, de largura de apenas um *pixel* para toda a rota, foi utilizado o algoritmo Dijkstra (1959) sobre o grafo que a representa. Como pode ser visto na Figura 60, a obtenção do caminho mínimo pelo algoritmo não apenas determina uma sequência onde todos os pontos são conectados, como também elimina possíveis desvios e garante a largura apropriada do traço para a sua posterior tradução em sequências de comandos para o processo de produção.

Figura 60 – Transformação de grafo para sequência de coordenadas: (a) imagem do detalhe em forma de *pixels*; (b) sobreposição do grafo mostrando os nós (amarelo) representando as coordenadas e arestas (verde) a conectividade; e (c) solução do menor caminho de Dijkstra (verde) e eliminação de *pixels* redundantes (cinza) por não visitação de nós (vermelho).

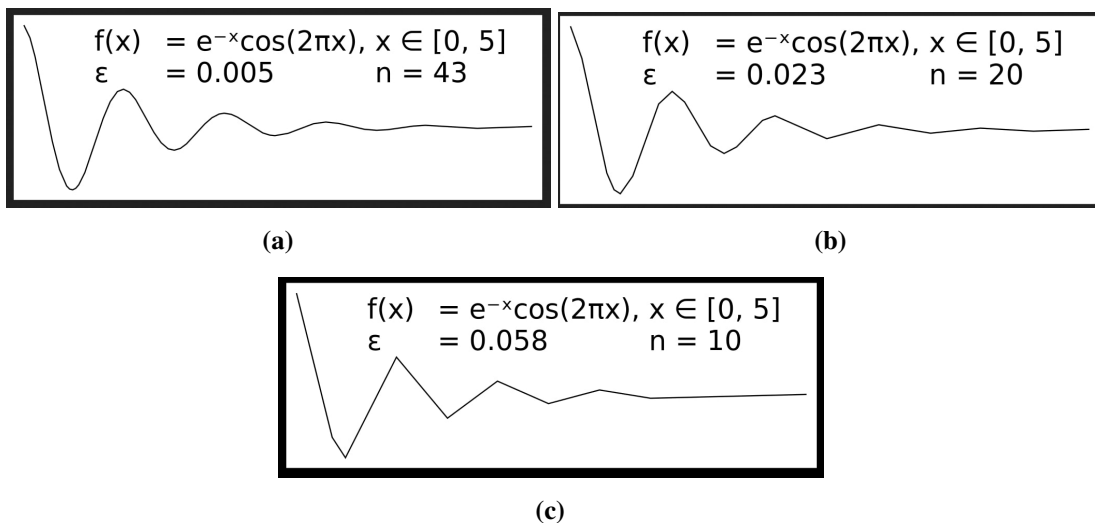


Fonte: Autoria própria (2022)

Além disso, para evitar instruções que realizam movimentos demasiadamente pequenos, carregando os processadores das máquinas responsáveis pelo processo de WAAM, as sequências geradas para cada caminho contínuo são refinadas pelo algoritmo de Ramer–Douglas–Peucker

para simplificação de poli-linhas (DOUGLAS; PEUCKER, 1973). Como pode ser observado na Figura 61, o número de pontos pode ser reduzido de acordo com uma constante ϵ definida pelo usuário, destacando-se a importância da relação de ganho entre precisão e eficiência do processo de produção a ser avaliado para cada peça e contexto.

Figura 61 – Algoritmo de simplificação de polígonos: (a) exemplo de uma função f depois de processada pelo algoritmo de Ramer–Douglas–Peucker, para um $\epsilon = 0.005$, tal que n define o número de segmentos de retas remanescentes e ϵ o limiar para filtragem; (b) mesma função f mas com um $\epsilon = 0.023$, onde é possível notar uma significativa redução no número n de segmentos de reta; e (c) resultado do algoritmo para um valor de $\epsilon = 0.058$, mostrando perda de precisão na representação da função original.



Fonte: Wikipedia (2023)

A interconexão de diferentes rotas que compõem a figura é realizada através de movimentos em vazio, determinados por um algoritmo de otimização de trajetórias (VOLPATO et al., 2013).

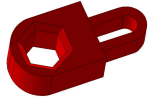




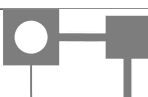




Por fim, o resultado final do processo de planejamento de rotas é uma sequência de comandos de máquina, conhecido como *código G* ou *código de máquina*, informando as coordenadas de início e fim dos movimentos da ferramenta utilizada para o processo de produção, bem como a velocidade destes movimentos, desligamento e religamento da tocha de solda. Este permite uma abstração dos comandos que podem ser usadas em máquinas WAAM ou impressoras 3D de FFF com apenas poucas alterações, permitindo, portanto, os testes preliminares com peças de plástico confeccionadas por meio das máquinas disponíveis no momento da realização deste trabalho.

3.4 AMOSTRAGEM E EXPERIMENTOS

3.4.1 Geometrias testadas

Com o objetivo de avaliar a capacidade do algoritmo em realizar o mapeamento efetivo de características relevantes para o processo WAAM foram selecionadas imagens de fatias de cinco peças conforme apresentado na Tabela 1. Estas peças foram cuidadosamente selecionadas para apresentarem diferentes formas e combinações de regiões, que podem gerar falhas de preenchimento caso apenas uma estratégia de preenchimento fosse utilizada para toda a camada.

Quadro 1 – Peças para testes

n#	Modelo 3D	Fatia selecionada	Observações
1			Possíveis espaços de estrangulamento; o fino arco na direita deve ser mapeado como parede fina ou gargalo
2			Grande número de furos internos, todos com pouco espaço entre si; a ligação com o contorno externo deve ser realizada sem prejudicar as áreas de gargalos no entorno dos furos internos
3			As diferentes dimensões das pontes interligando regiões maiores e o tamanho dos diferentes corpos quadrados e seus furos devem gerar resultados diferentes sem a alteração dos critérios ao longo do mapeamento da figura
4			Maior complexidade da geometria; o grande número de furos e câmaras internas cria a necessidade de um grande número de conexões para a determinação do contorno antes do preenchimento
5			Forma orgânica (especificamente um modelo 3D de um fígado, proveniente de um tomógrafo), a qual muitas vezes é difícil de se calcular precisamente o eixo medial; configuração irregular das formas promove maior responsividade à alteração de parâmetros

Fonte: Autoria própria (2023)

3.4.2 Equipamento

Infelizmente, em função do tempo necessário para desenvolver o algoritmo, não foi possível realizar os testes práticos com um equipamento de tecnologia WAAM. Assim, como uma forma alternativa para mostrar a efetividade do mapeamento das regiões de interesse e as rotas geradas pelo algoritmo, optou-se por realizar os testes em uma impressora 3D de tecnologia FFF do modelo *Ender3* da *Creality*. Com base nessa limitação, o objetivo dos testes é a avaliação

da qualidade de preenchimento das camadas e a comparação com estratégias de preenchimento disponíveis no mercado por meio de planejamento do processo utilizando o *software UltiMaker Cura*. Impressoras cartesianas de três graus de liberdade como a *Ender3* são capazes de reproduzir as trajetórias geradas pelo algoritmo em código G da mesma forma que alguns equipamentos de WAAM como em (RODRIGUES et al., 2021) para camadas planas. Portanto, é possível comparar tempos de produção e áreas preenchidas entre as diferentes técnicas de forma a simular a mesma série de movimentos em uma máquina WAAM. Obviamente, toda a parte térmica e variações das dimensões dos cordões e demais problemas de processo não poderão ser avaliados, ficando para atividades futuras.

A tabela 1 mostra as configurações gerais do equipamento utilizado para os testes do algoritmo em processo de manufatura.

Tabela 1 – Configurações dos testes planejados em impressora FFF

Impressora	Material Utilizado	Altura de camada	Diâmetro do bico extrusor	Largura de trilha	Velocidade de impressão
Ender 3	PLA	0.32 mm	0,6 mm	0,6 ~1,2 mm	50 mm/s

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 2 mostra os experimentos realizados para testar a eficácia do algoritmo em determinar as regiões de interesse para processos WAAM. Cada experimento busca facilitar a visualização dos efeitos dos parâmetros de identificação das regiões, bem como demonstrar a capacidade de automatização da tarefa de identificação das características da geometria quanto ao processo de produção.

Para evitar a repetição de resultados muito parecidos nas análises, cada experimento será discutido focando em dois dos exemplos mais notáveis quanto ao comportamento do algoritmo, seja pelo efeito de diferentes parâmetros no resultado final ou pela expectativa estabelecida anteriormente quanto às características únicas de cada peça. É discutido, no entanto, o resultado final do mapeamento para todas as peças como uma forma de resposta aos objetivos traçados na seção anterior.

Tabela 2 – Experimentos realizados

Exp.	Descrição	Peças analisadas	Parâmetros fixos	Parâmetros alterados
1	Análise da capacidade do algoritmo em encontrar regiões de paredes finas conforme a variação da largura de trilha de deposição	3	-	$n_w = 1.2 \text{ mm}$, $n_w = 2.5 \text{ mm}$ e $n_w = 4 \text{ mm}$
		4		
2	Análise da capacidade do algoritmo de interromper o processo de geração de contornos de acordo com o critério de aceitação de falhas para os vazios de preenchimento	2	$n_w = 0.6$	$p_{err} = inf$, $p_{err} = 30\%$ e $p_{err} = 50\%$
		5	$n_w = 1.2$	
3	Teste dos impactos mediante a variação do número de trilhas máximo para se considerar um estrangulamento geométrico como uma ponte de zigzag ou <i>crossover</i>	1	$n_w = 0.6 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$	$N_{max} = 3$ e $N_{max} = 5$
		4	$n_w = 1 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$	
4	Análise da capacidade do algoritmo para realizar a divisão apropriada das regiões monotônicas	3	$n_w = 1 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 3n_w$	Ângulo de Raster 0° e 90°
		5	$n_w = 1.2 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 3.2n_w$	
5	Análise sobre os resultados finais do algoritmo de mapeamento sobre em todas as peças separadas	1	$n_w = 0.6 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 5n_w$	Ângulo de Raster 0° e 90°
		2	$n_w = 0.6 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 5n_w$	
		3	$n_w = 1 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 3.2n_w$	
		4	$n_w = 1 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 3.2n_w$	
		5	$n_w = 1.2 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 3.2n_w$	
6	Análise das rotas geradas para cada sentido de raster da peça	1	$n_w = 0.6 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 5n_w$	Ângulo de Raster 0° e 90°
		2	$n_w = 0.6 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 5n_w$	
7	Análise dos resultados com as rotas geradas em peças produzidas por FFF em PLA	1	$n_w = 0.6 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 5n_w$	Ângulo de Raster 0° e 90°
		2	$n_w = 0.6 \text{ mm}$ $p_{err} = 0.3n_w$ $N_{max} = 5n_w$	

Fonte: Autoria própria (2023)

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados detalhados das etapas de aplicação do algoritmo proposto. Para todos os experimentos a seguir, foram mantidos os mesmos padrões de cores utilizados na seção da metodologia, ou seja, as áreas em cinza são a versão original da imagem utilizada como entrada do algoritmo, regiões em violeta são áreas de paredes finas, as diferentes tonalidades de verde representam as regiões de contornos, áreas vermelhas são pontes de contorno, áreas em laranja mostram pontes de *crossover*, áreas em roxo são pontes de zig-zague e as tonalidades de azul representam diferentes regiões monotônicas.

4.1 MAPEAMENTO DE REGIÕES

4.1.1 Paredes finas

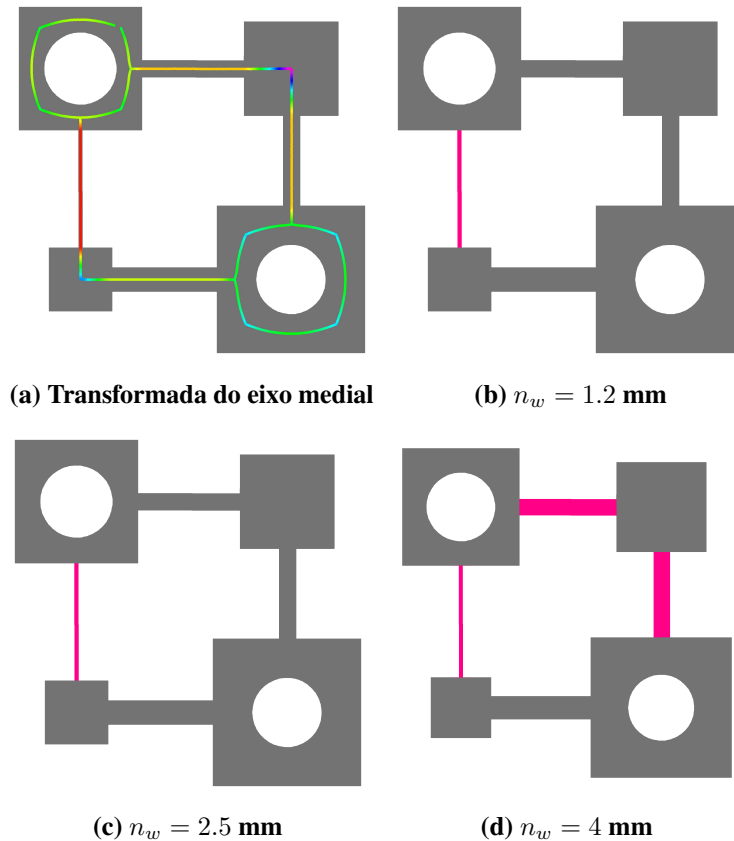
A primeira etapa busca identificar regiões finas, que, conforme definida no capítulo anterior, são regiões de preenchimento com menos de duas larguras de trilha de deposição. As Figuras 62 e 63 mostram os eixos mediais extraídos das camadas das peças 3 e 4, mostrando as diferenças entre quais áreas da imagem são consideradas paredes finas encontradas pelo algoritmo, mediante a variação da largura da trilha de deposição.

É possível observar que o mapeamento de regiões classificadas como paredes finas é dependente da largura da trilha utilizada no processo de produção. Mesmo que o critério não seja alterado entre as camadas, contanto que o múltiplo da largura de trilha seja menor do que duas passagens, todo o trecho é separado como uma forma de permitir ao usuário a determinação de parâmetros específicos desta região

4.1.2 Contornos e conexões

Neste experimento, o parâmetro de aceitação para falhas de preenchimento assume três valores diferentes para possibilitar a visualização de seus efeitos sobre o número de contornos adicionados para cada região de contorno mapeada, demarcado pela variável p_{err} . As Figuras 64 e 65 mostram os resultados para as peças 2 e 5 para critérios de erros entre 30% e 50% da largura da poça de fusão. É possível observar também na figura as conexões entre contornos

Figura 62 – Paredes finas na peça 3: As cores do eixo medial representam as distâncias da transformada naquele ponto e estão em mesma escala de grandeza (cores mais quentes representam menores larguras), onde cores mais quentes representam menores distâncias. As imagens em cinza representam a área original e as áreas em violeta as paredes finas detectadas



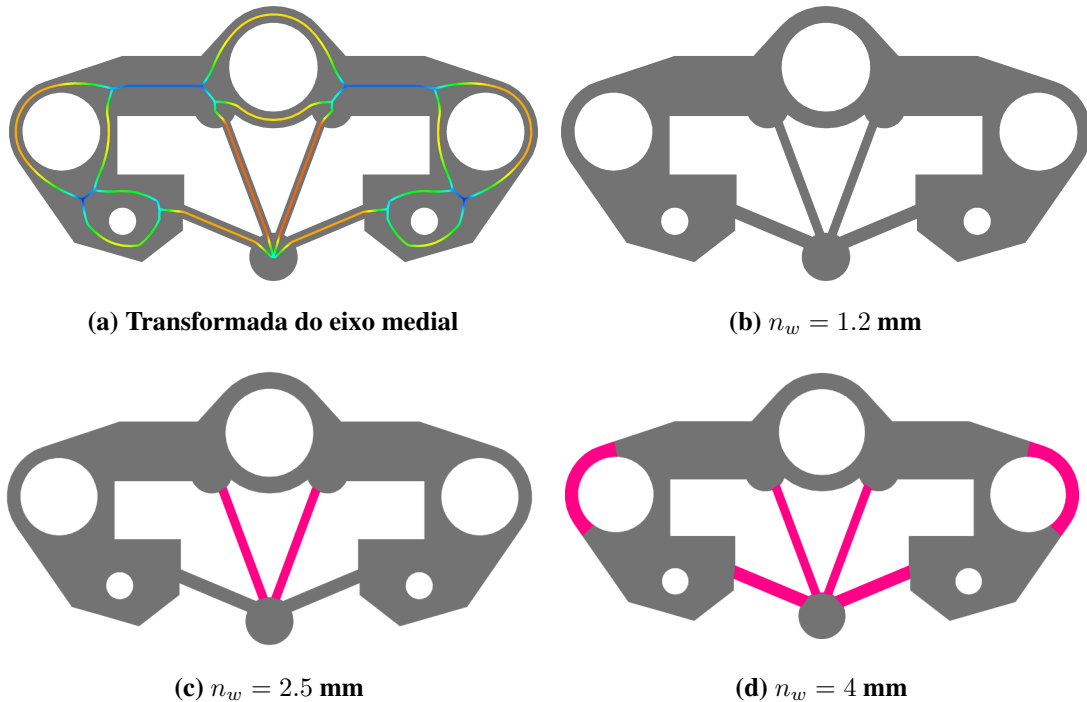
Fonte: Autoria própria (2023)

externos e internos, em cada peça ocupando os menores caminhos entre contornos, sempre na direção do *raster* que seria utilizado nas etapas posteriores.

Diferentes porcentagens da área podem fazer a diferença entre falhas perceptíveis ou não nos experimentos realizados. O número de pontes necessárias também muda de acordo com os grupos de contornos formados. Como materiais diferentes podem apresentar maior ou menor capacidade de cobrir as possíveis falhas de preenchimento, cabe ao usuário encontrar um equilíbrio entre erros aceitáveis para cada situação. Técnicas de realimentação de uma malha de controle também podem ser estudadas para corresponder ao acúmulo de falhas ao longo da construção das camadas.

Um ponto importante a se destacar nesta etapa do algoritmo é que nem sempre a ligação entre contornos externos e internos, ou pontes de contorno, no mesmo sentido do *raster* é a melhor escolha. Um bom exemplo disso é a peça 2 na Figura 64 (j), onde seria possível uma conexão muito mais curta entre os furos mais acima e abaixo do central ao longo da transversal.

Figura 63 – Paredes finas na peça 4: As cores do eixo medial representam as distâncias da transformada naquele ponto e estão em mesma escala de grandeza (cores mais quentes representam menores larguras), onde cores mais quentes representam menores distâncias. As imagens em cinza representam a área original e as áreas em violeta as paredes finas detectadas



Fonte: Autoria própria (2023)

Principalmente pelo fato de que há pontes de ziguezague nestes locais, onde no melhor caso, pontes de *crossover* seriam criadas.

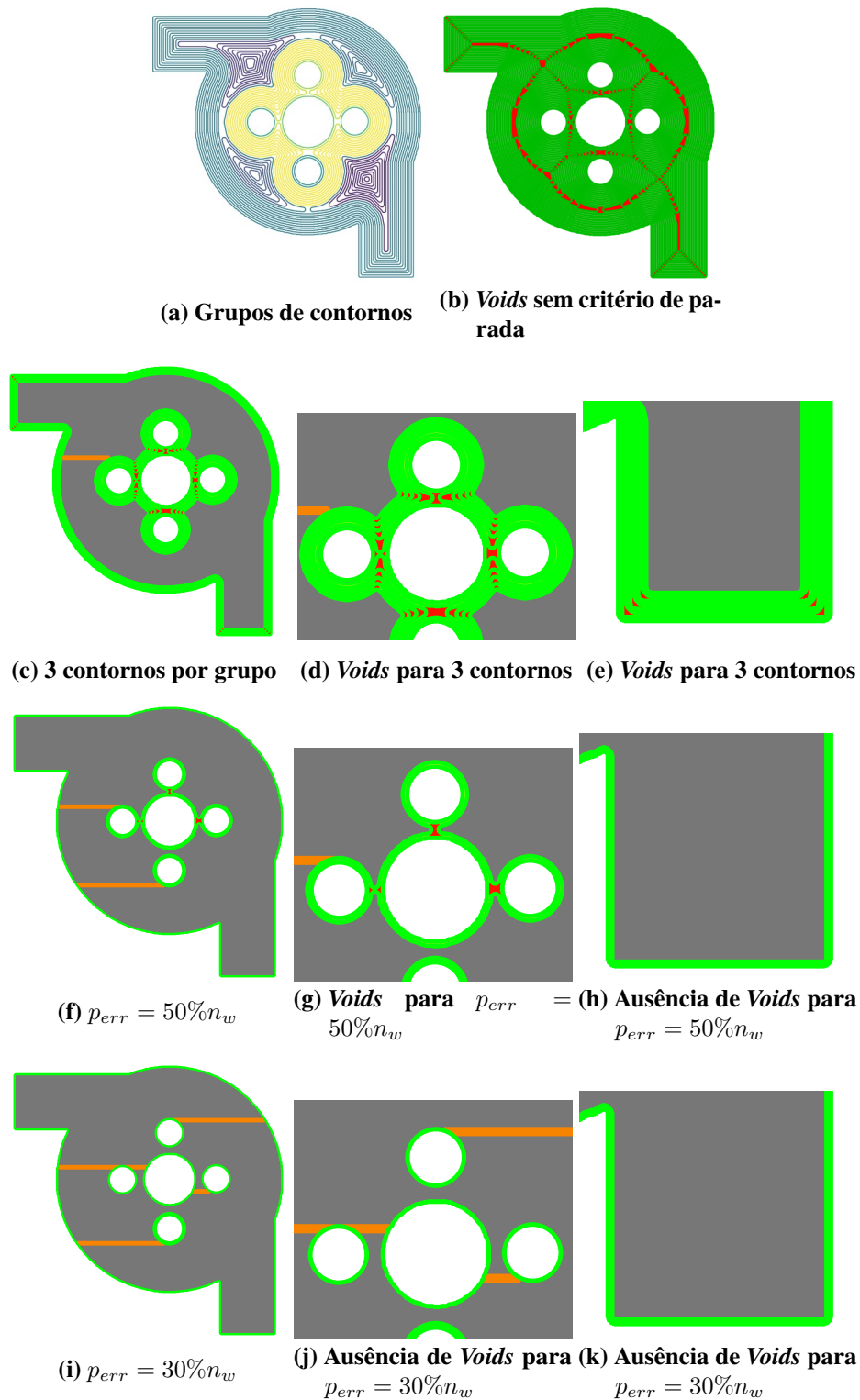
4.1.3 Regiões de estrangulamento

As regiões de estrangulamento, ou gargalos geométricos, como detalhadas na Seção 2.1.2.5 dão origem às pontes de zigue-zague e *crossover*, como discutidas na Seção 3.2.3.1, elas dependem de duas variáveis: o número de trilhas máximo para se considerar como estrangulamento, denotado por N_{max} e a largura da trilha de deposição, cuja representação é n_w .

Os resultados obtidos com os testes com alterações no parâmetro N_{max} podem ser vistos nas Figuras 66 e 67, onde são apresentados os ensaios em duas peças onde este parâmetro resultou em dinâmicas diferentes entre se considerar três ou cinco passagens de rotas como um estrangulamento.

O algoritmo obteve sucesso em detectar estrangulamentos de acordo com a largura máxima determinada e também se mostrou eficaz em determinar o tipo de ponte que estes

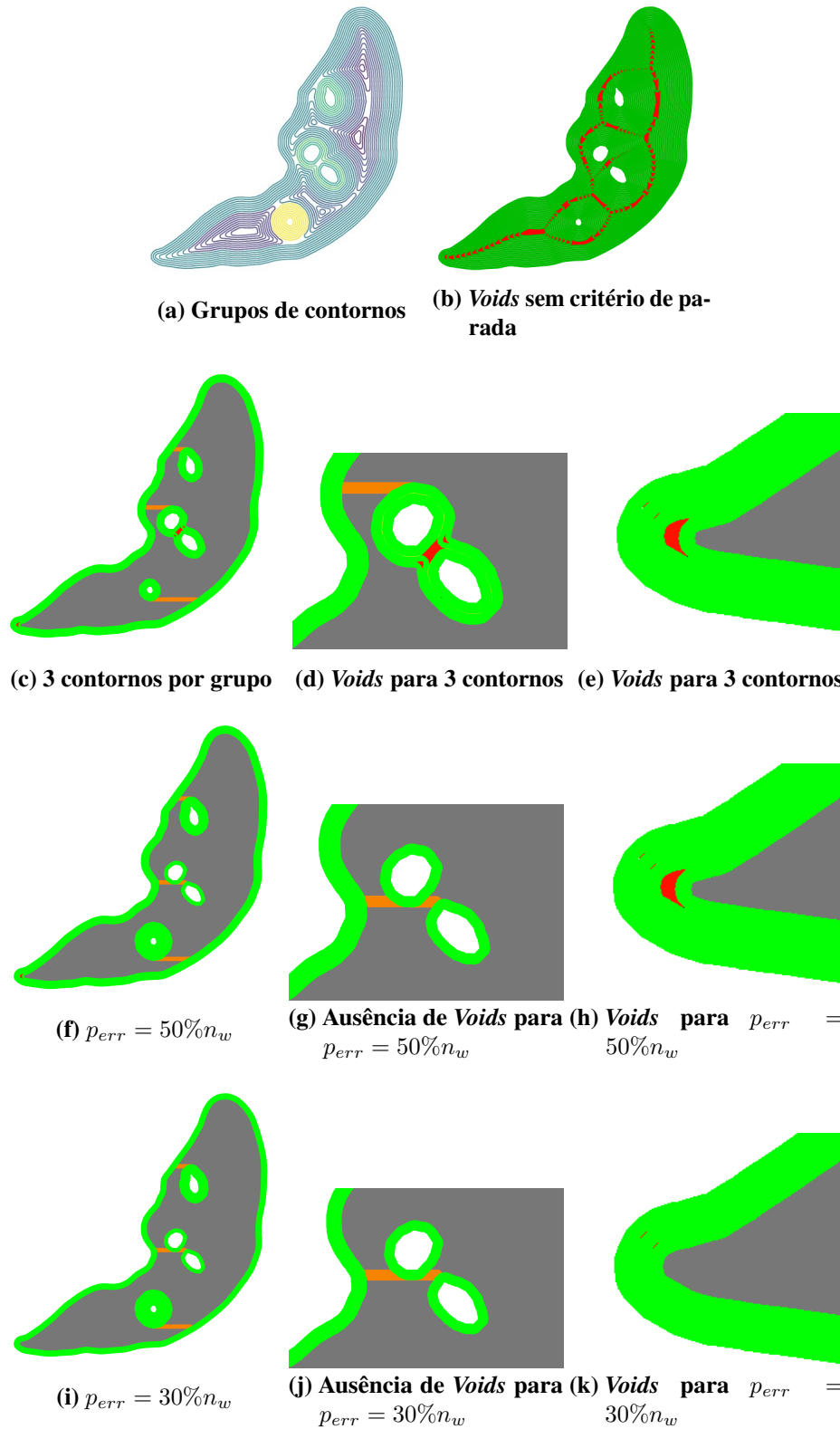
Figura 64 – Contornos e conexões na peça 2: Regiões de contornos são mostradas em verde, pontes de contornos em laranja, falhas de preenchimento em vermelho e regiões internas não tratadas em cinza



Fonte: Autoria própria (2023)

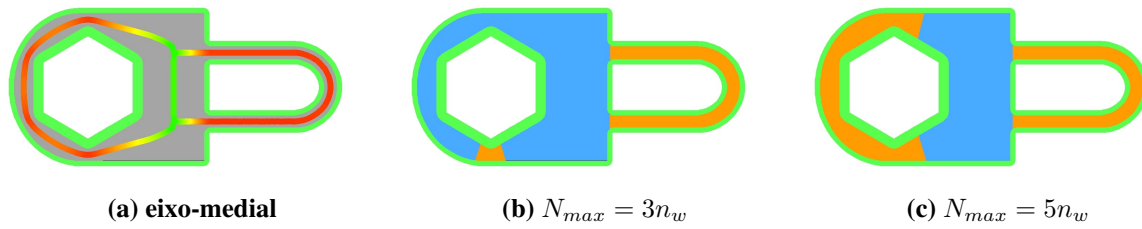
representam, portanto, estratégia e ordem de preenchimento deles. Um problema importante a ser tratado em trabalhos futuros é o fato de que regiões de estrangulamento podem sofrer

Figura 65 – Contornos e conexões na peça 5: Regiões de contornos são mostradas em verde, pontes de contornos em laranja, falhas de preenchimento em vermelho e regiões internas não tratadas em cinza



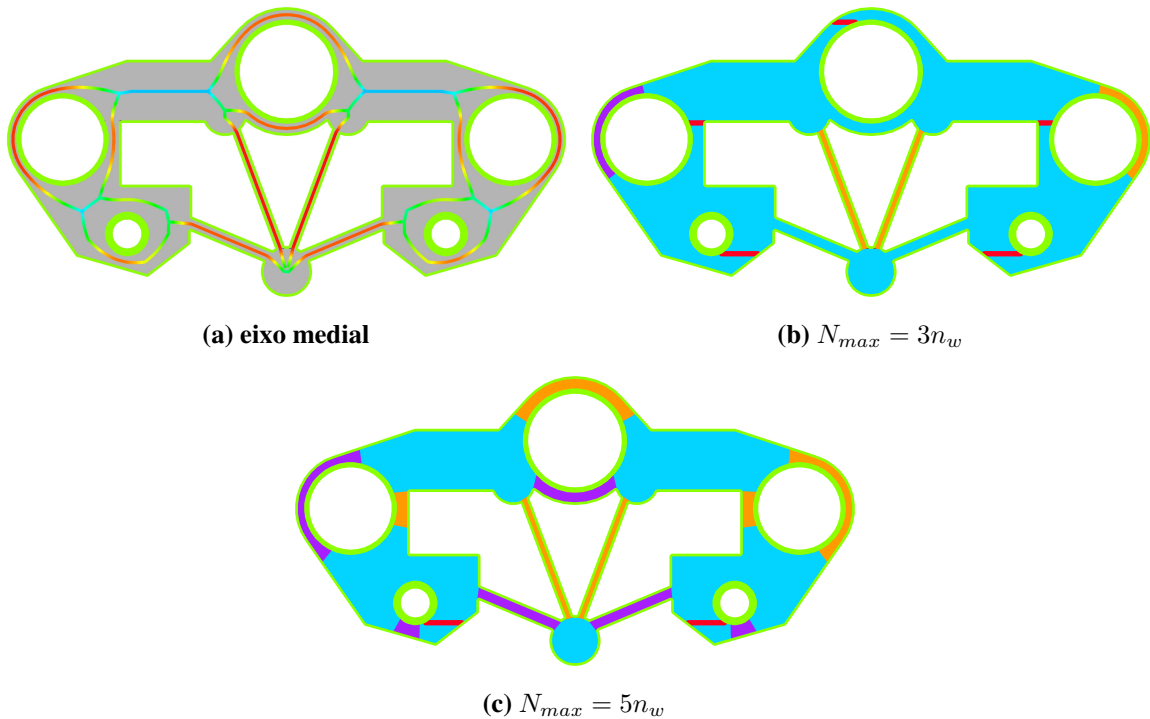
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 66 – Regiões de estrangulamento na peça 1: (a) transformada do eixo medial das regiões em cinza da peça; (b) resultado para o critério de três passagens; e (c) resultado para um critério de cinco passagens. Os contornos em verde foram mantidos como referência da forma original da camada.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 67 – Regiões de estrangulamento na peça 4: (a) transformada do eixo medial das regiões em cinza da peça; (b) resultado para o critério de três passagens; e (c) resultado para um critério de cinco passagens. Os contornos em verde foram mantidos como referência da forma original da camada.



Fonte: Autoria própria (2023)

intersecção ao fim de seus eixos mediais, criando situações onde uma estratégia diferente precisa ser utilizada para garantir conectividade entre elas e o fluxo entre regiões causar o menor número possível de interrupções.

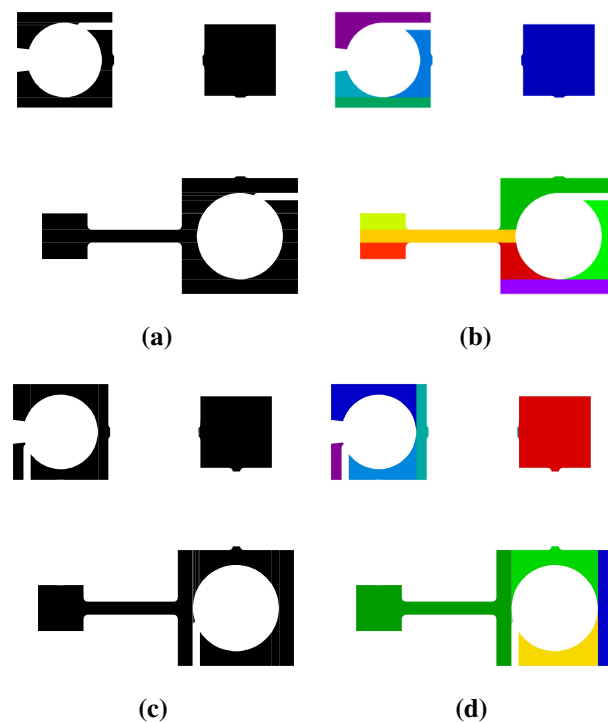
No momento, as pontes de ziguezague e de *crossover* ainda produzem rotas de apenas um sentido possível, o que muitas vezes significa uma interrupção do arco durante a primeira passagem sobre a área. Maiores estudos devem considerar maneiras de possibilitar caminhos dentro das regiões que minimizem as interrupções levando em consideração representações em grafo mais complexas.

4.1.4 Regiões monotônicas

A estratégia de preenchimento sugerida para as áreas internas remanescentes é o caminho de ida-e-volta adaptado do ziguezague proposto por Jin et al. (2017c) (Seção 2.3.3. Como esta é possível dentro de áreas monotônicas, estes espaços precisam ser divididos como regiões próprias dentro do algoritmo

Os resultados para as peças 3 e 4 podem ser observados nas Figuras 68 e 69. As regiões remanescentes das etapas anteriores foram corretamente preenchidas de acordo com a direção de varredura de *raster*. Como pode ser visto na figura, foi possível obter o número de regiões monotônicas mínimo e também houve sucesso em mapear cada camada com uma direção alternada de *raster* como forma de garantir entrelaçamento de camadas para a melhor adesão e distribuição de material depositado.

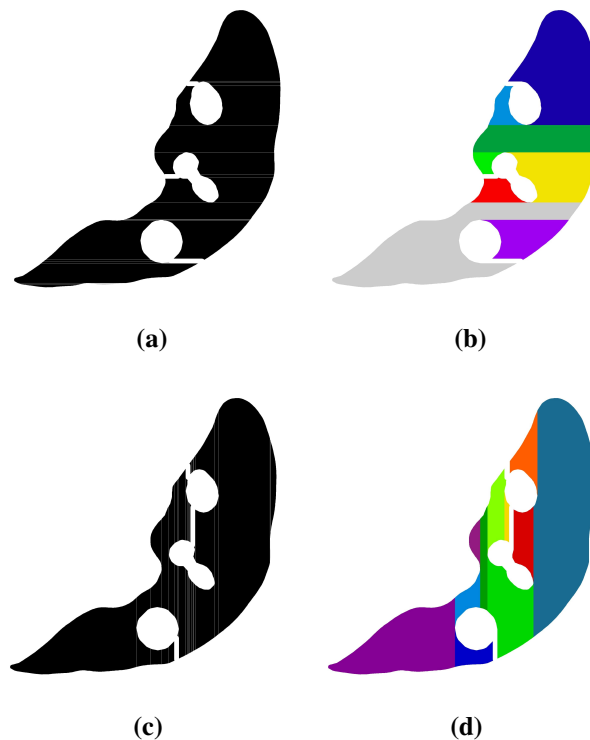
Figura 68 – Regiões monotônicas da peça 3: (a) e (c) são as divisões iniciais das figuras para 0 e 90 graus, enquanto as diferentes cores em (b) e (d) representam as diferentes regiões monotônicas encontradas



Fonte: Autoria própria (2023)

Foi observado durante os experimentos como a divisão, da maneira que está sendo realizada no momento, encontra dificuldades de determinar regiões muito próximas das linhas de corte. Como pode ser visto na Figura 70, quando duas linhas são originadas por limites diferentes e acabam adjacentes, este método de divisão pode gerar uma separação muito grande e produzir

Figura 69 – Regiões monotônicas da peça 5: (a) e (c) são as divisões iniciais das figuras para 0 e 90 graus, enquanto as diferentes cores em (b) e (d) representam as diferentes regiões monotônicas encontradas



Fonte: Autoria própria (2023)

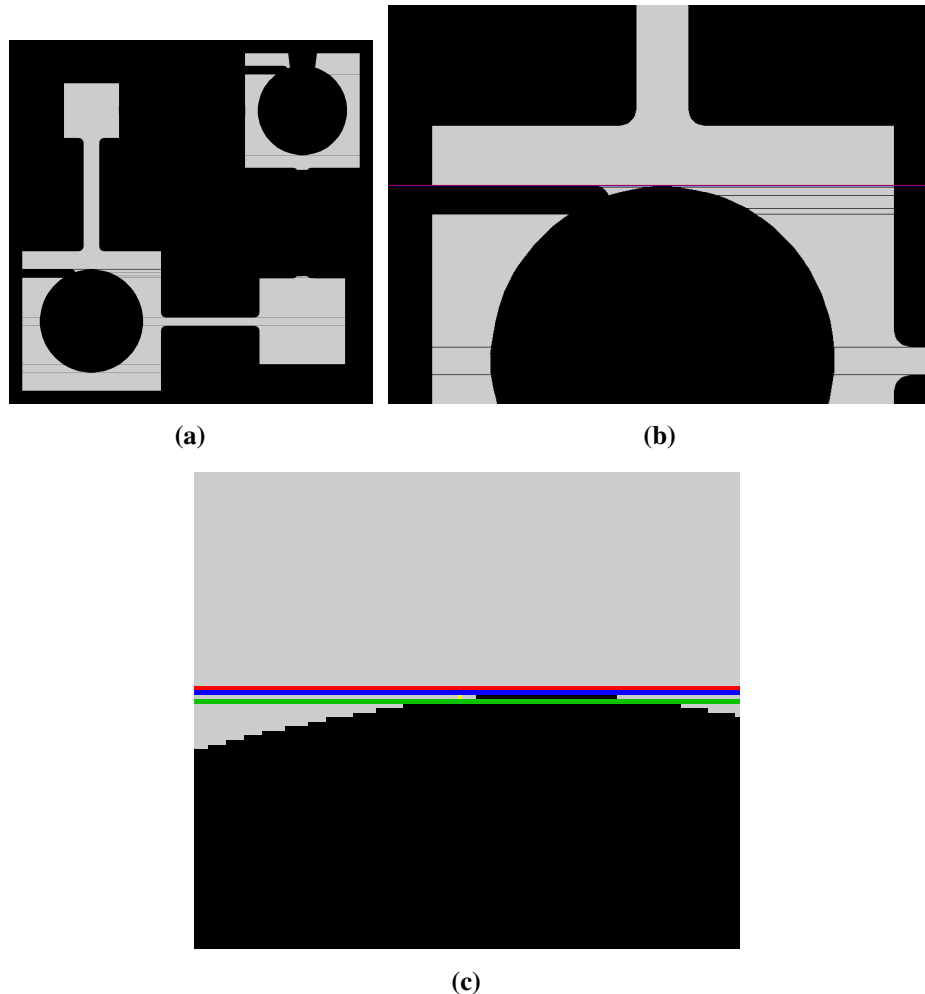
uma fenda onde não existe divisão na figura original. O problema neste exemplo foi originado por um único *pixel* (destacado em amarelo na imagem), que gerou uma linha de divisão muito próxima de outra no limite do contorno do furo.

Outra futura implementação seria a rotação do ângulo do *raster* para possibilitar a otimização dos segmentos, reduzindo o número de regiões necessárias e o número de acelerações e desacelerações. Também é preciso estudar uma forma de controlar o percentual de sobreposição das curvas do ziguezague sobre os contornos já depositados, possibilitando maior fusão entre estas regiões e promovendo melhoria da topologia da superfície de cada camada, atualmente apenas uma distância fixa de largura de $2n_w$ é mantida entre a delimitação das áreas monotônicas e um contorno paralelo gerado para dar a forma onde o ziguezague é criado.

4.1.5 Mapeamento completo

O resultado do mapeamento completo da peça 1 é apresentado na Figura 71, que mostra duas regiões propensas a gerar falhas de deposição devido a pouco espaço para contornos ou ziguezagues. Quando o número de rotas máximo a ser considerado como pescoço foi alterado

Figura 70 – Exemplo de conflito de separação de áreas monotônicas: (a) divisões iniciais da figura com uma linha de repartição dupla; (b) detalhe destacando as linhas divisórias em vermelho e azul; e (c) detalhe do detalhe destacando as mesmas linhas, uma divisão única em verde e o *pixel* vazio que gerou o conflito destacado em amarelo

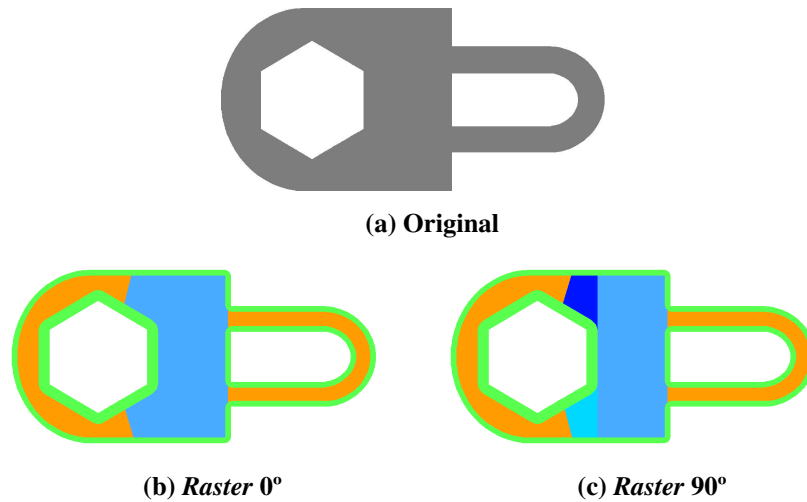


Fonte: Autoria própria (2023)

para cinco larguras de trilha, o algoritmo foi capaz de considerar as regiões críticas de pontes de *crossover* (laranja). Isso significa que pode-se esperar que durante o planejamento de rotas, a ordem de áreas visitadas promoveria o preenchimento das duas áreas em laranja junto aos contornos internos e externo, para então, só depois preencher a área interna (azul). Também é possível observar que a direção do *raster* em 90° dividiu a peça em mais partes.

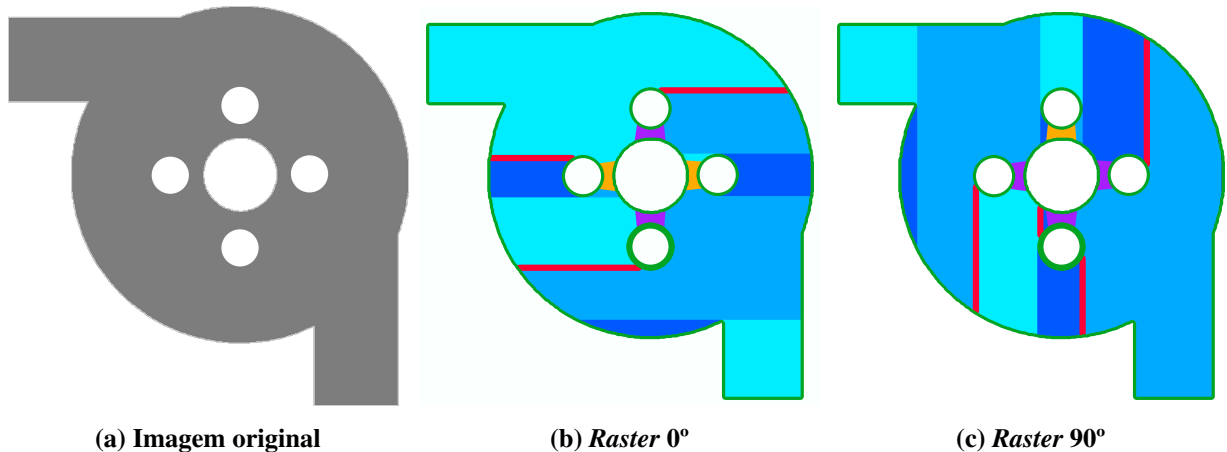
No resultado completo do mapeamento para a peça 2, as áreas entre os furos configuram gargalos geométricos que poderiam gerar falhas no preenchimento por ziguezague (vide as áreas roxas da Figura 72) ou estar no caminho da conexão entre contornos, como pode ser visto nas áreas laranjas (*crossover*) da mesma figura. As pontes de contorno (em vermelho) são relativamente longas dentro da figura, mas estão posicionadas de forma a não dividir áreas monotônicas ao meio, mas se posicionam no limite entre áreas monotônicas.

Figura 71 – Resultado de mapeamento da peça 1: Estudo dos impactos de pontes de *crossover* sobre gargalos geométricos



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 72 – Resultado de mapeamento da peça 2: Estudo sobre as conexões preferenciais entre contornos



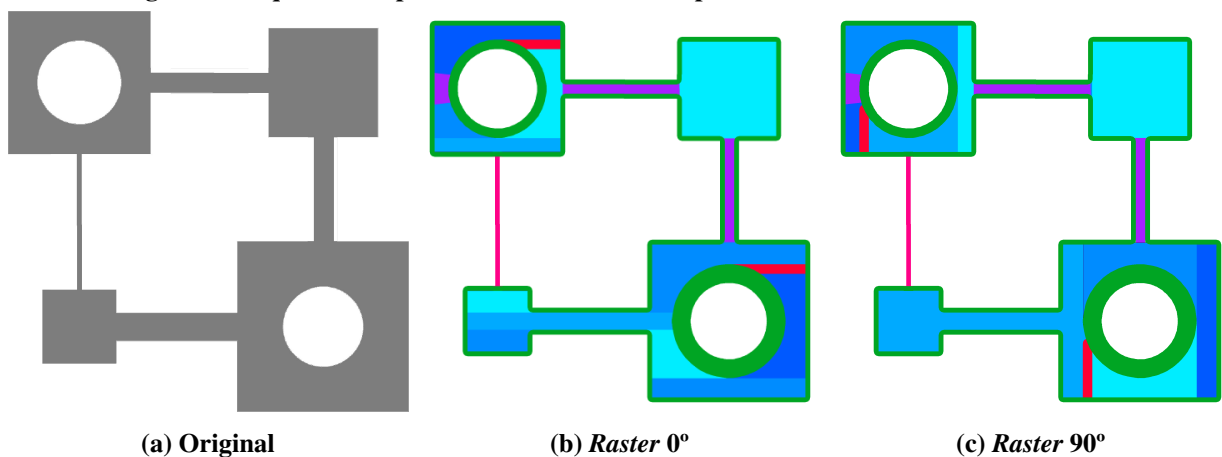
Fonte: Autoria própria (2023)

É possível observar que na camada com ângulo de *raster* de 90° (Figura 72 (c)) uma das pontes de contornos ficou de fora da área de ponte de ziguezague, no entanto muito próxima. Caso as duas áreas se tocassem, esta seria considerada uma ponte de *crossover* e não necessitaria da ponte de contorno. Melhorias no algoritmo poderiam promover a obrigatoriedade de pontes de ziguezague assumirem o papel de *crossover* se ambos os contornos entre a área de estrangulamento tiverem uma ligação entre si.

A terceira peça, quando mapeada, mostra como dimensões diferentes nas mesmas combinações de formas presentes na peça e a manutenção dos mesmos valores de parâmetros para o algoritmo podem gerar resultados diferentes para a segmentação. A Figura 73 mostra a diferença entre os contornos circulares dos furos nos quadrados superior-esquerdo e inferior-

direito, o último tem espaço interno suficiente para que mais rotas paralelas concêntricas sejam depositadas antes de gerar falhas de preenchimento em comparação ao primeiro. Também é possível observar que a conexão mais fina (à esquerda), com menos largura do que a passagem para duas trilhas de deposição de material é corretamente mapeada como uma parede fina. Ao mesmo tempo, a mais larga (abaixo) foi considerada uma área larga demais para ser classificada como ponte de ziguezague enquanto as duas outras estão dentro do limite estabelecido de no máximo três trilhas, mudando a classificação dessas áreas para pontes de ziguezague.

Figura 73 – Resultado de mapeamento da peça 3: Reatividade do algoritmo à variação de medidas da geometria quanto aos parâmetros determinados pelo usuário



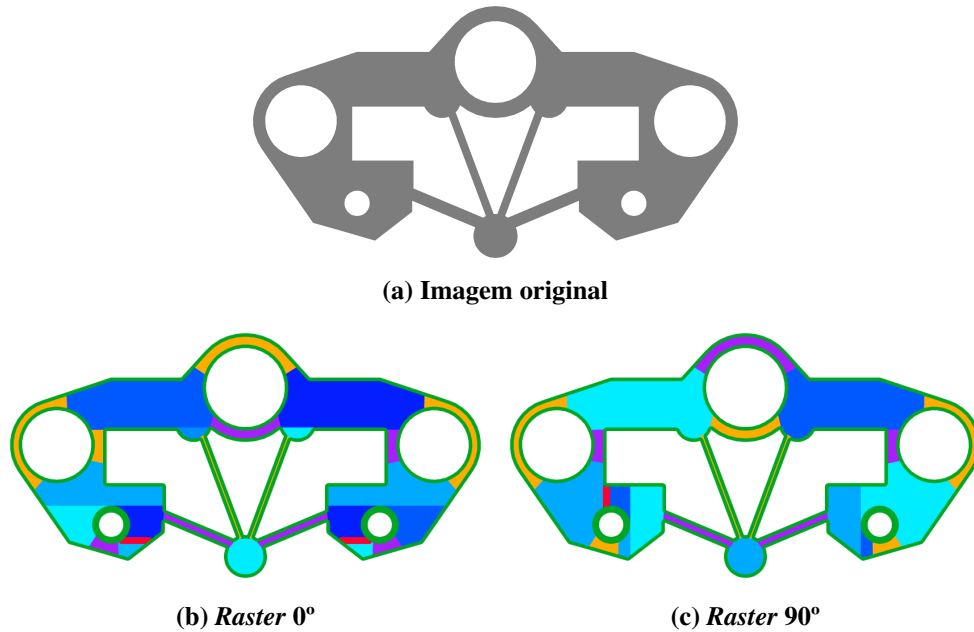
Fonte: Autoria própria (2023)

A geometria complexa da imagem da peça 4 na Figura 74 mostra como, mesmo com grande número de furos internos, o algoritmo é capaz de segmentar a forma e ainda possibilitar a definição dos contornos antes do preenchimento interno por meio da determinação de pontes entre eles. Observe como as pontes de *crossover* promovem a conexão entre os contornos mais externos e os furos internos (verde), estes são ligados sequencialmente, da esquerda para a direita — sempre respeitando a indicação de preencher os gargalos da geometria com rotas oscilatórias adaptadas, seguindo o eixo medial.

É importante também observar que há uma ponte de ziguezague em cada lateral dos resultados porque não há necessidade de mais uma conexão entre as câmaras internas e os furos redondos próximos, uma vez que ambos já são conectados ao contorno externo. A redução de pontes de contornos entre Figura 74 (b) e (c) reforça a necessidade de se dar preferência a pontes de ziguezague já existentes como uma conexão preferencial entre contornos.

O último experimento mostra os resultados do algoritmo para uma forma orgânica. Tal como pode ser visto na Figura 75, foi identificado que no entorno dos furos da forma existem

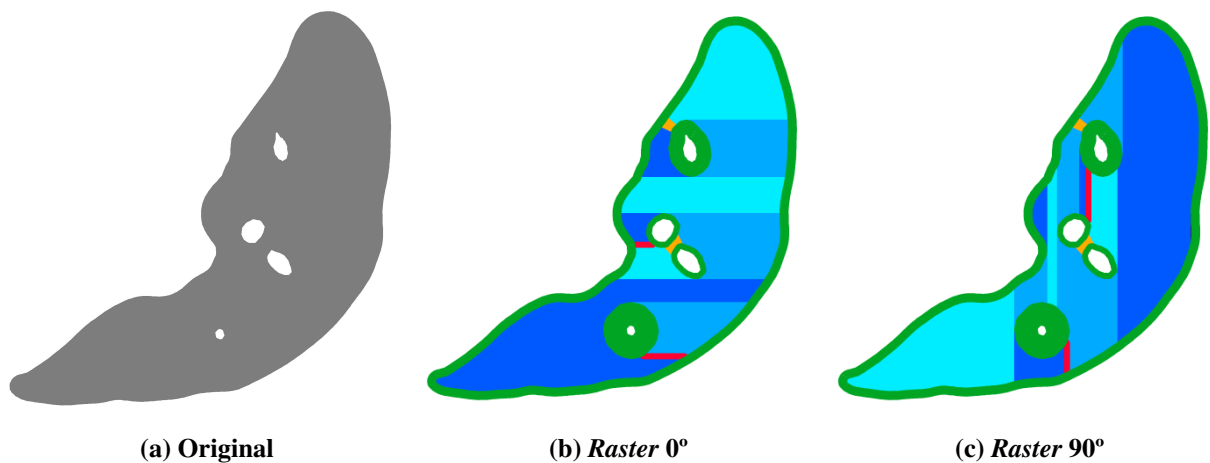
Figura 74 – Resultado de mapeamento da peça 4: Conectividade dos contornos e áreas de estrangulamento em figuras de maior complexidade



Fonte: Autoria própria (2023)

áreas propensas à classificação como estrangulamentos. A irregularidade dos contornos e a presença de várias protuberâncias arredondadas são um desafio para o cálculo da transformada medial para representações poligonais, portanto esta peça representa a adaptabilidade do método baseado em imagens. É possível observar que todas as pontes necessárias para o tratamento de estrangulamentos e para conexão de contornos foram mapeadas com sucesso.

Figura 75 – Resultado de mapeamento da peça 5: Eficácia do método sugerido para formas livres

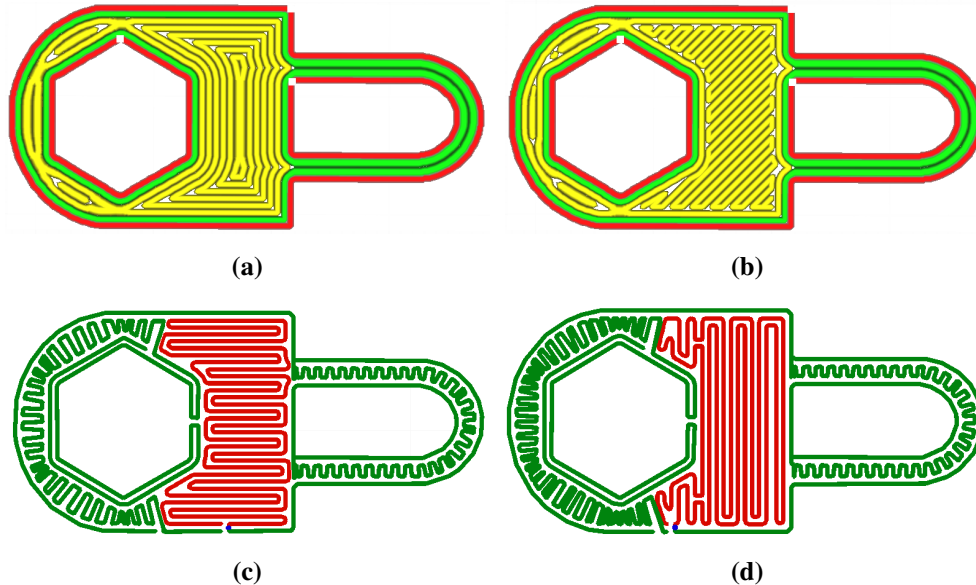


Fonte: Autoria própria (2023)

4.2 PLANEJAMENTO DE ROTAS E FABRICAÇÃO DE PEÇAS

As Figuras 76 e 77 mostram as rotas geradas pela interface do Cura, bem como o código G gerado pela implementação do algoritmo proposto e interpretado pela mesma interface.

Figura 76 – Planejamento das rotas da peça 1: (a) rotas de contornos paralelos do Cura; (b) rotas de ziguezague do Cura; (c) rotas com direção de *raster* de 0° do algoritmo proposto; e (d) rotas com direção de *raster* de 90° do algoritmo proposto. O verde em (c) e (d) representa os contornos e pontes de *crossover* enquanto o vermelho indica o preenchimento interno



Fonte: Autoria própria (2023)

Apesar do interpretador de código G da interface não mostrar a mesma largura das trilhas do que as rotas geradas no próprio fatiador, é possível observar as diferenças fundamentais dos preenchimentos analisados, bem como os possíveis pontos negativos e positivos de cada estratégia. Uma breve análise permite perceber que a estratégia proposta possibilita uma redução das interrupções de deposição, como pode ser observado na Tabela 3. As únicas interrupções das figuras são as pontes de ziguezague e *crossover*.

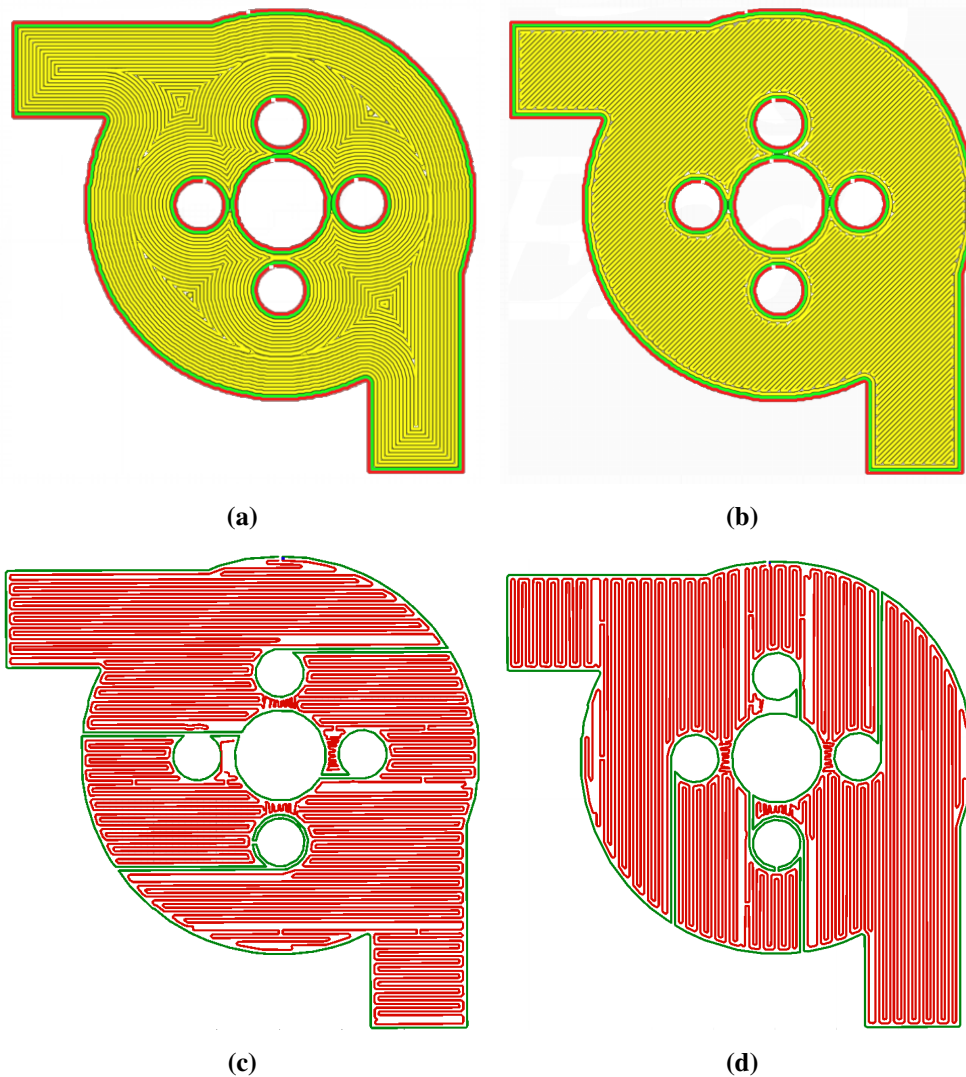
Tabela 3 – Número de interrupções de deposição do material para as peças produzidas

peça	Contornos paralelos (Cura)	Ziguezague (Cura)	Proposto <i>Raster</i> 0°	Proposto <i>Raster</i> 90°
1	17	15	2	2
2	67	22	4	4

Fonte: Autoria própria (2023)

As estratégias de geração de rotas implementadas são apenas sugestões para provar o conceito, pois nosso foco era o mapeamento de regiões. O fato destas ainda não terem sido investigadas a fundo gerou alguns problemas nos experimentos. Algumas das rotas de pontes

Figura 77 – Planejamento das rotas da peça 2: (a) rotas de contornos paralelos do Cura; (b) rotas de ziguezague do Cura; (c) rotas com direção de *raster* de 0° do algoritmo proposto; e (d) rotas com direção de *raster* de 90° do algoritmo proposto. O verde em (c) e (d) representa os contornos e pontes de *crossover* enquanto o vermelho indica o preenchimento interno



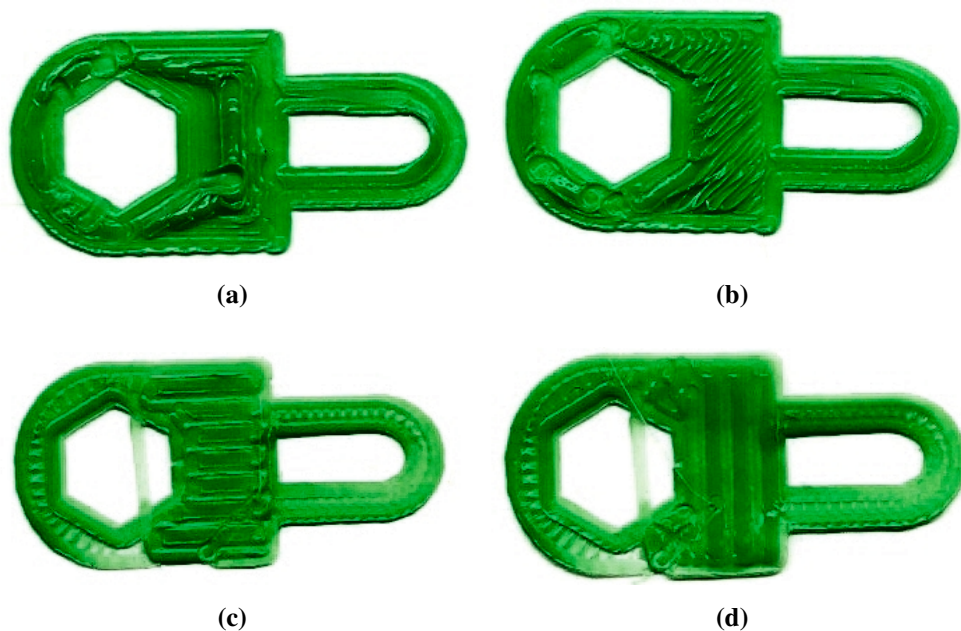
Fonte: Autoria própria (2023)

de ziguezague falharam durante a tradução de imagens para rotas poligonais, isso acontece quando os *pixels* de dois trechos de rota se tornam adjacentes criando um caminho preferível para o algoritmo de Dijkstra ao invés do caminho pretendido. Algumas vezes a geração de rotas de pontes com a estratégia ondulatória implementada produziu rotas com cruzamentos ou desconexões entre os trechos, portanto esta etapa ainda necessita de maior trabalho.

Outra tarefa futura é o desenvolvimento de estratégias capazes de compensar as falhas de preenchimento das regiões monotônicas com rotas de ida-e-volta. Estes problemas surgem quando a divisão da região pela largura de trilha não é exata, deixando espaço entre o *raster* e o contorno pequenos demais para uma nova linha.

As mesmas rotas geradas por cada item das Figuras 76 e 77 foram utilizadas na impressora 3D de tecnologia FFF descrita como na Seção 3.4.2. Os resultados para as diferentes estratégias geradas para as peças 1 e 2 são apresentadas nas Figuras 78 e 79, respectivamente. As imagens foram tratadas para o melhor contraste a fim de possibilitar a melhor análise dos resultados.

Figura 78 – Resultado do processo produtivo peça 1: (a) contornos paralelos do Cura; (b) ziguezague do Cura; (c) direção de *raster* de 0° do algoritmo proposto; e (d) direção de *raster* de 90° do algoritmo proposto

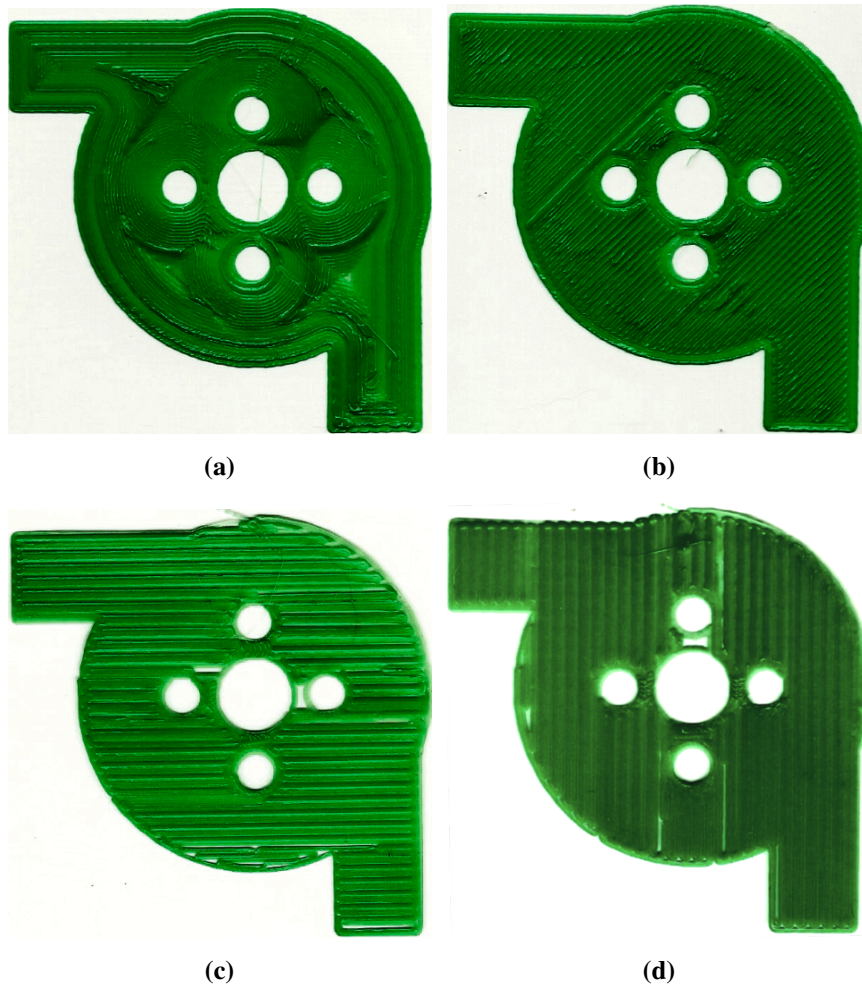


Fonte: Autoria própria (2023)

Os casos de sobre-deposição são perceptíveis em todas as peças, no entanto mais acentuadas nas estratégias do Cura ((a) e (b) das Figuras 78 e 79) originados de uma sobreposição mais acentuada entre as rotas de deposição, bem como a tentativa do algoritmo de buscar compensar as falhas de preenchimento com rotas adicionais desconexas adicionadas após os caminhos de ziguezague e contornos. A sobreposição de trilhas possibilitou ao algoritmo usado no Cura forçar mais contornos paralelos onde nosso algoritmo encontra as áreas de estrangulamento, em alguns casos, como visto nos itens (a) e (b) das Figuras 78 e 79, contornos menores são inseridos em regiões onde a sobreposição não pode ser evitada, como evidenciado nos itens (a) e (b) das Figuras 76 e 77. Nestes casos é possível observar a maior uniformização da distribuição de material nas regiões de *crossover* dos itens (c) e (d) das Figuras 78 e 79 e também em (c) e (d), excluindo-se as falhas de geração de rotas.

As falhas de preenchimento geradas pelos ziguezagues e pontes de ziguezague mos-

Figura 79 – Resultado do processo produtivo peça 2: (a) contornos paralelos do Cura; (b) ziguezague do Cura; (c) direção de *raster* de 0° do algoritmo proposto; e (d) direção de *raster* de 90° do algoritmo proposto



Fonte: Autoria própria (2023)

tradas na figura Figura 77 (c) e (d) podem ser vistas nas imagens da Figura 79 (c) e (d). Existe uma região mais clara na parte inferior da Figura 78 (c) e (d) evidenciando uma sub-deposição do material. No entanto esta se deve ao fato de que não foi implementado no gerador de código G uma medida para compensar a pressão do material fundido dentro do extrusor quando este está em movimento em vazio. O problema ocorre porque parte do material, se não for retraído apropriadamente para uma região mais fria do cabeçote de extrusão, acaba vazando durante o deslocamento. O mesmo problema, conhecido como *oozing* pode ser observado no topo das imagens da Figura 79 (c) e (d), também sendo responsável pela trilha que atravessa o furo interno de Figura 78 (c) e (d).

A Tabela 4 traz os tempos de processo medidos pela impressora durante a realização dos experimentos acima. É possível observar uma redução do tempo de processo em peças mais

complexas com o algoritmo proposto neste trabalho. Esta redução é mais acentuada para a peça que apresenta maior redução também de interrupções da deposição.

Tabela 4 – Tempos de processo para as peças produzidas

peça	Contornos paralelos (Cura)	Ziguezague (Cura)	Proposto <i>Raster</i> 0°	Proposto <i>Raster</i> 90°
1	1m 11s	1m 7s	1m 7s	1m 7s
2	5m 59s	5m 51s	4m 12s	4m 13s

Fonte: Autoria própria (2023)

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma proposta de mapeamento das regiões de interesse para a tecnologia de manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM) através da decomposição das imagens de cada camada do fatiamento. Os detalhes iniciais identificados que apresentam características importantes para o processo foram: regiões de paredes finas, regiões de contornos, áreas com grande massa, e regiões de estrangulamentos internos do preenchimento. A premissa básica para essa identificação partiu do levantamento das possíveis dificuldades de deposição de material em cada região.

Com base nas características levantadas foram utilizadas técnicas de processamento de imagens e geometria computacional que envolveram principalmente segmentação de imagens, transformada do eixo medial, operações morfológicas e componentes conexos. A combinação destas técnicas com teoria de grafos permitiu o reconhecimento das áreas de interesse, possibilitando o mapeamento proposto de forma automática e gerando rotas específicas para cada região mapeada. É importante destacar que no algoritmo proposto, o usuário pode influenciar este mapeamento através de indicação de quais dimensões deveriam ser consideradas como regiões de estrangulamento ou qual percentagem de área, relativa à largura da trilha de deposição, seria aceitável para recuperação em camadas subsequentes.

Como a ideia geral do mapeamento teve como ponto de partida as possíveis dificuldades de deposição de material, a etapa de geração de rotas já tem uma indicação pré-definida de quais estratégias deveriam ser utilizadas. Aplicou-se nessa etapa o pré-requisito de reduzir ou, se possível, eliminar as interrupções do arco de deposição. Houve também a priorização dos contornos da forma antes do preenchimento interno. As estratégias também foram geradas empregando-se técnicas de processamento de imagens como transformações morfológicas de erosão, dilatação e abertura como forma de obter maior controle sobre o preenchimento das regiões mapeadas. Ao mesmo tempo análises de componentes conexos e a teoria de grafos permitiram a conexão destas rotas de forma a promover a redução de discontinuidades na deposição de material.

Ensaio com diferentes geometrias mostraram a robustez dos procedimentos de mapeamento. Os testes de impressão das peças mostraram que o algoritmo é capaz de produzir um código de máquina com resultados tangíveis, incluindo redução do número de interrupções de deposição e também do tempo de processo quando comparado a outras estratégias de preenchi-

mento disponíveis comercialmente. As soluções empregadas para a geração das diferentes rotas apresentaram alguns problemas de falta de preenchimento, especialmente nas conexões entre algumas regiões mapeadas, sendo assim, precisam ser melhor estudadas.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O procedimento apresentado busca uma modularidade das diferentes etapas do algoritmo. Muitas destas decisões foram tomadas de acordo com o conhecimento empírico reunido de diversas conversas com especialistas das áreas envolvidas no trabalho. Graças a isso, profissionais com experiência podem colaborar com conhecimentos específicos para cada problema.

A ausência do equipamento de WAAM durante o desenvolvimento deste algoritmo também pode ter limitado a capacidade da equipe de averiguar a eficácia das medidas propostas para o processo específico de deposição a arco. As observações sobre a qualidade da deposição de material, qualidade da superfície e análises de tensões residuais em ensaios realizados em uma máquina WAAM poderiam auxiliar na averiguação do impacto de cada medida tomada e sinalizar problemas ainda a serem solucionados com esta técnica.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Algumas ideias ainda não foram totalmente exploradas devido ao tempo disponível para pesquisa deste trabalho. Estudos ainda precisam ser feitos para possibilitar a aplicação das técnicas sugeridas para tornar o algoritmo capaz de assumir o planejamento de um processo WAAM por completo.

Estudos podem ser direcionados para as estratégias de preenchimento de cada uma das diferentes regiões de interesse, tanto para o contexto isolado quanto para interações com as rotas de outras regiões em uma mesma camada. Cada região mapeada pode ser estudada independentemente quanto às mais diversas estratégias de preenchimento, portanto estudos de rotas de preenchimento com o foco em cada categoria apresentada podem abrir caminho para trabalhos futuros.

O algoritmo proposto mantém o foco no mapeamento e caracterização das regiões, mas não na eficiência do processo como um todo. Estudos no campo da computação podem trazer benefícios ao tempo de processamento de cada camada dentro deste processo.

REFERÊNCIAS

- BABALIEVSKI, F. Cluster counting: the hoshen–kopelman algorithm versus spanning tree approaches. **International Journal of Modern Physics C**, World Scientific, v. 9, n. 01, p. 43–60, 1998.
- BLUM, Harry. A transformation for extracting new descriptions of shape. **Models for the perception of speech and visual form**, MIT press, p. 362–380, 1967.
- BORGEFORS, Gunilla. Distance transformations in digital images. **Computer vision, graphics, and image processing**, Elsevier, v. 34, n. 3, p. 344–371, 1986.
- BRADSKI, Gary; KAEHLER, Adrian. **Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library**. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2008.
- CHAUSSARD, John; COUPRIE, Michel; TALBOT, Hugues. Robust skeletonization using the discrete λ -medial axis. **Pattern Recognition Letters**, Elsevier, v. 32, n. 9, p. 1384–1394, 2011.
- CHIPANSKI, Matheus Antunes; MINETTO, Rodrigo; VOLPATO, Neri. Uma visão geral sobre estratégias de preenchimento para manufatura aditiva por arco e arame. **11th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering**, Curitiba, PR, 2021.
- CHOSSET, Howie. Coverage of known spaces: The boustrophedon cellular decomposition. **Autonomous Robots**, Springer, v. 9, n. 3, p. 247–253, 2000.
- CORMEN, Thomas H; LEISERSON, Charles E; RIVEST, Ronald L; STEIN, Clifford. Introduction to algorithms second edition. **The Knuth-Morris-Pratt Algorithm**, 2001.
- COSTA, Luciano da Fontoura. Robust skeletonization through exact euclidean distance transform and its application to neuromorphometry. **Real-Time Imaging**, Elsevier, v. 6, n. 6, p. 415–431, 2000.
- DAMON, James. Determining the geometry of boundaries of objects from medial data. **International Journal of Computer Vision**, Springer, v. 63, n. 1, p. 45–64, 2005.
- DANIELSSON, Per-Erik. Euclidean distance mapping. **Computer Graphics and image processing**, Elsevier, v. 14, n. 3, p. 227–248, 1980.
- DASS, Adrita; MORIDI, Atieh. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. **Coatings**, MDPI, v. 9, n. 7, p. 418, 2019.

DIJKSTRA, Edsger W. Note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, p. 269—271, 1959.

DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic; LI, Huijun. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Elsevier, v. 34, p. 8–19, 2015.

DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic; LI, Huijun. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 81, n. 1, p. 465–481, 2015.

DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic; LI, Huijun; LARKIN, Nathan. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 133, p. 942–952, 2016.

DING, Donghong; PAN, Zengxi Stephen; CUIURI, Dominic; LI, Huijun. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. **The international journal of advanced manufacturing technology**, Springer, v. 73, n. 1, p. 173–183, 2014.

DOUGLAS, David H; PEUCKER, Thomas K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. **Cartographica: the international journal for geographic information and geovisualization**, University of Toronto Press, v. 10, n. 2, p. 112–122, 1973.

DUNLAVEY, Michael R. Efficient polygon-filling algorithms for raster displays. **ACM Transactions on Graphics (Tog)**, ACM New York, NY, USA, v. 2, n. 4, p. 264–273, 1983.

EEDE, M Van; MACRINI, Diego; TELEA, Alexandru; SMINCHISESCU, Cristian; DICKINSON, SS. Canonical skeletons for shape matching. In: IEEE. **18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)**. [S.l.], 2006. v. 2, p. 64–69.

EGGERS, Hinnik. Two fast euclidean distance transformations in z2based on sufficient propagation. **Computer Vision and Image Understanding**, Elsevier, v. 69, n. 1, p. 106–116, 1998.

FAROUKI, RT; KOENIG, T; TARABANIS, KA; KOREIN, JU; BATCHELDER, JS. Path planning with offset curves for layered fabrication processes. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier, v. 14, n. 5, p. 355–368, 1995.

FRANCO, P. Preparata and michael ian shamos. **Computational Geometry An Introduction**, Springer-Verlag, New York, 1985.

GIESEN, Joachim; MIKLOS, Balint; PAULY, Mark. The medial axis of the union of inner voronoi balls in the plane. **Computational Geometry**, Elsevier, v. 45, n. 9, p. 515–523, 2012.

GONZALEZ, Rafael C; WOODS, Richard C. **Processamento digital de imagens** . [S.l.]: Pearson Educación, 2009.

JAYANT, Arvind; DHILLON, MS. Use of analytic hierarchy process (ahp) to select welding process in high pressure vessel manufacturing environment. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 10, n. 8, p. 586–595, 2015.

JIN, GQ; LI, Weidong D; GAO, L. An adaptive process planning approach of rapid prototyping and manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 23–38, 2013.

JIN, Yuan; DU, Jianke; MA, Zhiyong; LIU, Anbang; HE, Yong. An optimization approach for path planning of high-quality and uniform additive manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 92, n. 1, p. 651–662, 2017.

JIN, Yuan; HE, Yong; DU, Jianke. A novel path planning methodology for extrusion-based additive manufacturing of thin-walled parts. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Taylor & Francis, v. 30, n. 12, p. 1301–1315, 2017.

JIN, Yuan; HE, Yong; FU, Guoqiang; ZHANG, Aibing; DU, Jianke. A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Elsevier, v. 48, p. 132–144, 2017.

JIN, Yu-an; HE, Yong; FU, Jian-zhong; GAN, Wen-feng; LIN, Zhi-wei. Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology. **Additive manufacturing**, Elsevier, v. 1, p. 32–47, 2014.

KAPIL, Sajan; JOSHI, Prathamesh; YAGANI, Hari Vithasth; RANA, Dharendra; KULKARNI, Pravin Milind; KUMAR, Ranjeet; KARUNAKARAN, KP. Optimal space filling for additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Group Publishing Limited, 2016.

LEE, Der-Tsai. Medial axis transformation of a planar shape. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, IEEE, n. 4, p. 363–369, 1982.

LIU, Ning; REN, K; ZHANG, W; ZHANG, YF; CHEW, YX; BI, GJ; FUH, JYH. An evolutionary algorithm for automatic 2d layer segmentation in laser-aided additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 47, p. 102342, 2021.

LU, Jun; HE, Huiying; SHI, Yumin; BAI, Lianfa; ZHAO, Zhuang; HAN, Jing. Quantitative prediction for weld reinforcement in arc welding additive manufacturing based on molten pool image and deep residual network. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 41, p. 101980, 2021.

MA, Guocai; ZHAO, Gang; LI, Zhihao; XIAO, Wenlei. A path planning method for robotic wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures with varying thickness. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2019. v. 470, n. 1, p. 012018.

MAO, Huachao. Minimizing printing time and volumetric error by gpu-accelerated adaptive slicing. **Manufacturing Letters**, Elsevier, v. 29, p. 19–23, 2021.

MARTINA, Filomeno; MEHNEN, Jorn; WILLIAMS, Stewart W; COLEGROVE, Paul; WANG, Frank. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of ti–6al–4v. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 212, n. 6, p. 1377–1386, 2012.

MICHEL, Florent; LOCKETT, Helen; DING, Jialuo; MARTINA, Filomeno; MARINELLI, Gianrocco; WILLIAMS, Stewart. A modular path planning solution for wire+ arc additive manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Elsevier, v. 60, p. 1–11, 2019.

MINETTO, Rodrigo; VOLPATO, Neri; STOLFI, Jorge; GREGORI, Rodrigo M.M.H.; DA SILVA, Murilo V.G. An optimal algorithm for 3d triangle mesh slicing. **Computer-Aided Design**, v. 92, p. 1–10, 2017. ISSN 0010-4485. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448517301215>.

MONTERO, Andrés Solís; LANG, Jochen. Skeleton pruning by contour approximation and the integer medial axis transform. **Computers & Graphics**, Elsevier, v. 36, n. 5, p. 477–487, 2012.

NGUYEN, Lam; BUHL, Johannes; BAMBACH, Markus. Continuous eulerian tool path strategies for wire-arc additive manufacturing of rib-web structures with machine-learning-based adaptive void filling. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 35, p. 101265, 2020.

NHANGUMBE, M; GOUVEIA, João; SOUSA, Ercília; BELBUT, M; MATEUS, A. Geometric study of surface finishing of selective laser melting moulds. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 12, p. 174–182, 2017.

OPENCV. **OpenCV: Hit-or-Miss** — [docs.opencv.org](https://docs.opencv.org/4.x/db/d06/tutorial_hitOrMiss.html). 2023. https://docs.opencv.org/4.x/db/d06/tutorial_hitOrMiss.html. [Acessado em 05 de Janeiro de 2023].

QUADROS, WR; RAMASWAMI, K; PRINZ, FB; GURUMOORTHY, B. Laytracks: a new approach to automated geometry adaptive quadrilateral mesh generation using medial axis

transform. **International journal for numerical methods in engineering**, Wiley Online Library, v. 61, n. 2, p. 209–237, 2004.

RAJAN, VT; SRINIVASAN, Vijay; TARABANIS, Konstantinos A. The optimal zigzag direction for filling a two-dimensional region. **Rapid Prototyping Journal**, MCB UP Ltd, 2001.

REN, Fei; SUN, Yuwen; GUO, Dongming. Combined reparameterization-based spiral toolpath generation for five-axis sculptured surface machining. **The international journal of advanced manufacturing technology**, Springer, v. 40, n. 7, p. 760–768, 2009.

REN, Lan; SPARKS, Todd; RUAN, Jianzhong; LIOU, Frank. Integrated process planning for a multi-axis hybrid manufacturing system. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 132, n. 2, 2010.

RODRIGUES, Mateus Barros. **Single source shortest paths in simple polygons**. 2019. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2019.

RODRIGUES, Tiago A; DUARTE, Valdemar R; MIRANDA, RM; SANTOS, Telmo G; OLIVEIRA, JP. Ultracold-wire and arc additive manufacturing (uc-waam). **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 296, p. 117196, 2021.

SEBASTIAN, Thomas B; KIMIA, Benjamin B. Curves vs. skeletons in object recognition. **Signal processing**, Elsevier, v. 85, n. 2, p. 247–263, 2005.

SETHIAN, James Albert. **Level set methods and fast marching methods: evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science**. [S.l.]: Cambridge university press, 1999. v. 3.

SILVERSMITH, Nico Kemnitz Willian. **connected-components-3d**. 2023. <https://github.com/seung-lab/connected-components-3d>. [Online; accessed 2023-01-31].

SINTUNATA, Vicky; AOKI, Terumasa. Grey-scale skeletonization using delaunay triangulation. In: IEEE. **2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)**. [S.l.], 2017. p. 57–58.

SUN, Li; REN, Xiaobo; HE, Jianying; ZHANG, Zhiliang. Numerical investigation of a novel pattern for reducing residual stress in metal additive manufacturing. **Journal of Materials Science & Technology**, Elsevier, v. 67, p. 11–22, 2021.

SURESH, Krishnan. Automating the cad/cae dimensional reduction process. In: **Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications**. [S.l.: s.n.], 2003. p. 76–85.

SUZUKI, Satoshi et al. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. **Computer vision, graphics, and image processing**, Elsevier, v. 30, n. 1, p. 32–46, 1985.

TORELLI, Julio Cesar. **Implementação paralela da transformada de distância euclidiana exata**. 2005. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. [S.l.]: Editora Blucher, 2017.

VOLPATO, N; NAKASHIMA, R; GALVAO, L; BARBOZA, A; BENEVIDES, P; NUNES, L. Reducing repositioning distances in fused deposition-based processes using optimization algorithms. In: **High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 417.

WAH, Pang King; MURTY, Katta G; JONEJA, Ajay; CHIU, Leung Chi. Tool path optimization in layered manufacturing. **Iie Transactions**, Taylor & Francis, v. 34, n. 4, p. 335–347, 2002.

WANG, Yiming; ZHANG, Chenrui; LU, Jun; BAI, Lianfa; ZHAO, Zhuang; HAN, Jing. Weld reinforcement analysis based on long-term prediction of molten pool image in additive manufacturing. **IEEE Access**, IEEE, v. 8, p. 69908–69918, 2020.

WATANABE, Ikumu; SUN, Zhengzhong; KITANO, Houichi; GOTO, Kenta. Multiscale analysis of mechanical behavior of multilayer steel structures fabricated by wire and arc additive manufacturing. **Science and Technology of Advanced Materials**, Taylor & Francis, v. 21, n. 1, p. 461–470, 2020.

WIKIPEDIA. **Wikipedia - Ramer–Douglas–Peucker algorithm**. 2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Ramer%E2%80%93Douglas%E2%80%93Peucker_algorithm. [Acessado em 15 de Fevereiro de 2023].

WONG, Hay. Bitmap generation from computer-aided design for potential layer-quality evaluation in electron beam additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Publishing Limited, 2020.

XIA, Hao; TUCKER, Paul G. Distance solutions for medial axis transform. In: **Proceedings of the 18th International Meshing Roundtable**. [S.l.]: Springer, 2009. p. 247–265.

YAO, Bing; IMANI, Farhad; YANG, Hui. Markov decision process for image-guided additive manufacturing. **IEEE Robotics and Automation Letters**, IEEE, v. 3, n. 4, p. 2792–2798, 2018.

YE, Hang; ZHOU, Chi; XU, Wenyao. Image-based slicing and tool path planning for hybrid stereolithography additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 139, n. 7, 2017.

ZENG, Jingting; LAKAEMPER, Rolf; YANG, Xingwei; LI, Xin. 2d shape decomposition based on combined skeleton-boundary features. In: SPRINGER. **International Symposium on Visual Computing**. [S.l.], 2008. p. 682–691.

ZHAI, Xiaoya; CHEN, Falai. Path planning of a type of porous structures for additive manufacturing. **Computer-Aided Design**, Elsevier, v. 115, p. 218–230, 2019.

ZHANG, Chi; SHEN, Chen; HUA, Xueming; LI, Fang; ZHANG, Yuelong; ZHU, Yanyan. Influence of wire-arc additive manufacturing path planning strategy on the residual stress status in one single buildup layer. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 111, n. 3, p. 797–806, 2020.

ZHANG, Li; DING, Linshan; ULLAH, Saif; HU, Tao; XU, Yangyang; CHEN, Li; HANIF, Muhammad. An improved medial axis path generation algorithm for selective laser melting. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Publishing Limited, 2020.

ZHANG, Paul. **SGP 2020: Medial Axis Isoperimetric Profiles**. 2020. Disponível em: <https://youtu.be/ynTFKEjiNcA>.

ZHANG, Paul; DEFORD, Daryl; SOLOMON, Justin. Medial axis isoperimetric profiles. In: WILEY ONLINE LIBRARY. **Computer Graphics Forum**. [S.l.], 2020. v. 39, n. 5, p. 1–13.

ZHAO, Haisen; GU, Fanglin; HUANG, Qi-Xing; GARCIA, Jorge; CHEN, Yong; TU, Changhe; BENES, Bedrich; ZHANG, Hao; COHEN-OR, Daniel; CHEN, Baoquan. Connected fermat spirals for layered fabrication. **ACM Transactions on Graphics (TOG)**, ACM New York, NY, USA, v. 35, n. 4, p. 1–10, 2016.

ZHAO, Jing; YANG, Yiran; LI, Lin. Efficiency-aware process planning for mask image projection stereolithography: Leveraging dynamic time of exposure. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 36, p. 101407, 2020.

ZHOU, Chi; XU, Han; CHEN, Yong. Spatiotemporal projection-based additive manufacturing: A data-driven image planning method for subpixel shifting in a split second. **Advanced Intelligent Systems**, Wiley Online Library, v. 3, n. 12, p. 2100079, 2021.