

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDERSON TADAYUKI SAIKAWA

**CÁLCULO DE REGIÕES DE ESTRUTURAS DE SUPORTE
PARA MANUFATURA ADITIVA COM USO DE IMAGENS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2021

ANDERSON TADAYUKI SAIKAWA

**CÁLCULO DE REGIÕES DE ESTRUTURAS DE SUPORTE
PARA MANUFATURA ADITIVA COM USO DE IMAGENS**

**Computation of support structure regions for additive
manufacturing using images**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Computação Aplicada, do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Dutra da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Minetto

CURITIBA

2021



[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



ANDERSON TADAYUKI SAIKAWA

CÁLCULO DE REGIÕES DE ESTRUTURAS DE SUPORTE PARA MANUFATURA ADITIVA COM USO DE IMAGENS

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

Data de aprovação: 07 de Dezembro de 2021

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

Prof Bogdan Tomoyuki Nassu, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Elisa De Cassia Silva Rodrigues, Doutorado - Universidade Federal de Itajubá - Unifei (Unifei)

Prof Rodrigo Minetto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 07/12/2021.

RESUMO

Uma das principais etapas do planejamento do processo da manufatura aditiva é a computação de estruturas de suporte. As abordagens para realizar esta etapa comumente usam informações de malhas de triângulos do modelo 3D ou informações de polígonos obtidos após o fatiamento do modelo. As abordagens baseadas em polígonos realizam operações como dilatação e subtração de polígonos considerando ângulos de autossuporte, formados entre fatias adjacentes, que direcionam a necessidade de suporte em uma região. Estas mesmas operações possuem implementações muito simples e robustas quando os dados manipulados são representados como imagens ao invés de polígonos. No entanto, devido à necessidade de discretização dos dados poligonais para imagens, pode haver imprecisões nos cálculos de ângulos para definir a necessidade de suporte. Um estudo é apresentado mostrando que o aumento da resolução das imagens é capaz de corrigir essas imprecisões, porém, resoluções muito altas podem ser necessárias e tornar impraticável o uso de imagens, por limitações de memória ou capacidade de processamento. A solução proposta integra a informação sobre os ângulos na malha triangular de um modelo com a conversão dos polígonos das fatias em imagens. Desta forma, é possível resolver problemas relacionados com ângulos e determinar de forma precisa as regiões onde devem ser geradas estruturas de suporte. Nos resultados experimentais, a saída do algoritmo proposto é comparada com a saída esperada para alguns modelos, mostrando que os suportes são computados corretamente. Também, são analisadas algumas melhorias no suporte, como a geração de estruturas em forma de colunas, que podem ser facilmente obtidas ao realizar operações sobre imagens.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Estruturas de suporte. Suporte baseado em imagens. Planejamento do processo.

ABSTRACT

One of the main steps in the process planning of additive manufacturing is the computation of support structures. Approaches to perform this step commonly use information from triangle meshes of a 3D model or polygon information obtained after slicing the model. Polygon-based approaches perform operations such as polygon dilation and subtraction considering self-support angles, formed between adjacent slices, that drive the need for support in a region. These same operations have very simple and robust implementations when the manipulated data is represented as images instead of polygons. However, due to the need for discretization of polygonal data to images, there may be inaccuracies in angle calculations that define the need for support. A study is presented showing that by increasing the resolution of images it is possible to correct these inaccuracies, however, very high resolutions may be needed and make the use of images unfeasible, due to memory or processing demands. The proposed solution integrates the information about the angles in the triangular mesh of a model with the conversion of the slice polygons into images. In this way, it is possible to solve problems related to angles and precisely determine the regions where support structures should be generated. In the experimental results, the output of the proposed algorithm is compared with the expected output for some models, showing that the supports are correctly computed. Also, some improvements in the support are analyzed, such as the generation of structures in the form of columns, which can be easily obtained when performing operations on images.

Keywords: Additive manufacturing. Support structures. Image-based support. Process planning.

LISTA DE ALGORITMOS

1	SUPORTE-POR-IMAGENS-PARA-IMPRESSÃO-3D (F, t, α_c, dpi)	30
2	SUPORTE-POR-IMAGENS-PARA-IMPRESSÃO-3D (F, C, t, α_c, dpi)	44

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas do processo da manufatura aditiva.	10
Figura 2 – Ilustração de um objeto produzido com suporte.	12
Figura 3 – Ilustração de um modelo 3D representado em malhas triangulares em (a) e os contornos resultantes do fatiamento em (b).	13
Figura 4 – Etapas de processamento do modelo até a produção da manufatura, segundo a abordagem proposta.	24
Figura 5 – Ilustração de um modelo 3D fatiado por 3 planos horizontais em (a), produzindo 3 conjuntos de polígonos em (b). Em (c) são mostradas as orientações dos polígonos.	25
Figura 6 – Ilustração do processo de fatiamento de um modelo 3D (a) produzindo um conjunto de imagens (b).	25
Figura 7 – Efeito degrau de escada.	27
Figura 8 – Ilustração dos elementos utilizados para calcular a largura máxima de autossuporte w_{max}	28
Figura 9 – Triângulo retângulo com a identificação de seus elementos.	28
Figura 10 – Representação das regiões autossuportadas ($w < w_{max}$) e das regiões de suporte, em azul, apenas nas porções em que $w \geq w_{max}$	29
Figura 11 – Subtração de duas imagens de fatias adjacentes para identificação de regiões potenciais para construção de suporte.	31
Figura 12 – Operações sobre a região de sombra para a obtenção do suporte.	32
Figura 13 – Processo de expansão para a remoção da região de autossuporte.	33
Figura 14 – Modelo contendo uma face inclinada com ângulos de 45° e $45,5^\circ$	35
Figura 15 – Modelo contendo uma face inclinada com ângulos de 43° a 47°	35
Figura 16 – Larguras dos degraus para $\alpha_c = 45^\circ$ e 300 DPI em uma escala contínua.	36
Figura 17 – Larguras dos degraus em <i>pixels</i> para 300 DPI.	37
Figura 18 – Larguras dos degraus para 300 DPI em uma escala contínua.	37
Figura 19 – Suportes gerados em região autossuportada no modelo da Figura 14.	39
Figura 20 – Suportes gerados em região autossuportada no modelo da Figura 15.	40
Figura 21 – Detalhamento da inclusão do ângulo no processo de fatiamento.	42
Figura 22 – Computação de regiões de suportes com ângulos.	45
Figura 23 – Modelos com geometria conhecida usados nos experimentos.	46
Figura 24 – Geração das regiões de suporte para modelos bem definidos.	47
Figura 25 – Identificação das regiões de suporte de uma fatia de um modelo orgânico.	48
Figura 26 – Conferência das regiões de suporte de acordo com os ângulos dos segmentos.	48
Figura 27 – Geração de suporte no modelo da cabeça do osso fêmur.	49
Figura 28 – Aplicação de máscara nas regiões de suporte.	50
Figura 29 – Melhorias implementadas para a região de suporte.	51
Figura 30 – Melhorias implementadas para a região de suporte.	51
Figura 31 – Modelo de um dragão.	52
Figura 32 – Modelo de um portal japonês.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentual da quantidade de suporte produzido incorretamente de acordo com a Figura 19.	40
Tabela 2 – Percentual da quantidade de suporte produzido incorretamente de acordo com a Figura 20.	41

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

2D	bidimensional
3D	tridimensional
DPI	Pontos Por Polegada, do inglês <i>Dots Per Inch</i>
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição, do inglês <i>Fused Deposition Modeling</i>
MA	Manufatura Aditiva
PP	Planejamento do Processo
PR	Prototipagem Rápida
SLA	<i>Stereolithography</i>
STL	STereoLithography (tipo de arquivo)

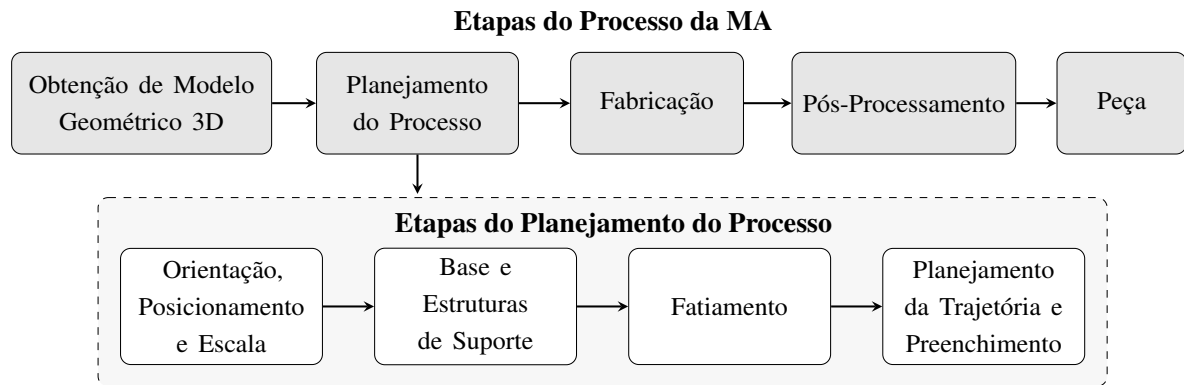
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OPORTUNIDADE DE PESQUISA	11
1.2	OBJETIVO GERAL	14
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	MANUFATURA ADITIVA	15
2.2	ESTRUTURAS DE SUPORTE	17
2.3	SUPORTE BASEADO NO MODELO 3D	18
2.4	SUPORTE BASEADO EM FATIAS	20
3	MÉTODO PROPOSTO	23
3.1	FATIAMENTO DO MODELO	24
3.2	AUTOSSUPORTE	27
3.3	AUTOSSUPORTE - CONCEITO ESTENDIDO	29
3.4	COMPUTAÇÃO DE SUPORTE USANDO IMAGENS	29
3.5	EFEITOS CAUSADOS PELA DISCRETIZAÇÃO	33
3.6	ESTUDO DA RESOLUÇÃO DAS IMAGENS DAS FATIAS	35
3.7	MELHORIA NO PROCESSO DE FATIAMENTO	41
3.8	COMPUTAÇÃO DAS REGIÕES DE SUPORTE ATRAVÉS DE IMAGENS COM INDICAÇÕES DOS ÂNGULOS DOS CONTORNOS	43
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	46
4.1	VERIFICAÇÃO DAS REGIÕES DE SUPORTE	46
4.2	APLICAÇÃO DE MÁSCARAS E OUTRAS MELHORIAS NA REGIÃO DE SUPORTE	49
5	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A *Manufatura Aditiva (MA)*, popularmente conhecida como impressão 3D, é um processo de fabricação de objetos tridimensionais por meio do princípio de adição de camadas de material, de acordo com uma representação geométrica computacional tridimensional (3D) de um objeto (VOLPATO; CARVALHO, 2017). As etapas de um processo em MA são: modelagem 3D, planejamento do processo, fabricação e pós-processamento, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Etapas do processo da manufatura aditiva.



Fonte: Volpato e Carvalho (2017)

A etapa denominada Planejamento do Processo (PP) é subdividida em: orientação, posicionamento e escala, que consiste em determinar a disposição do modelo no espaço de trabalho da máquina; cálculo de estruturas de suporte, para permitir a deposição de material caso não haja superfície de apoio para sustentá-lo; fatiamento, que consiste na divisão do modelo tridimensional em contornos bidimensionais; e planejamento de trajetória, que identifica as melhores rotas para deposição de contornos, preenchimentos, movimentos sem deposição de material, além de outras variáveis importantes como temperatura e velocidade do processo.

O processo aditivo permite fabricar componentes físicos a partir de vários tipos de materiais e com base em diferentes tecnologias (VOLPATO; CARVALHO, 2017), apresentando grande versatilidade na fabricação de peças complexas, e com aplicação em diversos setores, como: acadêmico, da saúde, da indústria e de serviços (OLIVEIRA, 2008). Chua, Leong e Lim (2010) descrevem alguns dos principais materiais utilizados nesse tipo de manufatura, dentre os quais o papel, nylon, cera, polímeros, resinas, metais e cerâmicas. Com relação às tecnologias existentes, a *International Organization for Standardization (ISO)* e a *American*

Society for Testing and Materials (ASTM) (ISO/ASTM, 2015) classificaram todos os processos de MA em sete grandes categorias: jateamento de aglutinante (*binder jetting*), em que um líquido aglutinante é seletivamente depositado para colar material em pó; deposição com energia direcionada (*directed energy deposition*), em que uma energia térmica é focada para fundir o material de base, seguido da adição do pó ou arame metálico à poça fundida; extrusão de material (*material extrusion*), onde um material em pasta ou sólido é fundido e seletivamente depositado através de um bico ou orifício; jateamento de material (*material jetting*), quando gotas do material de construção, como fotopolímero ou cera, são depositados; fusão em leito de pó (*powder bed fusion*), quando é usada energia térmica para fundir regiões de um leito de pó; laminação de folhas (*sheet lamination*), onde folhas de material são unidas para formar o objeto e, finalmente, fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*), em que um fotopolímero líquido em uma cuba é seletivamente curado (polimerizado) e solidificado pela incidência de feixe de luz.

O foco do presente trabalho no PP é nas etapas de “Base e Estruturas de Suporte” e “Fatiamento”, que são essenciais para o processo de MA como um todo, visto que várias das tecnologias deste tipo de fabricação necessitam da construção de estruturas de suportes e todas precisam ser fatiadas. Para a produção adequada das partes, suportes podem ser gerados de maneira a permitir a fabricação de regiões suspensas ou desconectadas, evitar o desequilíbrio da peça, ou então para facilitar que o calor oriundo da fabricação seja dissipado, fazendo com que o produto físico final represente o modelo 3D projetado. A Figura 2 ilustra um objeto fabricado com estruturas de suporte utilizando a tecnologia Modelagem por Fusão e Deposição, do inglês *Fused Deposition Modeling* (FDM), que está classificada na categoria de extrusão de material.

1.1 OPORTUNIDADE DE PESQUISA

A crescente popularização da tecnologia de impressão 3D, as facilidades e melhorias na produtividade para o desenvolvimento de produtos, bem como o aumento da eficiência e qualidade de todo o processo de manufatura, são grandes incentivos para progressivos estudos na área de MA. As tecnologias têm avançado e a disponibilidade e evolução dos materiais também proporcionam um aumento de interesse nos paradigmas de manufatura. A melhoria da eficiência e da qualidade no processo depende de diversos fatores, como a espessura das camadas, a orientação do modelo a ser impresso, a otimização de estruturas de suporte, ou até o encolhimento térmico e deformações (THOMAS, 2009).

Figura 2 – Ilustração de um objeto produzido com suporte.



Fonte: Morales (2015)

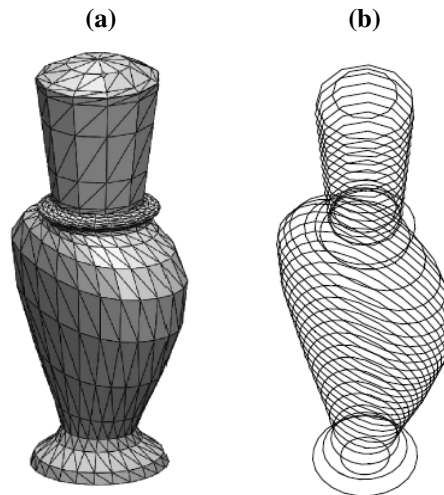
A etapa do planejamento de processo que define as estruturas de suporte necessita de algoritmos eficientes e precisos para evitar deformações indesejadas na peça. É importante observar que o uso de suportes implica no aumento do tempo de processamento e fabricação, maior utilização de material e a diminuição da qualidade de acabamento da superfície onde há contato entre o objeto e o suporte, revelando a necessidade de otimização desta atividade (THOMAS, 2009).

As pesquisas sobre melhorias nos processos de geração de suportes concentram-se principalmente na determinação da melhor orientação do modelo, no desenvolvimento de materiais mais baratos e de fácil remoção, nos formatos dos suportes e, até mesmo, na modificação do modelo para que haja uma menor necessidade de suportes. Além disso, salienta-se que não há uma padronização dos estudos com relação aos itens analisados e nem dos parâmetros utilizados (JIANG; XU; STRINGER, 2018).

Volpato e Silva (2017) expõem que existem dois métodos principais para a geração das estruturas de suporte: através da malha triangular de um modelo geométrico 3D (Figura 3(a)) ou por polígonos resultantes do fatiamento do modelo (Figura 3(b)). O método baseado na malha triangular é mais largamente utilizado na indústria. Assim como o objeto, os suportes gerados são representados como malhas triangulares. As malhas do objeto e do suporte são posteriormente fatiadas para gerar polígonos para impressão. Este método segue a ordem mostrada na Figura 1. No método de cálculo de suportes baseado nos dados das fatias, a ordem da segunda e terceira

etapas do PP é invertida. Assim, o fatiamento é feito apenas na malha do objeto e o suporte é calculado sobre os dados das fatias, através de operações entre os polígonos de camadas adjacentes (CHALASANI; JONES; ROSCOE, 1995; VOLPATO; SILVA, 2017).

Figura 3 – Ilustração de um modelo 3D representado em malhas triangulares em (a) e os contornos resultantes do fatiamento em (b).



Fonte: Minetto *et al.* (2017)

Seguindo abordagens baseadas em fatias, Huang, Wang e Chen (2014) desenvolveram um método para computar regiões de suporte por imagens binárias de fatias. Os autores informam que o método baseado nas fatias é preferido por eliminar tratamento de possíveis falhas de modelos no formato STereoLithography (tipo de arquivo) (STL). Eles também mencionam que a abordagem utilizando imagens ao invés de polígonos, é robusta e fácil de implementar, devido ao fato de basear-se em um conjunto binário e usar operações binárias booleanas e aritmética inteira. Huang, Wang e Chen declaram que operações com os polígonos podem gerar regiões de suporte incorretas ou com falhas, além de poder ter processamento lento. Uma necessidade comum para a determinação da região de suporte é a realização de *offset* (deslocamento) dos contornos, o que pode introduzir auto-interseção de polígonos. Operações com polígonos também sofrem com a computação numérica, que levam a implementações menos robustas e mais complexas, comparando-se com as operações binárias e discretas das imagens das fatias.

A computação de suportes baseada em fatias é mais rara de ser encontrada na literatura, sobretudo quando a geração das regiões de suporte é feita sobre as imagens obtidas da conversão dos polígonos das fatias. Nesta dissertação é explorada a abordagem baseada em imagens, em especial considerando a proposta de Huang, Wang e Chen (2014). A geração de suporte baseada em imagens pode provocar a produção de um volume de suporte maior que o realmente necessário devido à aproximação de valores na discretização ocorrida na conversão de polígonos

para imagens das fatias. Ao explorar a fundo este problema, são estudadas melhorias e também são investigadas as facilidades e dificuldades desta abordagem em relação às demais, com o propósito de levantar propostas de aprimoramentos para esta etapa tão importante dentro do processo de MA, pois ela pode impactar diretamente na redução de custos e aumento da qualidade do produto final.

1.2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um estudo sobre o uso de imagens para determinar as regiões de estruturas de suporte para modelos 3D.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar e implementar algoritmos para cálculo de regiões de estruturas de suporte baseados em imagens;
- Estudar a variação de resoluções de imagens para diminuir os erros relacionados à discretização do mapeamento de polígonos para *pixels*;
- Propor uma solução melhorando a integração do fatiamento com a computação de suportes para os problemas relacionados aos erros de precisão provocados pela discretização;
- Explorar as facilidades da representação de imagens, e de operações sobre estas, para a geração de regiões de suporte.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O restante desta dissertação está organizado conforme descrito a seguir. No Capítulo 2 são apresentados diversos estudos referentes à evolução da MA e aos métodos de geração de suportes. O Capítulo 3 descreve o algoritmo para computação de suporte usando imagens, cujos passos básicos são similares ao método proposto por Huang, Wang e Chen (2014). Neste mesmo capítulo, são explanados problemas da abordagem e uma solução para os mesmos é apresentada. Na sequência, Seção 4, são expostos os experimentos realizados, resultados obtidos e algumas melhorias implementadas nas estruturas de suporte. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 5.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Manufatura Aditiva é um tema bastante estudado e cujo volume de publicações apresenta grande crescimento nos últimos anos. No entanto, a proporção de pesquisas no subtema “estruturas de suporte” é relativamente pequena. Um fator agravante com relação à quantidade de literatura encontrada nesta área é que existem várias tecnologias em uso e cada uma possui suas próprias propriedades e desafios associados (JIANG; XU; STRINGER, 2018). A seguir são apresentados trabalhos que descrevem a evolução da MA e, principalmente, estudos de otimização de estruturas de suporte.

2.1 MANUFATURA ADITIVA

As pirâmides egípcias, construídas com a sobreposição de blocos, podem ser um dos exemplos mais antigos de construção por camadas, conforme observado por Volpato e Carvalho (2017). Por volta de 1890, surgiram estudos para a fabricação de moldes para mapas de relevo topográfico em que eram produzidos discos de cera com o contorno topográfico (curvas de nível) que, quando sobrepostos, reproduziam superfícies tridimensionais. Em meados dos anos 1930, estudos combinavam técnicas de fotoescultura e topografia para a fabricação por camadas. A partir dos anos 1950 passaram a surgir sistemas com algumas características da técnica atual de estereolitografia, cujo processo utiliza a tecnologia de fotopolimerização de resina líquida, ainda que com algumas etapas, por vezes, manuais. Nas décadas de 1960 e 1970 foram documentados métodos de produção de peças também usando resina fotopolimerizável com sobreposição de camadas e outros que utilizavam técnicas de laminação. Volpato e Carvalho (2017) observaram que as pesquisas, técnicas e processos desenvolvidos para a fotoescultura e para a topografia deram origem às atuais técnicas de MA. Contudo, elas passaram a ser empregadas de forma mais intensa somente após o aparecimento de equipamentos comerciais, sendo o primeiro deles denominado SLA-1 (*stereolithography apparatus*), apresentado pela empresa americana 3D Systems em 1987.

Devido ao seu propósito, foi adotado, inicialmente, o termo Prototipagem Rápida (PR) para a referência a este processo de manufatura, afinal, as tecnologias utilizadas fabricavam, literalmente, protótipos de produtos em estágios iniciais de desenvolvimento de forma rápida e automatizada. Entretanto, este termo não proporciona a alusão à forma como ocorre a produção,

que é baseada em camadas. O desenvolvimento e a evolução deste processo trouxeram melhorias de qualidade e precisão nas manufaturas produzidas, de tal forma que os termos utilizados não eram mais adequados. Os avanços e o crescente interesse nesta área ficam evidenciados pelo desenvolvimento dos padrões definidos pelas organizações ISO/ASTM (ISO/ASTM, 2015), que levou ao uso regular do termo manufatura aditiva (primariamente para a indústria) e impressão 3D (para o público em geral) (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012).

Livesu *et al.* (2017) analisam todos os passos do Planejamento do Processo (PP), que, no ciclo de produção de um objeto, seriam as operações que preparam o modelo 3D digital para sua fabricação física. O estudo descreve pesquisas sobre cada uma das etapas do PP, divididas em: verificação dos requisitos da geometria, para avaliar a possibilidade de fabricação; verificação da orientação do modelo, para identificar a melhor direção para fabricação segundo algum critério, como o tempo de impressão, quantidade de suporte necessário, qualidade da superfície, entre outros; criação de estruturas de suporte, divididos em estudos sobre suporte externo e interno; fatiamento, que é uma das etapas centrais, pois é nela que são definidos os contornos de cada camada a ser produzida; e conversão para instruções de máquina, divididas nas abordagens: vetor, que produz os caminhos que a máquina percorrerá para a fabricação de cada camada através da ligação entre pontos, e raster, interpretando as fatias como imagens 2D discretas. Os autores citam razões para que modelos com múltiplos componentes sejam produzidos individualmente, apontando problemas como a possibilidade de fusão de partes que apenas se tangenciam, ou a inserção de estruturas de suporte que não possam ser removidas, por exemplo. Outros estudos abordados naquele trabalho estão relacionados ao particionamento do modelo, seja devido ao objeto ser maior que a câmara da impressora, seja para facilitar o empacotamento e transporte, quando o produto será montado em outra localidade, ou ainda, para melhorar a qualidade do produto através da estratégia divisão e conquista. Este longo relato de diversos estudos a respeito de todas as fases do PP deixa claro e está de acordo com o fato também mencionado por outros autores de que há grande interesse em pesquisas considerando todas as etapas do processo, entretanto, ao focar em um ponto específico de uma das etapas, a quantidade de trabalhos pode tornar-se escassa.

O estudo de Perez *et al.* (2020) registra os avanços ocorridos na MA, tanto na área acadêmica, quanto na industrial e comercial. Devido à sua vasta possibilidade de aplicação (desde a indústria aeronáutica até a biomedicina), constantemente surgem estudos de melhorias e desenvolvimentos das tecnologias, materiais e processos utilizados, o que atrai o interesse dos

mais variados setores, proporcionando mais desenvolvimento e o aumento das oportunidades de aplicabilidade, sustentando, portanto, os imensos avanços que têm sido observados. Perez *et al.* (2020) também apontam as principais tendências com relação aos estudos desta área, como: novos materiais, multi-materiais, impressão 4D, micromanufatura, otimização dos processos, pós-processamento, sustentabilidade, entre outros. Contudo, a MA ainda apresenta muitos pontos em que melhorias são necessárias, como tempo de processamento, tempo de fabricação, qualidade de acabamento e custo de produção. De acordo com Thomas (2009), melhorias no processo de geração dos suportes de sustentação podem impactar diretamente no progresso de todos estes pontos.

2.2 ESTRUTURAS DE SUPORTE

A maioria das tecnologias de MA necessita da construção de suportes no processo de fabricação, seja para permitir uma melhor dissipação térmica; para que as partes tenham uma sustentação que permita a construção física das camadas; ou, para que o objeto não deforme ou caia, devido à ação da força da gravidade. Por isso, estudos deste tema mostram-se importantes (JIANG; XU; STRINGER, 2018).

Kulkarni, Marsan e Dutta (2000) descrevem a importância de se ter um bom planejamento do processo de impressão com relação à orientação do objeto e à geração de suportes, pois isto pode interferir no tempo de impressão, na quantidade de material utilizada e até mesmo em possíveis perdas na qualidade de acabamento no pós-processamento, quando os suportes são removidos. O estudo também menciona as duas abordagens para a geração de suportes, uma através de computação sobre a geometria (diretamente sobre as malhas geométricas do modelo 3D do arquivo em formato STL) e outra através da computação sobre dados das fatias (dados dos polígonos obtidos do processo de fatiamento do modelo 3D).

A quantidade de suporte deve ser minimizada e a facilidade de remoção também deve ser considerada no processo de sua geração. Em alguns casos, a região suspensa é pequena o suficiente para que o material depositado consiga ser suportado sobre a fatia depositada anteriormente. Essas regiões são ditas autossuportadas, visto que o próprio objeto faz a sustentação, não necessitando de uma estrutura externa. Estas partes devem ser consideradas para diminuir a quantidade de material usado na impressão, diminuir o tempo de impressão, bem como, diminuir o trabalho de limpeza dos suportes (VANEK; GALICIA; BENES, 2014). Por exemplo, se um objeto possui uma parede com uma pequena inclinação que é autossuportada, não há necessidade

do uso de suporte.

O principal critério de identificação das partes que necessitam de uma estrutura externa de suporte é chamado de ângulo de autossuporte (também chamado de ângulo crítico), cujo valor varia de estudo para estudo, conforme mencionado nas Seções 2.3 e 2.4, a depender da tecnologia utilizada, dos materiais, dos métodos, entre outros fatores. Os próprios fabricantes das máquinas e suprimentos podem possuir recomendações próprias. Alguns estudos definem este parâmetro como sendo o ângulo entre a normal das faces dos triângulos que compõem a superfície e o eixo vertical. Outros o definem como o ângulo entre a superfície e o plano horizontal. Independentemente da forma como fazem esta definição, o objetivo é o mesmo, isto é, se a superfície formar um ângulo mais vertical que o ângulo de autossuporte, não há necessidade de suporte extra, a camada inferior será capaz de suportar a superior. Caso a superfície seja mais horizontal que o ângulo crítico, deve-se criar suporte.

2.3 SUPORTE BASEADO NO MODELO 3D

Kirschman *et al.* (1991) desenvolveram um método para geração de estruturas de suporte baseado nas malhas triangulares do formato STL do modelo 3D em que todas as faces triangulares da superfície são percorridas analisando as que possuem a inclinação de interesse, ajustável pelo usuário, mas que por padrão são usados ângulos menores ou iguais a 20° com o plano horizontal. Para cada triângulo identificado como de interesse, são verificadas as arestas entre seus três vizinhos para classificá-las em: borda plana, quando os vetores normais das duas faces possuem ângulos iguais; borda falsa, quando o triângulo adjacente também necessita de suporte, mas tem ângulo diferente; borda base ou borda viga, quando o vizinho não necessita de suporte e encontra-se acima ou abaixo da face atual, respectivamente. Estas bordas são então ordenadas em uma árvore hierárquica, que as divide em conjuntos de linhas, sendo que os ramos principais desta árvore são os contornos. Os contornos do tipo viga são classificados em três tipos: curtos (com menos de 1,78mm e que não precisam de suporte, e devido a isso são removidos da árvore); baixos (precisam de suporte mas estão muito perto da parte inferior da peça, então são tratados como base); e longos e altos (são adicionados suportes a quantas arestas deste tipo forem necessárias). São adicionados suportes de reforço em regiões onde forem detectadas estas necessidades. A etapa seguinte é a determinação do formato de construção do contorno do suporte com hachura. Uma vez que o suporte do perímetro foi encontrado e hachurado, as linhas são convertidas para malhas triangulares e estas estruturas são movidas 0,001 polegadas

da borda da peça para facilitar sua remoção na etapa de pós-processamento. Os valores padrão e os critérios utilizados no estudo foram determinados através de experimentos relatados em outra pesquisa dos mesmos autores.

Bo *et al.* (2011) apresentam um método também baseado em arquivos no formato STL, e utilizam o valor do ângulo de autossuporte de 30° , que foi determinado com base nos experimentos de (QIAN, 2005 apud BO *et al.*, 2011) e (QIAN, 2009 apud BO *et al.*, 2011). Caso as faces triangulares formem um ângulo menor ou igual ao ângulo crítico, eles são adicionados à região de suporte. O estudo propõe a otimização de um algoritmo de marcação discreta, que é o registro dos identificadores (IDs) dos triângulos ao serem projetados em um plano. Estes IDs são determinados usando as coordenadas bidimensionais das projeções dos triângulos neste plano. Em seguida, o algoritmo realiza o cálculo dos raios de suporte, que partem dos triângulos adicionados na região de suporte verticalmente e devem ser interrompidos caso interseccionem outro triângulo, determinando os trechos para a geração de suporte. As verificações de interseção entre os raios de suporte e os triângulos são baseadas nos identificadores. Isto é feito de maneira que limite a quantidade de análises desnecessárias das interseções, reduzindo consideravelmente o tempo de execução quando comparado ao método não otimizado e ao software Magics¹. Este experimento foi aplicado nas tecnologias de fotopolimerização em cuba e fusão em leito de pó.

Vaidya e Anand (2016) apresentam um método cujo objetivo é minimizar a construção de suportes utilizando estruturas celulares unitárias. Neste trabalho, todo o espaço 3D é dividido em pequenas partes unitárias compostas por estruturas celulares que podem ser no formato de octaedro truncado ou dodecaedro rômbo. Estas formas foram escolhidas pois funcionam bem como preenchimento de todo o espaço, possuem as faces de junção planas entre as células unitárias e estudos permitem concluir que elas são manufaturáveis e podem construir estruturas de suporte mínimas e leves. São identificadas as estruturas que estão em contato com o objeto e fazem parte das regiões que devem possuir suporte, de acordo com o critério do ângulo crítico de 45° e são divididas em grupos quadrados ou retangulares de no máximo 3x3 estruturas. O objetivo deste tipo de divisão é reduzir a quantidade de estruturas por onde o caminho de suporte será gerado. Este grupo pode ser suportado por um grupo menor no nível abaixo, por exemplo 2x2, que por sua vez, pode ser suportado por uma única estrutura celular, que é chamada de estrutura alvo. São geradas estruturas únicas abaixo desta até que se chegue à estrutura celular de suporte, no nível mais baixo. As estruturas celulares que estão em contato com o objeto,

¹ <https://www.materialise.com/en/software/magics>

e não foram enquadradas nos grupos quadrados ou retangulares anteriormente divididos, são suportadas por estruturas celulares identificadas através do uso do algoritmo do menor caminho de Dijkstra que indicará quais as células adjacentes deverão ser utilizadas para se chegar à estrutura de suporte mais próxima.

2.4 SUPORTE BASEADO EM FATIAS

Trabalhar com as malhas do formato STL pode ter algumas desvantagens em relação ao trabalho com os dados 2D obtidos do fatiamento do modelo 3D. Na literatura encontram-se diversos relatos de falhas nas representações e aproximações dos modelos em malhas triangulares. Chalasani, Jones e Roscoe (1995) e Huang *et al.* (2009) destacam que estas falhas são comuns e variadas, e o fato destas abordagens gerarem suportes também em malhas triangulares, pode ocasionar a multiplicação das falhas, produzindo mais dados para o processo de fatiamento tratar.

Chua, Leong e Lim (2010) e Foggiatto e Silva (2017) exploram detalhadamente as deficiências das malhas triangulares e descrevem correções para estes problemas. Os autores afirmam que os arquivos deste formato não contêm informações topológicas que garantam a conectividade e a consistência da malha, a direção do vetor normal não é totalmente confiável e há redundância de dados, o que resulta em tamanho excessivo dos arquivos. Além disso, várias inconsistências podem ser geradas em função dos algoritmos implementados nos módulos de exportação dos sistemas CAD não serem suficientemente robustos. Jin e Fu (2015) alegam que a geração de suporte em modelos 3D é mais difícil e exige mais computação, quando comparados com a geração de suporte baseada em fatias. O estudo aponta que a implementação manipulando dados em 2D mostra-se mais fácil, inclusive devido aos problemas das malhas triangulares já terem sido tratadas pelo processo de fatiamento, que é uma etapa necessária em Manufatura Aditiva.

Chalasani, Jones e Roscoe (1995) mencionam que as malhas do formato STL podem possuir sobreposição de faces triangulares, lacunas entre as faces, e triângulos longos e finos, por isso é preferível realizar o processamento dos suportes a partir dos dados das fatias, que já tratam estes problemas. O objetivo dos autores era desenvolver o módulo de geração de suporte do software proprietário QuickSlice para a Stratasys Inc., cujo hardware utiliza a extrusão de material. Os autores expõem as três estratégias desenvolvidas neste sistema, chamadas de contenção, região e direta. A abordagem de contenção utiliza a ideia de que toda região ao redor do objeto é suporte. Seu processamento é rápido, no entanto, o tempo de construção e a

quantidade de material são comprometidos. Para reduzir o volume de suporte produzido, foi desenvolvida a abordagem por região. Neste método é fornecida uma vista do topo das fatias e há uma interação do usuário, que desenha as regiões onde não são necessários os suportes e a ferramenta os gera em todos os níveis, automaticamente. A terceira estratégia é de forma otimizada e totalmente automática. Esta abordagem realiza a diferença entre fatias adjacentes, cujo resultado é chamado de sombra, iniciando do nível superior e acumulando as sombras conforme for computando os pares de fatias subsequentes. É possível configurar um parâmetro neste método, chamado de largura da estrada (tradução livre de *road-width*) em que sombras com largura inferior a este parâmetro não necessitam de suporte. É classificado que partes suspensas com inclinação menor de 45° em relação ao plano horizontal necessitam de suporte. Contudo, os autores não apresentam muitos detalhes da implementação ou da parametrização, possivelmente, por se tratar do estudo para o desenvolvimento de um software proprietário.

Todos os estudos baseados nesta abordagem de construção de suportes através de dados pós fatiamento iniciam-se de maneira semelhante, realizando operações a partir do par de fatias adjacentes do topo, seguindo em direção à base. O que difere um método do outro são os refinamentos realizados por cada algoritmo para cada par de fatias, conforme descrições a seguir.

Em (JIN; FU, 2015), os autores também propõem um método para computação de suporte baseado nas fatias do modelo 3D. Para suporte externo, este estudo encontra as regiões de sombra, onde os suportes, possivelmente, estarão localizados e as classifica em três casos: quando a região não tem conexão com a parte do objeto da fatia inferior, quando é uma área estreita e quando é uma área ampla. No primeiro caso, suporte é indispensável. Nos outros dois, é necessário verificar o ângulo de inclinação estimado para determinar a necessidade de suporte, o que ocorre através de cálculos trigonométricos e verificação de distâncias entre pontos dos contornos das fatias. Se estas distâncias forem maiores que o limite calculado, a região é classificada como área que necessita de suporte; se as distâncias forem menores, a região será classificada como autossuportada. A computação do suporte interno inicia-se pela identificação dos contornos interiores do objeto. O algoritmo determina a quantidade de camadas influenciadoras para o estabelecimento da espessura da parede de cada fatia, que apresentará variação de acordo com a inclinação da superfície. Definidos os contornos interiores das camadas, o suporte interno é calculado usando os mesmos critérios do externo, por isso sugere-se que esta parte do processo seja acompanhada da geração de suporte externo para acelerar a computação.

Huang, Wang e Chen (2014) apresentam em seu estudo um método de construção de

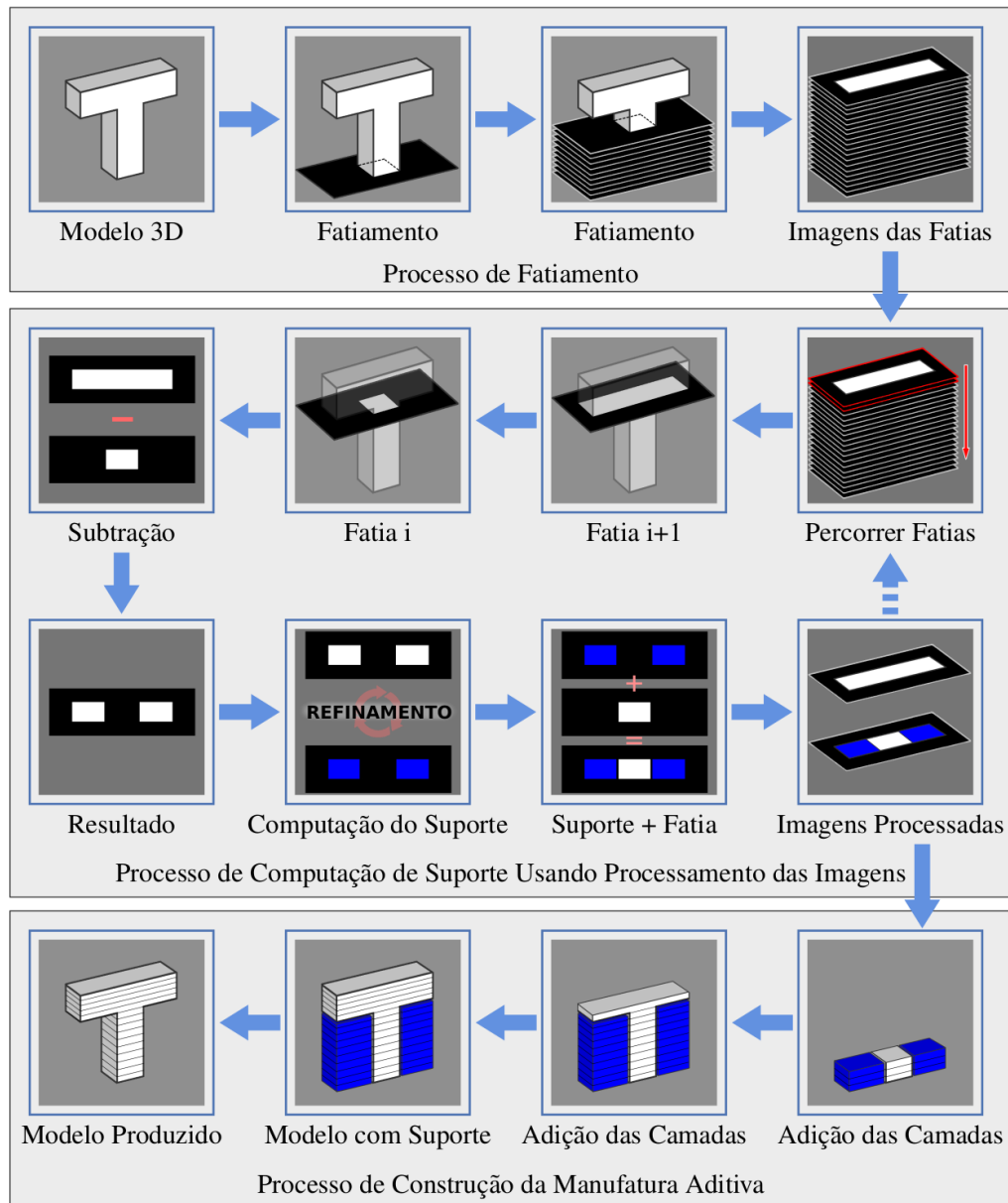
suporte chamado *Growing-Swallow* (que em uma tradução livre seria crescendo e engolindo). Este algoritmo também parte do princípio de realizar os processamentos em pares de fatias, partindo do topo para a base. A região de sombra é obtida através da diferença entre a imagem da fatia superior e a inferior. É feita a remoção das faixas autossuportadas através do crescimento gradual da parte da fatia inferior (sucessivas operações morfológicas de dilatação), engolindo a região de sombra até atingir o limite da faixa autossuportada. O algoritmo é implementado desta forma gradual para engolir apenas as sombras que estão em contato com o objeto. O suporte computado para o par de fatias corrente é a região de sombra que restar destas operações. Os suportes obtidos até o processamento anterior são propagados e, em seguida, passa-se ao próximo par, até alcançar as fatias da base do objeto. O estudo ainda propõe dois métodos complementares para ajustar os suportes para os processos *Stereolithography* (SLA) e Modelagem por Fusão e Deposição, do inglês *Fused Deposition Modeling* (FDM).

3 MÉTODO PROPOSTO

Os métodos convencionais de computação de suporte para MA, baseados nos dados de fatiamento, realizam operações entre os polígonos que representam os contornos do modelo 3D. O estudo de Huang, Wang e Chen (2014) propôs um método para computar regiões de suporte baseado em imagens binárias das fatias. Os autores citam que o uso de imagens possui a vantagem de trabalhar com dados e operações sobre valores inteiros, evitando assim problemas com representações em ponto flutuante. Este capítulo apresenta um estudo sobre a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens, nos dados obtidos do fatiamento do modelo digital 3D, para a obtenção de regiões onde devem ser geradas estruturas de suporte para Manufatura Aditiva. O método desenvolvido é baseado na proposta de Huang, Wang e Chen (2014), denominada *Growing-Swallow*. No entanto, alguns problemas identificados na computação de regiões de suporte são discutidos e soluções são apresentadas como melhorias para algoritmos baseados em imagens.

Um esquema simplificado com as etapas principais do processo aqui proposto é mostrado na Figura 4. Na primeira etapa, uma malha de triângulos, representando um objeto, é dada como entrada para o processo de fatiamento, gerando um conjunto de imagens que representam as regiões de um objeto em diferentes planos horizontais. As imagens resultantes são então processadas para identificar regiões suspensas do objeto e criar estruturas de suporte quando necessário (segunda etapa da Figura 4). A determinação das regiões de suporte é o foco principal do trabalho e estratégias serão discutidas ao longo desta seção. Duas a duas, partindo da penúltima fatia em direção à inferior, imagens adjacentes são subtraídas para identificar regiões da fatia superior que necessitarão de suporte e quais serão autossuportadas pela fatia inferior. São feitas operações para melhorias no suporte e este processo produz como saída imagens contendo as regiões de objeto juntamente com os suportes necessários. Por fim, as regiões das fatias representando objeto e suporte são usadas para o processo de manufatura camada a camada. A terceira e última parte da Figura 4 ilustra o processo de manufatura do modelo com suporte para sustentação das partes suspensas do objeto. No decorrer desta seção serão detalhados cada um dos passos das duas primeiras etapas.

Figura 4 – Etapas de processamento do modelo até a produção da manufatura, segundo a abordagem proposta.



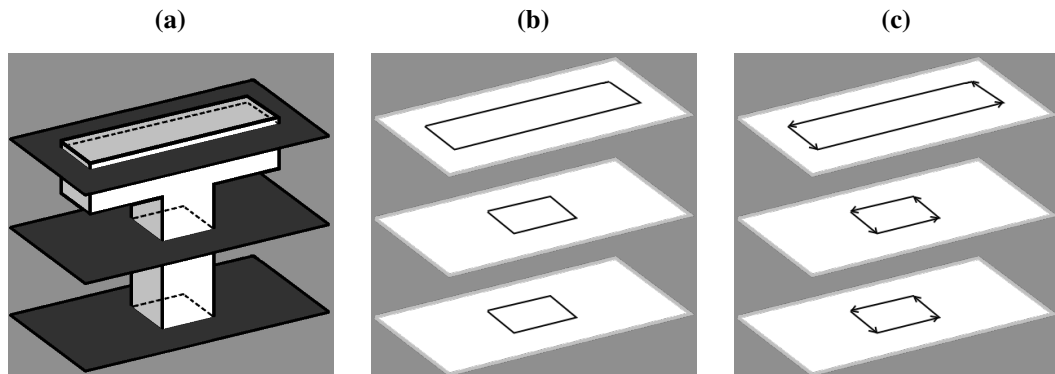
Fonte: Autoria própria.

3.1 FATIAMENTO DO MODELO

Na etapa de fatiamento, são criados os dados de contorno do objeto considerando planos horizontais paralelos que cortam a malha triangular do modelo de entrada (ver Figura 5). Os planos são distanciados entre si pelo parâmetro t da espessura das camadas, e suas intersecções com as formas da superfície da geometria geram contornos (polígonos fechados) representando as bordas do modelo, também chamados de *fatias* (MINETTO *et al.*, 2017). Os polígonos são formados por uma sequência orientada de pontos. Contornos externos possuem sequência

anti-horária e polígonos internos (buracos) possuem sequência horária.

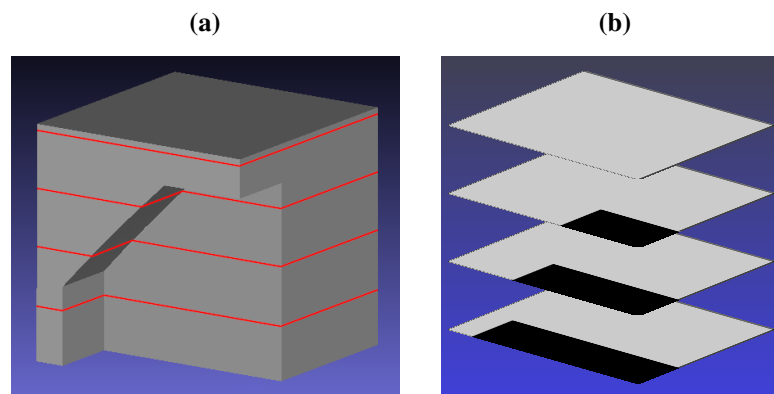
Figura 5 – Ilustração de um modelo 3D fatiado por 3 planos horizontais em (a), produzindo 3 conjuntos de polígonos em (b). Em (c) são mostradas as orientações dos polígonos.



Fonte: Autoria própria.

Os polígonos gerados são usados para criar imagens representando o interior e o exterior de um objeto. Nesta representação em imagens binárias, *pixels* brancos correspondem ao objeto (representados em cinza em alguns esquemas gráficos), e *pixels* pretos correspondem ao fundo. A Figura 6(a) ilustra um modelo 3D fatiado por quatro planos e a Figura 6(b) ilustra as quatro imagens binárias obtidas das fatias. Dada uma fatia e seus polígonos, a imagem pode ser criada por um algoritmo de preenchimento de regiões, como *scan line filling* (HEARN; BAKER, 1996), que percorre a imagem preenchendo os *pixels* internos do objeto de branco e os externos de preto.

Figura 6 – Ilustração do processo de fatiamento de um modelo 3D (a) produzindo um conjunto de imagens (b).



Fonte: Autoria própria.

Vale mencionar que, em imagens, a menor unidade é o *pixel* e os Pontos Por Polegada, do inglês *Dots Per Inch* (DPI), caracterizam a sua densidade, ou seja, a quantidade de *pixels* contidos em uma polegada. Quanto maior o DPI maior é a resolução da imagem e, portanto, maior é a densidade de *pixels* por área (em polegadas) da imagem. Como os modelos geométricos

são comumente definidos em milímetros e as imagens em *pixels*, é necessária a conversão entre estas unidades de medida. Considerando que uma polegada (*inch*) equivale a 25,4 milímetros (*mm*) (Equação 1):

$$inch = \frac{mm}{25,4}. \quad (1)$$

sabendo o valor da densidade (*dpi*) de uma imagem, é possível determinar quantos *pixels* (*pix*) equivalem a uma polegada (*inch*) através da Equação 2:

$$dpi = \frac{pix}{inch} \quad \text{e} \quad pix = inch \times dpi. \quad (2)$$

Substituindo a Equação 1 na Equação 2, é possível converter milímetros para *pixels* através da Equação 3:

$$pix = \frac{dpi \times mm}{25,4}. \quad (3)$$

O algoritmo que realiza o processo de fatiamento e geração das imagens necessita do parâmetro *dpi* para que as saídas produzidas tenham a resolução desejada. A criação de uma imagem de resolução $M \times N$ então é obtida por

$$\begin{aligned} M &= \frac{dpi \times (x_{\max} - x_{\min})}{25,4} \\ N &= \frac{dpi \times (y_{\max} - y_{\min})}{25,4}, \end{aligned} \quad (4)$$

tal que x_{\max} , x_{\min} , y_{\max} , y_{\min} são os valores máximos e mínimos nos eixos X e Y considerando as coordenadas de todos os vértices de um modelo. A conversão das coordenadas (x_v, y_v) de um vértice, representadas em valores reais, para suas respectivas coordenadas na matriz de *pixels* (valores inteiros) é feita de acordo com as equações abaixo:

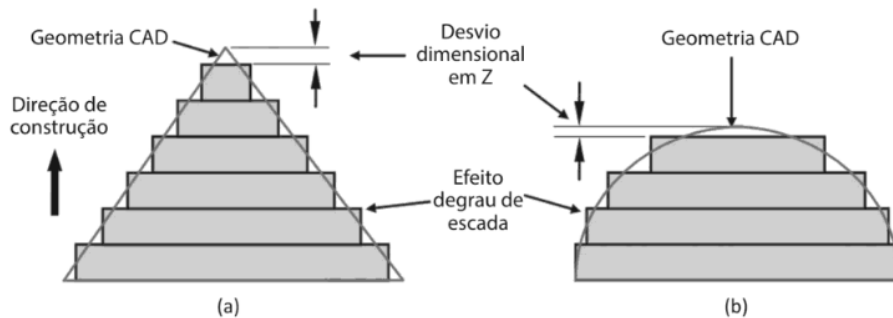
$$\begin{aligned} x &= \frac{dpi \times (x_v - x_{\min})}{25,4} \\ y &= \frac{dpi \times (y_v - y_{\min})}{25,4}. \end{aligned} \quad (5)$$

Para realizar estas conversões e obter os valores em *pixels* em cada cálculo, é feita uma aproximação, arredondando para valores inteiros, visto que a quantidade de *pixels* e as coordenadas dos pontos, ao serem convertidas, não podem ser fracionárias. Os efeitos destas discretizações dos valores são melhor detalhados na Seção 3.5. As imagens binárias obtidas deste processo são então usadas para computar as regiões que necessitam de suporte.

3.2 AUTOSSUPORTE

O ângulo de autossuporte, também encontrado na literatura como ângulo crítico (α_c), é a inclinação limite das faces de um modelo em que a fatia inferior é capaz de suportar a superior sem a necessidade da construção de um suporte externo. Superfícies inclinadas do modelo, ao serem fatiadas, para a construção física em MA, sofrem o *efeito degrau de escada*, observado na Figura 7, que pode ser entendido como o desvio entre a geometria 3D digital e o objeto físico obtido pela adição das camadas, representado pelas áreas em cinza. Este efeito pode ser reduzido diminuindo-se a espessura das fatias, contudo, os sistemas de MA possuem uma espessura-limite, que deve ser respeitada (VOLPATO; SILVA, 2017).

Figura 7 – Efeito degrau de escada.

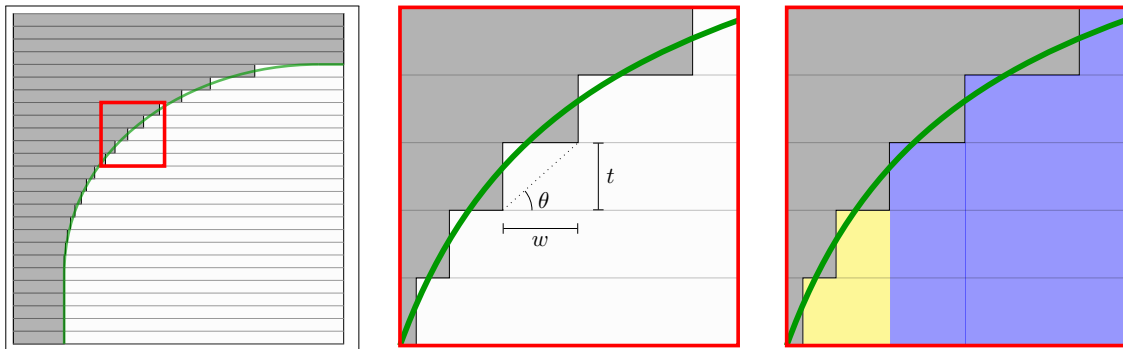


Fonte: Volpato e Silva (2017)

A Figura 8(a) ilustra um corte lateral caracterizando as fatias impressas de um modelo (em cinza). Os degraus regulares, representados formando ângulos retos, são apenas teóricos, para facilitar a descrição e compreensão. Na prática as bordas dos degraus são arredondadas. A região destacada em vermelho na Figura 8(a) é ampliada na Figura 8(b), que ilustra a formação de um ângulo θ entre duas camadas adjacentes. A região suspensa da camada superior é autossuportada caso o ângulo formado (θ) seja maior que o ângulo de autossuporte (α_c). Quando θ é menor ou igual a α_c , significa que a região necessita de uma estrutura de suporte.

Os ângulos das superfícies são facilmente obtidos a partir de uma malha triangular. No entanto, para obtê-los das imagens 2D, resultantes do fatiamento, são necessárias operações com os degraus formados pelas bordas das fatias, comparando as projeções w da região suspensa, sobre o eixo horizontal, com a largura máxima de autossuporte (w_{max}), dada pela projeção do ângulo crítico. Esses valores são convertidos em quantidade de *pixels* para a comparação. O valor w_{max} determina a largura máxima da região da camada superior que pode ser suportada pela inferior, assim, quando $w < w_{max}$, significa que o ângulo $\theta > \alpha_c$ e não é necessário suporte.

Figura 8 – Ilustração dos elementos utilizados para calcular a largura máxima de autossuporte w_{\max} .
 (a) Corte lateral de uma peça em cinza. (b) Elementos da relação entre as fatias. (c) Regiões com suporte em azul e autossuportadas em amarelo.

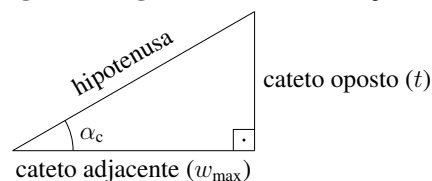


Fonte: Autoria própria.

A região autossuportada está ilustrada em amarelo na Figura 8(c). Quando $w \geq w_{\max}$, o ângulo $\theta \leq \alpha_c$ e deve ser gerado suporte, região em azul.

Antes de iniciar o processamento das imagens das fatias, é preciso encontrar o valor da largura máxima de autossuporte (w_{\max}). Este cálculo envolve a distância t (espessura das camadas) e o ângulo de autossuporte α_c . Transportando estes elementos para a trigonometria, obtém-se um triângulo retângulo cujos catetos são t e w_{\max} , que formam um ângulo reto (90°) entre si, e α_c é o ângulo entre o lado w_{\max} e a hipotenusa. Portanto, o cálculo da largura máxima de autossuporte (w_{\max}) pode ser feito utilizando-se a razão trigonométrica da tangente de α_c , que é determinada pela razão entre o cateto oposto (t) e o cateto adjacente (w_{\max}), em relação ao ângulo α_c . Na Figura 9 é ilustrado o triângulo retângulo com seus elementos. A Equação 6 define como a largura máxima de autossuporte é obtida.

Figura 9 – Triângulo retângulo com a identificação de seus elementos.



Fonte: Autoria própria.

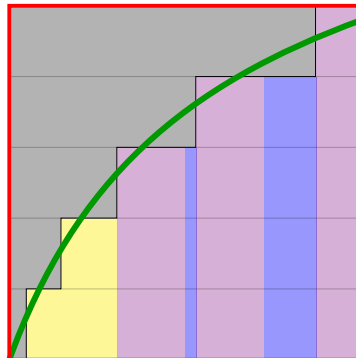
$$\tan \alpha_c = \frac{t}{w_{\max}}$$

$$w_{\max} = \frac{t}{\tan \alpha_c}. \quad (6)$$

3.3 AUTOSSUPORTE - CONCEITO ESTENDIDO

De acordo com o exposto anteriormente, a fatia inferior é capaz de suportar a fatia superior até uma distância w_{\max} de sua borda. Este fato permite que seja reduzida a quantidade de suporte gerada durante a computação de cada par de fatias, realizando a remoção da região de autossuporte entre elas. Se os degraus da região suspensa possuírem largura inferior a w_{\max} , eles são considerados autossuportados, permanecendo conforme definido na Seção 3.2, região amarela da Figura 10. Nesta figura é apresentada a ilustração de uma superfície curva, em verde, e os degraus que a representam após o fatiamento, em cinza. Os degraus que possuem largura maior ou igual a w_{\max} apresentam uma parte autossuportada, ilustrada em violeta, e apenas a porção que excede a largura de autossuporte é que realmente necessita da construção de suporte, representada em azul.

Figura 10 – Representação das regiões autossuportadas ($w < w_{\max}$) e das regiões de suporte, em azul, apenas nas porções em que $w \geq w_{\max}$.



Fonte: Autoria própria.

3.4 COMPUTAÇÃO DE SUPORTE USANDO IMAGENS

A identificação das regiões de estruturas de suporte tridimensionais pode ser realizada com base em imagens conforme os passos mostrados no Algoritmo 1, que reflete a proposta de Huang, Wang e Chen (2014). A entrada do algoritmo é composta por: uma sequência de imagens binárias $F[i]$, $i = \{1, 2, \dots, n\}$, obtidas após o processo de fatiamento; a espessura t , que determina a distância em milímetros entre fatias; o ângulo de autossuporte α_c , medido em graus ($^\circ$), que limita quanto uma camada inferior suporta a superior sem a necessidade de suporte; e a densidade das imagens, que indica a quantidade de *pixels* contidos em uma polegada.

A saída do algoritmo consiste em n imagens, $O[i]$, sendo $i = \{1, 2, \dots, n\}$, inicializadas no passo 1 do Algoritmo 1, que contêm as regiões do objeto e os suportes acumulados até a fatia i . A fatia do topo ($F[n]$) do modelo é apenas copiada para a saída ($O[n]$), pois não há estrutura de suporte neste nível ($S[n]$ recebe vazio), conforme os passos 2 e 3, respectivamente. Em seguida, é feito o cálculo da projeção do ângulo de autossuporte (α_c) sobre o plano horizontal, obtendo a distância d . Esta distância, juntamente com o parâmetro dpi , determina a largura máxima de autossuporte (w_{\max}), medida em *pixels* (passo 5).

Algoritmo 1: SUPORTE-POR-IMAGENS-PARA-IMPRESSÃO-3D (F, t, α_c, dpi)

Entrada: Imagens binárias das fatias $F[1, 2, \dots, n]$.

 Espessura das camadas utilizada no fatiamento (t).

 Ângulo de autossuporte (α_c).

 Densidade de *pixels* das imagens (dpi).

Saída: Imagens das fatias com as regiões de objeto e suporte $O[1, 2, \dots, n]$.

```

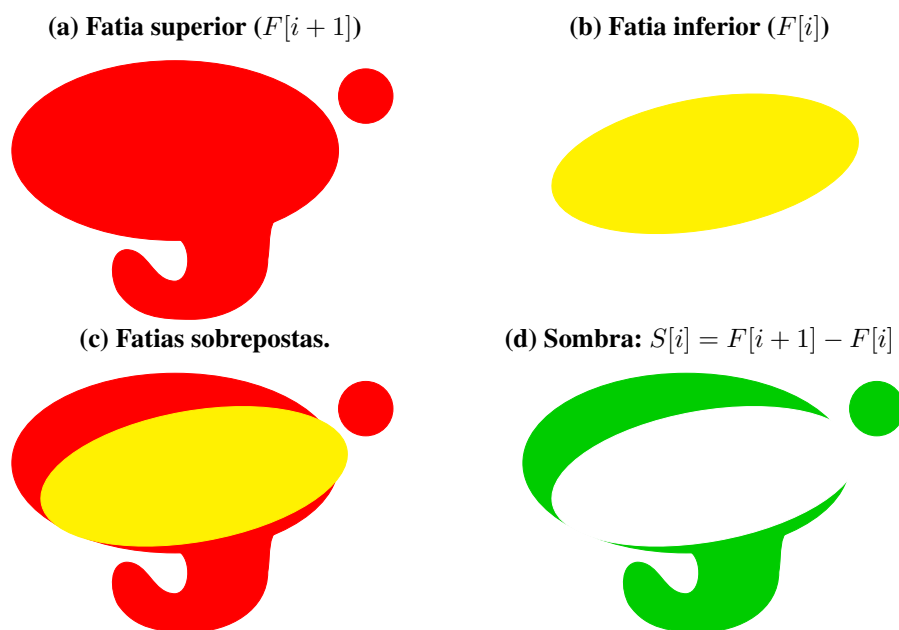
1 CRIAR-IMAGENS-VAZIAS ( $O[1, 2, \dots, n]$ );
2  $O[n] = F[n]$ ; /*A fatia do topo não possui suporte e é copiada para a saída*/
3  $S[n] = \emptyset$ ;
4  $d = t / \tan(\alpha_c)$ ; /*Projeção do ângulo de autossuporte no plano horizontal*/
5  $w_{\max} = \text{INTEIRO}(dpi * d / 25, 4)$ ;
6 para  $i = n - 1, \dots, 3, 2, 1$  faça
7    $S[i] = F[i + 1] - F[i]$ ; /*Subtração de imagens de fatias adjacentes.*/
8    $D = \text{BINARYMAP}(F[i], w_{\max})$ ; /*Imagem com os pixels distantes  $w_{\max}$  de  $F[i]$ */
9    $C[i] = \text{EXTRAIR-CONTORNO}(F[i])$ ;
10   $Q = \text{CRIAR-FILA-VAZIA}()$ ;
11  para cada pixel  $(x, y) \in C[i]$  faça
12    INSERIR-FILA ( $Q, [x, y]$ );
13  fim
14  enquanto  $Q \neq \emptyset$  faça
15     $(x, y) = \text{REMOVER-FILA}(Q)$ ;
16    para cada pixel  $(p, q) \in \text{VIZINHANÇA4}(x, y)$  faça
17      se  $S[i](p, q) = 1$  e  $D(p, q) = 1$  então
18        INSERIR-FILA ( $Q, [p, q]$ );
19        REMOVER-PIXEL ( $S[i], [p, q]$ );
20      fim
21    fim
22  fim
23   $S[i] = S[i] + S[i + 1]$ ;
24   $O[i] = F[i] + S[i]$ ;
25 fim

```

Como a fatia do topo do objeto 3D (imagem $F[n]$) já foi copiada para a saída, a pilha de imagens é processada a partir da penúltima fatia (imagem $F[n - 1]$) até a base (imagem $F[1]$), conforme o laço mostrado no passo 6. No passo 7 são identificadas as *regiões de sombra*,

regiões que pertencem a um suporte em potencial e que são geradas pela subtração de duas fatias consecutivas $F[i + 1]$ e $F[i]$. A Figura 11 ilustra a operação de subtração entre duas imagens coloridas para facilitar a compreensão. Na Figura 11(a), a porção vermelha representa o conteúdo da imagem da fatia superior, enquanto a porção amarela da Figura 11(b) indica a imagem da fatia inferior. A Figura 11(c) ilustra as duas fatias sobrepostas, e a Figura 11(d) mostra o resultado da operação de subtração. O resultado atribuído a $S[i]$ contém uma região candidata para suporte, chamada de região de sombra, que ainda será processada até consolidar a região de suporte.

Figura 11 – Subtração de duas imagens de fatias adjacentes para identificação de regiões potenciais para construção de suporte.

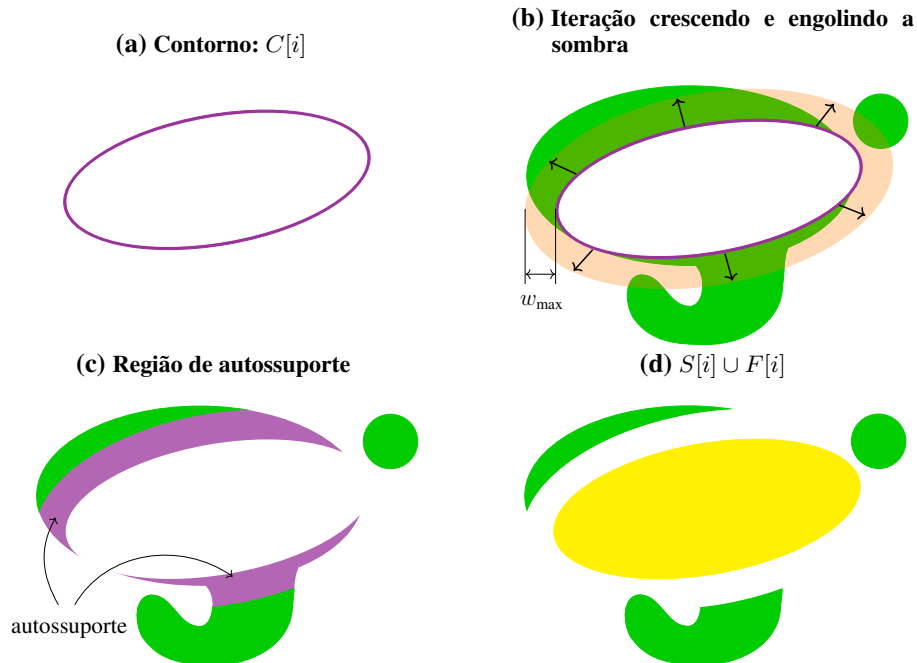


Fonte: Adaptado de Huang, Wang e Chen (2014)

No passo 8 é obtida uma imagem binária contendo *pixels* brancos em toda área a uma distância w_{\max} da borda de $F[i]$. Esta imagem determina a região de *offset*, que delimita até onde o contorno desta fatia pode crescer para eliminar partes da região de sombra. A imagem é gerada através do cálculo da distância euclidiana, de acordo com o algoritmo proposto por Danielsson (1980). O contorno das regiões de objeto presentes na fatia i são então extraídos, passo 9, conforme ilustrado na Figura 12(a), com o objetivo de utilizar os *pixels* pertencentes a estes contornos como sementes em uma busca em largura, semelhante ao que é realizado em um algoritmo de *watershed* (SZELISKI, 2010) para segmentação de imagens por inundação. A busca em largura é realizada através de uma estrutura de dados do tipo fila, inicializada no passo 10, e preenchida com as regiões de contorno nos passos 11–13. É importante notar que este processo de crescimento visa identificar regiões que são autossuportadas, ou seja, que estão

a uma distância máxima de w_{\max} *pixels* em relação aos objetos presentes na fatia $F[i]$, conforme detalhado na Seção 3.3 e exemplificado na Figura 12(b).

Figura 12 – Operações sobre a região de sombra para a obtenção do suporte.

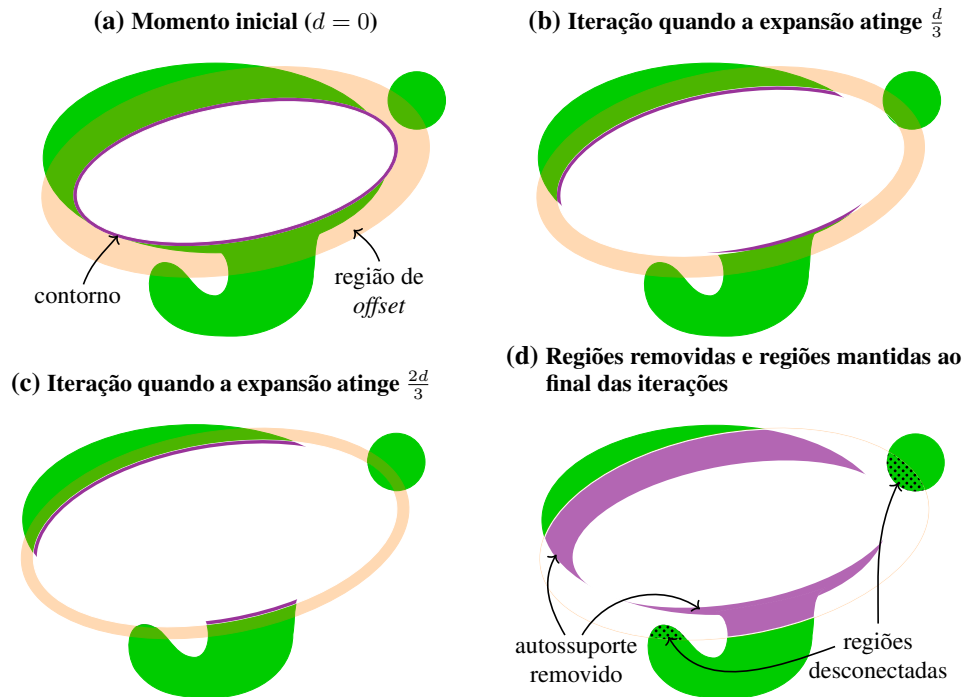


Fonte: Autoria própria.

No processo exploratório da busca em largura, passos 14–21, os *pixels* são então retirados da fila, passo 15, e a busca é expandida ao analisar *pixels* vizinhos daqueles presentes na região de contorno — nesse caso usamos uma vizinhança-4, ou seja, dado um *pixel* na coordenada (x,y) ele tem os vizinhos $(x-1,y)$ e $(x+1,y)$ na horizontal, e $(x,y-1)$ e $(x,y+1)$ na vertical — veja passo 16. Novos *pixels* são inseridos na fila desde que eles pertençam a uma região de sombra e estejam a uma distância menor que w_{\max} , condição mostrada no passo 17, sendo que este processo de expansão continua iterativamente até que uma dessas condições seja violada. Cada *pixel* identificado como pertencente a uma região de autossuporte é então retirado da região de sombra, conforme o passo 19, exemplificado na Figura 12(c). O processo de expansão com o uso de filas é detalhado na Figura 13 mostrando três momentos diferentes. O momento inicial é mostrado na Figura 13(a), onde observa-se o contorno da fatia $F[i]$, em violeta, e a região de *offset*, em laranja levemente transparente. Nas Figuras 13(b) e 13(c) são ilustrados os momentos em que a expansão atingiu respectivamente $1/3$ de w_{\max} e $2/3$ de w_{\max} . A Figura 13(d) representa em violeta as regiões de autossuporte que foram removidas durante as iterações.

As regiões hachuradas da Figura 13(d), apesar de se encontrarem dentro do perímetro de

Figura 13 – Processo de expansão para a remoção da região de autossuporte.



Fonte: Autoria própria.

autossuporte, não são removidas. Apenas regiões de sombra que estejam conectadas à fatia $F[i]$ podem ser autossuportadas, pois a ausência de material dos espaços entre as partes desconectadas faz com que elas necessitem, obrigatoriamente, de uma estrutura de suporte abaixo delas que proporcione uma fabricação adequada. Por este motivo, não é possível que seja feita uma única dilatação morfológica de largura w_{\max} de $F[i]$ e seja removido o resultado obtido da região de sombra, visto que isto causaria a remoção indevida das regiões hachuradas ilustradas na Figura 13(d). Este fato é apontado por Huang, Wang e Chen (2014), que propõem a realização de dilatações sucessivas para a determinação da região de autossuporte, corrigindo o erro que identificaram em outros estudos encontrados na literatura.

No passo 23, o suporte resultante da fatia é somado ao suporte acumulado provindo de fatias anteriores e, no passo 24, é criada a imagem de saída contendo as regiões de suporte e da peça. O resultado é exemplificado na Figura 12(d).

3.5 EFEITOS CAUSADOS PELA DISCRETIZAÇÃO

Características importantes observadas com a implementação e testes do algoritmo são que, dependendo do valor utilizado como ângulo de autossuporte no modelo 3D (cuja projeção sobre o plano horizontal equivale a w_{\max} nas fatias), da resolução das imagens das fatias e

das formas do modelo, ocorrem gerações de suportes indevidos em regiões autossuportadas. Isto acontece devido aos arredondamentos necessários na conversão dos polígonos obtidos do fatiamento para imagens em matrizes de *pixels*. Nessas conversões ocorre a transformação de valores reais para inteiros. Regiões do modelo 3D com inclinação levemente maior que o ângulo de autossuporte (α_c), que não necessitam de suporte, teoricamente deveriam gerar degraus de larguras menores que w_{max} . No entanto, eventualmente estas regiões apresentam larguras maiores ou iguais a w_{max} , o que leva a uma classificação incorreta da região como não suportada.

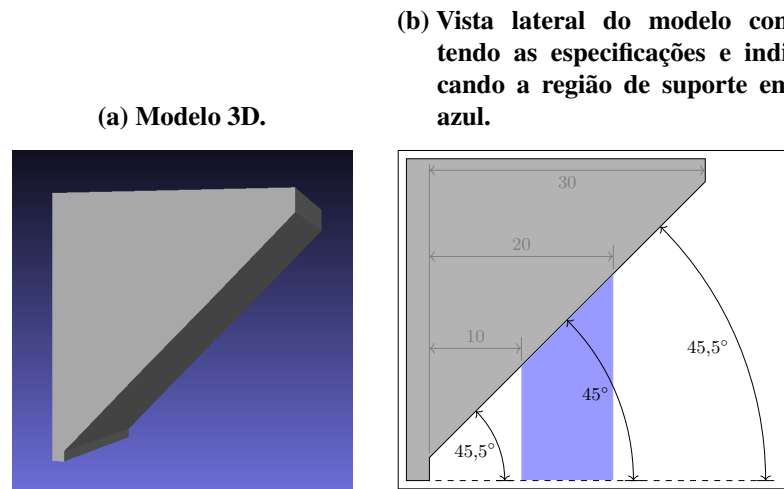
Huang, Wang e Chen (2014) informam que a largura dos *pixels* das imagens deve ser menor que a menor largura de partícula física fabricável pelo sistema e a resolução das imagens é definida de acordo com o valor desta largura. Para a categoria FDM, o estudo recomenda que sejam utilizados valores menores que 0,125mm para a obtenção de resultados satisfatórios. Isto significa que para um *pixel* ter largura menor que 0,125mm a resolução das imagens deve ser no mínimo 203,2 DPI, uma vez que pela Equação 3 tem-se

$$dpi = \frac{pix \times 25,4}{mm} = \frac{1 \times 25,4}{0,125} = 203,2. \quad (7)$$

Para verificar os efeitos da discretização sobre os processos de fatiamento e computação de regiões de suporte estudados, foram escolhidos modelos que possuem superfícies inclinadas bem definidas e com ângulos bem próximos ao ângulo de autossuporte utilizado como parâmetro ($\alpha_c = 45^\circ$). O primeiro modelo, ilustrado na Figura 14(a), apresenta uma de suas faces laterais com inclinação alternando entre os ângulos de 45° e $45,5^\circ$. De acordo com a definição de autossuporte, as regiões com ângulo menor ou igual a α_c devem possuir suporte, enquanto as regiões de ângulo maior são consideradas autossuportadas e não necessitam de suporte. Desta forma, conforme a vista lateral do modelo, na Figura 14(b), que indica os ângulos de inclinação, a região de suporte deve ser aquela destacada em azul, correspondendo a 45° .

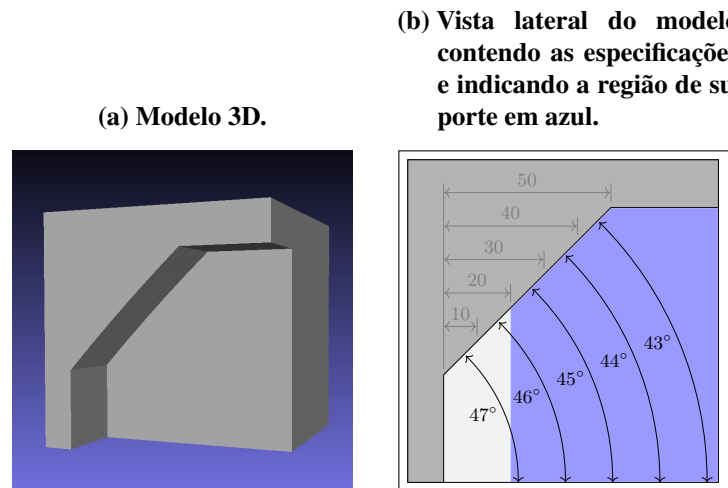
Outro exemplo com regiões de suporte bem definidas pode ser observado na Figura 15. Este modelo também apresenta inclinações com ângulos próximos ao valor de $\alpha_c = 45^\circ$, variando de 43° a 47° , além de possuir uma região suspensa horizontal ($\theta = 0^\circ$). Na Figura 15(a) é apresentado o modelo 3D e na Figura 15(b) é exibida a vista lateral com a especificação do modelo, indicando cada ângulo formado na superfície inclinada e em quais partes espera-se que o algoritmo gere suporte (em azul).

Figura 14 – Modelo contendo uma face inclinada com ângulos de 45° e $45,5^\circ$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Modelo contendo uma face inclinada com ângulos de 43° a 47° .



Fonte: Autoria própria.

3.6 ESTUDO DA RESOLUÇÃO DAS IMAGENS DAS FATIAS

Conforme mencionado na Seção 3.5, foram identificados três fatores que têm grande influência na ocorrência de regiões de suporte indesejadas: o ângulo de autossuporte, a resolução e a forma do modelo. Todos estão relacionados entre si, pois quanto mais próximas as formas do modelo estiverem do valor do ângulo de autossuporte, maior deve ser a resolução necessária para que as falhas não ocorram. A representação de uma superfície inclinada, quando convertida para imagens em *pixels*, sofrerá o efeito degrau de escada (ver Figura 7). Desta forma, o cálculo das larguras w dos degraus pode ser realizado pela combinação das Equações 3 e 6:

$$w_\theta = \frac{\frac{dpi \times t_{mm}}{25,4}}{\tan \theta}. \quad (8)$$

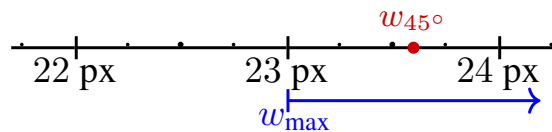
Para demonstrar o impacto da resolução das imagens na ocorrência de falhas, serão

demonstrados os cálculos das larguras dos degraus de algumas superfícies inclinadas com os seguintes parâmetros iniciais: espessura das fatias $t_{mm} = 2$; resolução das imagens com $dpi = 300$; e ângulo de autossuporte $\alpha_c = 45^\circ$. Substituindo estes valores na Equação 8 obtém-se

$$w_{45^\circ} = \frac{\frac{dpi \times t_{mm}}{25,4}}{\tan \alpha_c} = \frac{300 \times 2}{25,4 \times \tan 45^\circ} = 23,62 \text{ pixels.} \quad (9)$$

Isto significa que os degraus que compõem a superfície de 45° devem possuir 23,62 *pixels* de largura. Como o *pixel* é indivisível, é necessário aproximar este valor real para os inteiros mais próximos, ou seja, esta superfície deverá ser composta por alguns degraus de largura 23 e outros de 24 *pixels*, alternadamente, de forma que a sua representação aproxime-se de uma escada hipotética de degraus de largura 23,62 *pixels*. Como esta inclinação é o ângulo de autossuporte, o valor da largura encontrada é a largura máxima de autossuporte, w_{max} , que deverá ser sempre o inteiro inferior, isto é, o truncamento do valor calculado, para que todos os degraus deste ângulo entrem no critério para que possuam suportes, ou seja, $w_{max} = 23$. A Figura 16 mostra em vermelho a posição da largura w_{45° em uma escala contínua e, em azul, é ressaltada a posição de w_{max} , que deve ser o valor inteiro limiar para a determinação das larguras dos degraus autossuportados e os que necessitarão de suporte, detalhado na Seção 3.2. A Figura 17(a) ilustra os degraus para esta inclinação, apresentando na parte inferior as medidas das larguras dos degraus e, em azul, as larguras maiores ou iguais à largura máxima de autossuporte ($w \geq 23$). Nota-se que todas as larguras indicam a necessidade de suporte, o que está correto, pois esta região tem 45° .

Figura 16 – Larguras dos degraus para $\alpha_c = 45^\circ$ e 300 DPI em uma escala contínua.

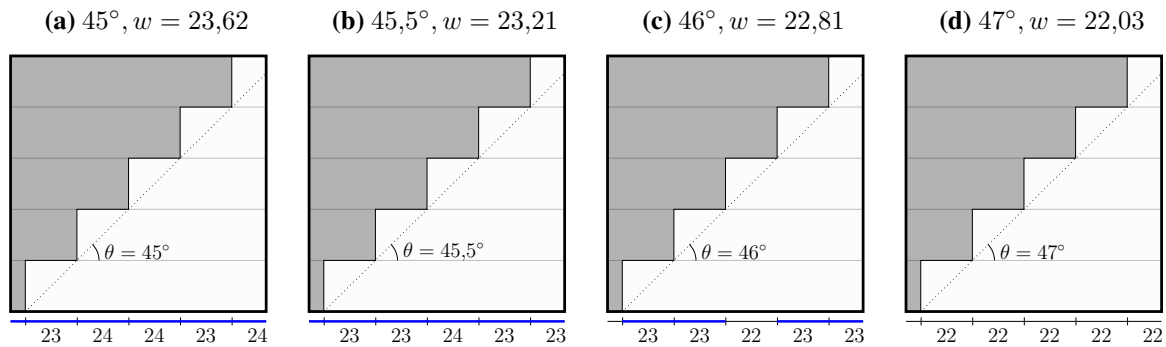


Fonte: Autoria própria.

De modo análogo, o cálculo das larguras dos degraus de inclinação levemente maiores que α_c , sendo $\theta = 45,5^\circ, 46^\circ$ e 47° , podem ser feitos de acordo com as Equações 10, 11 e 12, respectivamente:

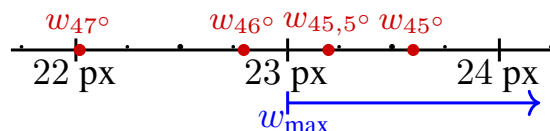
$$w_{45,5^\circ} = \frac{300 \times 2}{25,4 \times \tan 45,5^\circ} = 23,21 \text{ pixels} \quad (10)$$

$$w_{46^\circ} = \frac{300 \times 2}{25,4 \times \tan 46^\circ} = 22,81 \text{ pixels} \quad (11)$$

Figura 17 – Larguras dos degraus em *pixels* para 300 DPI.

$$w_{47^\circ} = \frac{300 \times 2}{25,4 \times \tan 47^\circ} = 22,03 \text{ pixels.} \quad (12)$$

Desta maneira, os degraus que compõem a superfície de inclinação de $45,5^\circ$ do modelo da Figura 14 possuem larguras de 23 e 24 *pixels*. Isto pode ser notado na Figura 18, pois o ponto vermelho, que representa $w_{45,5^\circ}$, está posicionado entre 23 e 24 na escala contínua. Como estes valores se enquadram no critério $w \geq w_{\max}$, toda região de $45,5^\circ$ será equivocadamente classificada como necessitando de suporte, conforme observado na Figura 17(b). Para a inclinação de 46° , Figura 17(c), as larguras dos degraus oscilam entre 22 e 23 e, desta forma, alguns degraus de 23 *pixels* também se enquadram incorretamente como regiões que precisam de suporte. Para 47° , conforme ilustrado na Equação 12 e na Figura 17(d), nota-se que a parte decimal do valor é pequena, mas ainda o deixa entre 22 e 23 *pixels*, o que permite supor que há a possibilidade da ocorrência de um degrau de largura 23, que acarretaria falha para esta inclinação. Sob a perspectiva da escala contínua, Figura 18, tanto w_{46° quanto w_{47° podem ser observados abaixo de 23 *pixels*, no entanto, ao sofrerem a discretização, não se pode descartar a possibilidade de que algum de seus degraus venha a ter largura de acordo com o critério $w \geq w_{\max}$, o que geraria falha.

Figura 18 – Larguras dos degraus para 300 DPI em uma escala contínua.

Deste modo, infere-se que, para os ângulos avaliados, a utilização da resolução de 300 DPI só é possível se o modelo não possuir regiões inclinadas entre os ângulos de 45° e 47° . Caso contrário, poderá haver a geração de suportes em regiões indevidas. O aumento da densidade de

pixels das imagens pode eliminar a ocorrência destas falhas, contudo, isto dependerá das formas do modelo, pois, conforme forem as inclinações das suas superfícies, haverá a necessidade de uma resolução muito alta. De acordo com a resolução necessária para evitar falhas, o impacto no uso de memória e no tempo despendido nas operações sobre imagens pode tornar impraticável que a resolução seja utilizada.

Aumentando a resolução para 600 DPI, são obtidos os seguintes valores, em *pixels*, para as larguras dos degraus nos mesmos ângulos: $w_{45^\circ} = 47,24$, $w_{45,5^\circ} = 46,43$, $w_{46^\circ} = 45,62$ e $w_{47^\circ} = 44,06$. O valor da largura máxima de autossuporte neste caso é $w_{\max} = 47$. É possível notar que para $45,5^\circ$, poderão ocorrer degraus com largura 47 *pixels*, que indicarão a geração de suportes incorretamente. Já para os ângulos de 46° e 47° , a chance disto ocorrer é praticamente nula.

Os estudos realizados permitem afirmar que, sendo α_c o ângulo de autossuporte e β_c o menor ângulo, maior que α_c , apresentado por alguma face da malha triangular do modelo, a diferença entre as larguras dos degraus destes ângulos deve ser de, no mínimo, 2 *pixels*, ou seja, $w_{\alpha_c} - w_{\beta_c} \geq 2$. Deste modo, pode-se obter o valor da resolução recomendada para a geração das imagens das fatias e para o processamento das regiões de suporte através das seguintes equações:

$$w_{\alpha_c} = \frac{\frac{dpi \times t_{mm}}{25,4}}{\tan \alpha_c}, \quad (13)$$

$$w_{\beta_c} = \frac{\frac{dpi \times t_{mm}}{25,4}}{\tan \beta_c}, \quad (14)$$

$$w_{\alpha_c} - w_{\beta_c} = 2. \quad (15)$$

Combinando estas equações e isolando *dpi* obtém-se que

$$\frac{\frac{dpi \times t_{mm}}{25,4}}{\tan \alpha_c} - \frac{\frac{dpi \times t_{mm}}{25,4}}{\tan \beta_c} = 2 \quad (16)$$

$$dpi = \frac{\frac{2 \times 25,4}{t_{mm}}}{\frac{1}{\tan \alpha_c} - \frac{1}{\tan \beta_c}}. \quad (17)$$

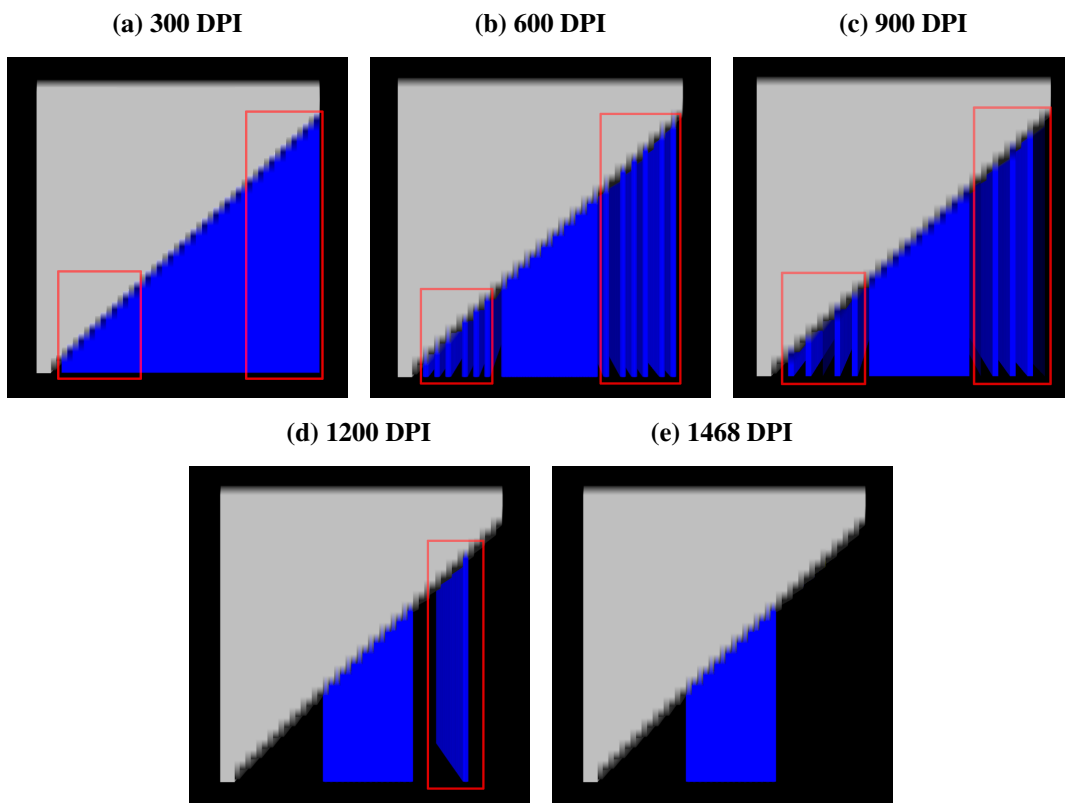
Para o modelo da Figura 14, com $\alpha_c = 45^\circ$ e $\beta_c = 45,5^\circ$, o valor da resolução recomendada para que não haja identificação de regiões de suporte indevidos seria portanto

$$dpi = \frac{\frac{2 \times 25,4}{2}}{\frac{1}{\tan 45} - \frac{1}{\tan 45,5}} = [1467,98] = 1468. \quad (18)$$

Nota-se que como a diferença entre a largura dos degraus das inclinações α_c e β_c deve ser maior que 2, a resolução deverá ser maior que o valor calculado, ou seja, obtém-se o teto do valor calculado.

Isto mostra que, para resoluções inferiores a 1468 DPI, o modelo da Figura 14 poderá apresentar falhas. A Figura 19(a) foi obtida a partir do processamento das fatias do modelo apresentado na Figura 14(a), utilizando-se os parâmetros $t_{mm} = 2$, $\alpha_c = 45^\circ$ e resolução $dpi = 300$. Aumentando gradativamente este último parâmetro para $dpi = 600$, 900 e 1200, são ilustrados os respectivos resultados nas Figuras 19(b)–19(d) destacando-se em vermelho as regiões de suporte excedentes, classificadas incorretamente devido aos problemas de discretização ocorridos. Configurando o algoritmo para o valor $dpi = 1468$, foi obtido o resultado ilustrado na Figura 19(e), com a determinação correta da região de suporte.

Figura 19 – Suportes gerados em região autossuportada no modelo da Figura 14.



Fonte: Autoria própria.

Para a aferição do volume da região identificada como necessitante de suporte, foram contadas as quantidades de *pixels* azuis produzidos e calculados seus percentuais em excesso para cada resolução executada. Conforme pode ser observado na Tabela 1, o volume em excesso para 300 DPI foi de 177,3% do volume produzido corretamente. Conforme a resolução foi aumentando, as falhas foram diminuindo e, portanto, os volumes excedentes ao necessário

também diminuíram, caindo para 88,2% quando utilizada a resolução de 600 DPI, para 42,7% utilizando-se 900 DPI e para 6,6% ao utilizar 1200 DPI.

Tabela 1 – Percentual da quantidade de suporte produzido incorretamente de acordo com a Figura 19.

Resolução	300 DPI	600 DPI	900 DPI	1200 DPI
Suporte em excesso	177,3%	88,2%	42,7%	6,6%

Fonte: Autoria própria

De maneira semelhante, é ilustrada na Figura 20(a) a geração de suporte em uma região de ângulo maior que o ângulo de autossuporte. Quando executado o algoritmo com as imagens de entrada do modelo na Figura 15(a), também com a espessura das fatias $t_{mm} = 2$, ângulo de autossuporte $\alpha_c = 45^\circ$ e com resolução de 300 DPIs, ocorrem diversas situações condizentes com o critério de suporte em inclinações maiores que o ângulo de autossuporte, gerando, portanto, suportes indesejados. Para o cálculo da resolução mais apropriada para as características deste modelo, cujo ângulo mais próximo maior do que o valor de α_c é $\beta_c = 46^\circ$, tem-se

$$dpi = \frac{\frac{2 \times 25,4}{2}}{\frac{1}{\tan 45} - \frac{1}{\tan 46}} = [740,28] = 741. \quad (19)$$

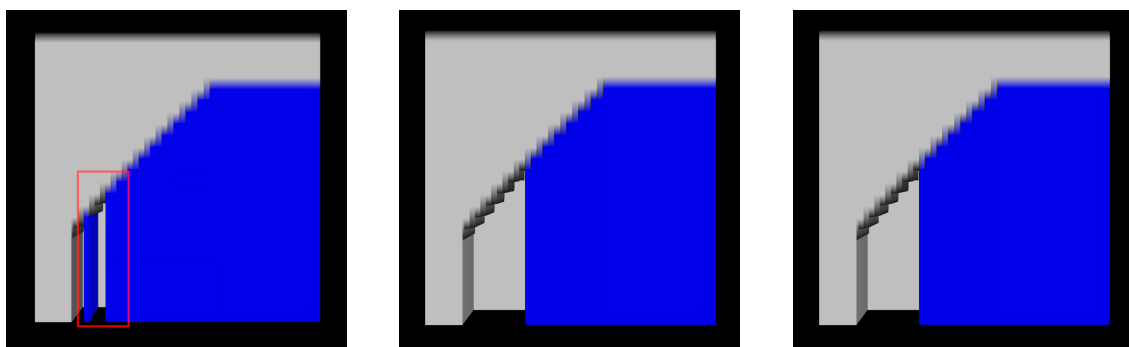
Embora o resultado da execução utilizando-se a resolução de 600 DPI, ilustrado na Figura 20(b), não tenha gerado falhas, os cálculos indicam que a resolução mínima segura para ser utilizada seria $dpi = 741$, conforme a Figura 20(c).

Figura 20 – Suportes gerados em região autossuportada no modelo da Figura 15.

(a) 300 DPI

(b) 600 DPI

(c) 741 DPI



Fonte: Autoria própria.

Fazendo-se a aferição do volume da região de suporte identificada incorretamente para a resolução de 300 DPI, foi constatado que foram gerados 7,2% de suporte a mais do que o necessário, conforme a Tabela 2. Tanto esta, quanto a análise exposta na Tabela 1, mostram a importância da solução do problema causado pela discretização das imagens para evitar que ocorra a produção de suporte além do necessário.

Tabela 2 – Percentual da quantidade de suporte produzido incorretamente de acordo com a Figura 20.

Resolução	300 DPI
Suporte em excesso	7,2%

Fonte: Autoria própria

A utilização do cálculo da determinação da resolução mínima está condicionada a sabermos o ângulo β_c do modelo de entrada. Quanto mais próximo este valor estiver de α_c , maior será a resolução, podendo tornar inviável o uso das imagens, dependendo destes ângulos. Para exemplificar o aumento no valor da resolução de acordo com a aproximação entre as inclinações da superfície, foram feitos cálculos para $\alpha_c = 45^\circ$ e β_c com os valores de $45,4^\circ$ e $45,3^\circ$:

$$dpi = \frac{\frac{2 \times 25,4}{2}}{\frac{1}{\tan 45} - \frac{1}{\tan 45,4}} = [1831,81] = 1832 \quad (20)$$

$$dpi = \frac{\frac{2 \times 25,4}{2}}{\frac{1}{\tan 45} - \frac{1}{\tan 45,3}} = [2438,2] = 2439. \quad (21)$$

Quanto maior a densidade das imagens, maior será o tempo de processamento e o uso de memória. Por mais que se busque sua otimização, e até a utilização de processamentos paralelos, podem existir modelos que exijam uma concentração de *pixels* por polegada tão elevada que provoque dificuldades, inclusive para as máquinas mais eficientes. Deste modo, buscou-se uma nova metodologia que melhorasse a integração entre as etapas de fatiamento e a computação das regiões de suporte, transportando a informação sobre os ângulos dos triângulos na malha do modelo para as fatias.

3.7 MELHORIA NO PROCESSO DE FATIAMENTO

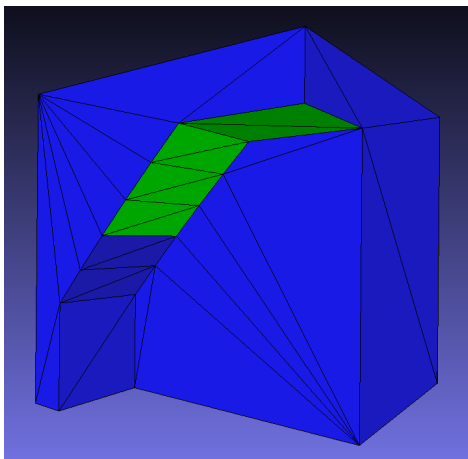
O processo de fatiamento foi modificado para que pudesse ser melhor integrado com o método de computação de regiões de suporte desenvolvido. A modificação faz com que as informações dos ângulos dos triângulos na malha do modelo sejam passadas para os contornos das fatias, e delas cheguem às imagens resultantes da sua conversão. A implementação do fatiamento foi feita sobre o algoritmo de (MINETTO *et al.*, 2017), em que, dado determinado plano horizontal de fatiamento, para cada segmento de contorno definido pela interseção entre o plano e uma face triangular, foi armazenado o ângulo de inclinação do triângulo.

Na Figura 21(a) é ilustrado o modelo 3D com os triângulos que compõem a sua superfície. Foram destacados em azul os triângulos que possuem inclinação maior que 45° , autossuportados, e em verde as faces de ângulo menor ou igual a 45° , que necessitam de suporte.

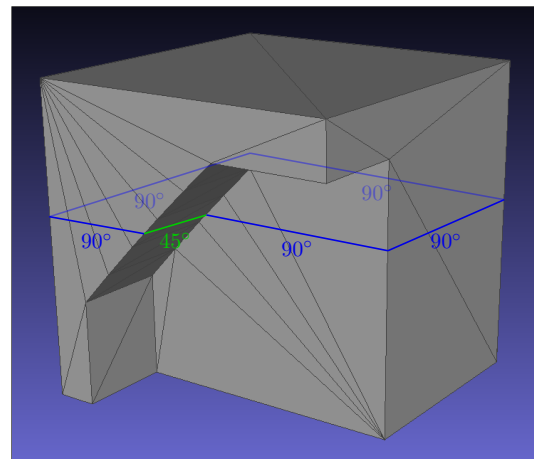
A Figura 21(b) apresenta o mesmo modelo, sob outra perspectiva, com destaque para os contornos da interseção de um plano horizontal e os ângulos correspondentes aos triângulos que pertencem. Na Figura 21(c) estão representados os segmentos, delimitados por cada triângulo intersectado, que formam um polígono bidimensional (2D). Para a criação das imagens foi considerado se um determinado segmento tem ângulo maior que o ângulo de autossuporte ou se seu ângulo é menor ou igual. Desta maneira, a solução implementada foi gerar dois conjuntos de imagens binárias como saída do fatiamento: um com as imagens das partes da fatia preenchidas e o fundo sem preenchimento, como já ocorria anteriormente (Figura 21(d)), e outro com as imagens dos contornos dos segmentos referentes aos ângulos maiores que o ângulo de autossuporte preenchidos (Figura 21(e)). Estes dois conjuntos de imagens são usados na etapa de computação das regiões de suporte.

Figura 21 – Detalhamento da inclusão do ângulo no processo de fatiamento.

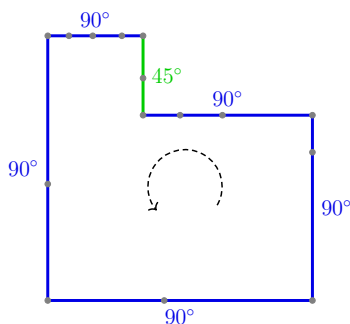
(a) Modelo em malhas triangulares com as faces autossuportadas em azul e as que necessitam de suporte em verde.



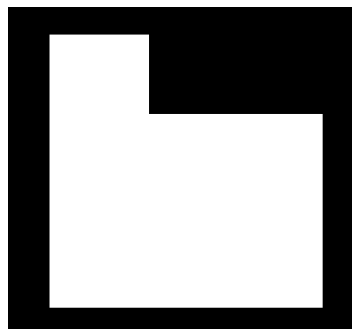
(b) Fatia no modelo 3D com as informações dos ângulos.



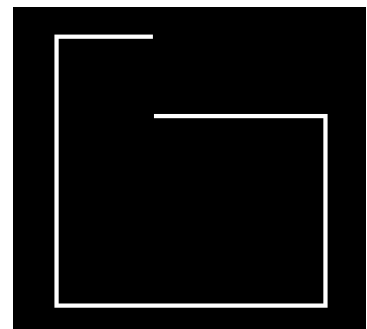
(c) Fatia 2D com as representações dos segmentos e ângulos.



(d) Imagem binária 2D da fatia.



(e) Imagem binária 2D do contorno autossuportado da fatia.



Fonte: Autoria própria.

3.8 COMPUTAÇÃO DAS REGIÕES DE SUPORTE ATRAVÉS DE IMAGENS COM INDICAÇÕES DOS ÂNGULOS DOS CONTORNOS

O método para a computação das regiões de suporte, do Algoritmo 1, foi ajustado para que sejam aproveitadas as novas informações trazidas nas imagens, que são as bordas referentes às regiões autossuportadas. As operações continuam sendo feitas a cada par de fatias adjacentes e no sentido do topo para a base. O Algoritmo 2 apresenta as alterações realizadas destacadas em amarelo e a Figura 22 ilustra os novos passos para a obtenção da região de suporte. A primeira diferença é que o novo algoritmo recebe o parâmetro $C[1,2,\dots,n]$, contendo as imagens em que os *pixels* brancos indicam os contornos referentes às faces autossuportadas do modelo 3D (Figura 21(e)). As operações com os pares de fatias adjacentes iniciam-se com a diferença entre as fatias, conforme o passo 7 e as ilustrações das Figuras 22(a)–22(d). Novamente, foram utilizadas cores para facilitar as identificações de cada parte. A fatia superior ($F[i+1]$) está estampada em vermelho, a inferior ($F[i]$) em amarelo e o resultado da diferença em verde (região de sombra). No passo 8 é obtida a imagem contendo *pixels* brancos na região de *offset*, D . Esta área é composta por todos os *pixels* distantes de até $w_{\max} + 2$ de $C[i]$. Estes elementos estão representados na Figura 22(e). O aumento de 2 *pixels* na largura da região de *offset* é necessário para evitar os efeitos da discretização, descritos nas Seções 3.5 e 3.6, de forma a não depender do valor utilizado para a resolução das imagens. Também a partir do contorno $C[i]$, são feitas as expansões graduais e remoções das sombras que se encontram dentro da região de autossuporte, lembrando que a região de autossuporte é a região que a fatia inferior é capaz de sustentar a fatia superior, no entanto, ela não pode ser removida de uma só vez pois podem haver partes não conectadas nesta região que precisarão de suporte. Na Figura 22(f) são mostradas a região de suporte (em verde) e a porção removida da sombra (em violeta). A Figura 22(g) ilustra todas as partes relevantes da iteração i , sendo a fatia $F[i]$, em amarelo, o suporte atual $S[i]$, em verde, e o suporte obtido dos processamentos anteriores $S[i+1]$, em azul. O resultado da imagem de saída do algoritmo é demonstrado na Figura 22(h), onde a fatia está representada em branco e a região de suporte em azul.

Algoritmo 2: SUPORTE-POR-IMAGENS-PARA-IMPRESSÃO-3D (F, C, t, α_c, dpi)

Entrada: Imagens binárias das fatias $F[1,2,\dots,n]$.

Imagens binárias dos contornos autossuportados das fatias $C[1,2,\dots,n]$.

Espessura das camadas utilizada no fatiamento (t).

Ângulo de autossuporte (α_c).

Densidade de *pixels* das imagens (dpi).

Saída: Imagens das fatias com as regiões de objeto e suporte $O[1,2,\dots,n]$

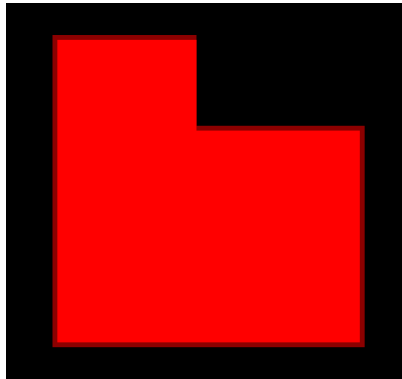
```

1 CRIAR-IMAGENS-VAZIAS ( $O[1,2,\dots,n]$ );
2  $O[n] = F[n]$ ; /*A fatia do topo não possui suporte e é copiada para a saída*/
3  $S[n] = \emptyset$ ;
4  $d = t / \tan(\alpha_c)$ ; /*Projeção do ângulo de autossuporte no plano horizontal*/
5  $w_{\max} = \text{INTEIRO}(dpi * d / 25,4)$ ;
6 para  $i = n - 1, \dots, 3, 2, 1$  faça
7    $S[i] = F[i + 1] - F[i]$ ; /*Subtração de imagens de fatias adjacentes.*
8    $D = \text{BINARYMAP}(C[i], w_{\max} + 2)$ ; /*Imagem com os pixels distantes ( $w_{\max} + 2$ ) de  $C[i]$ */
9    $Q = \text{CRIAR-FILA-VAZIA}()$ ;
10  para cada pixel  $(x,y) \in C[i]$  faça
11    INSERIR-FILA ( $Q, [x, y]$ );
12  fim
13  enquanto  $Q \neq \emptyset$  faça
14     $(x, y) = \text{REMOVER-FILA}(Q)$ ;
15    para cada pixel  $(p,q) \in \text{VIZINHANÇA4}(x,y)$  faça
16      se  $S[i](p,q) = 1$  e  $D(p,q) = 1$  então
17        INSERIR-FILA ( $Q, [p, q]$ );
18        REMOVER-PIXEL ( $S[i], [p, q]$ );
19      fim
20    fim
21  fim
22   $S[i] = S[i] + S[i + 1]$ ;
23   $O[i] = F[i] + S[i]$ ;
24 fim

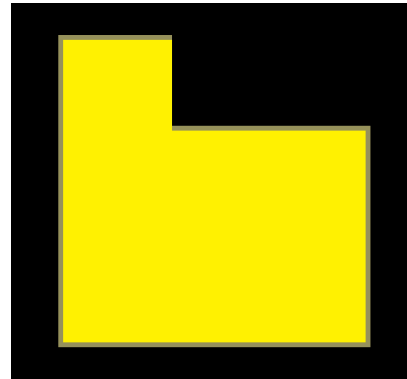
```

Figura 22 – Computação de regiões de suportes com ângulos.

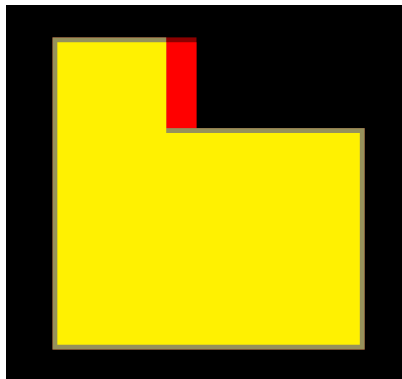
(a) Fatia superior ($F[i + 1]$).



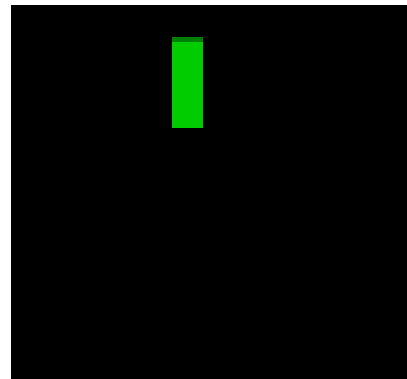
(b) Fatia inferior ($F[i]$).



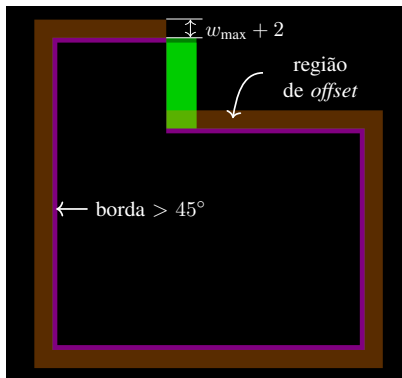
(c) Fatias sobrepostas.



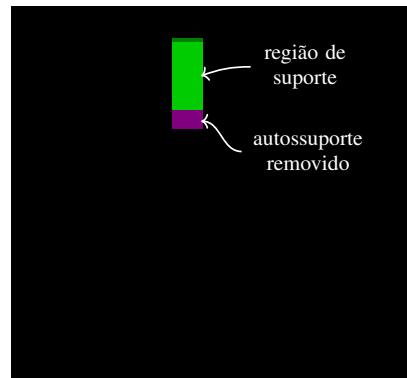
(d) Sombra: $S[i] = F[i + 1] - F[i]$



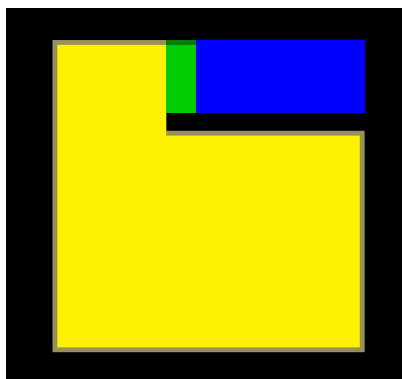
(e) Região de *offset*.



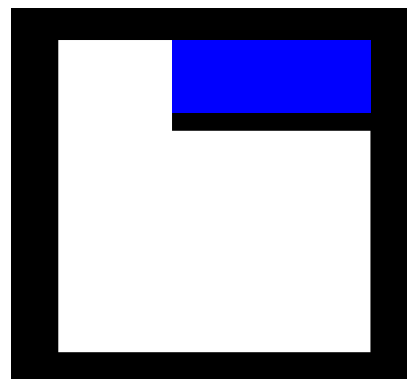
(f) Região de suporte: $S[i]$



(g) $F[i]$ (amarelo), $S[i]$ (verde) e $S[i + 1]$ (azul).



(h) Saída: $F[i]$ (branco) + $S[i]$ (azul)



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

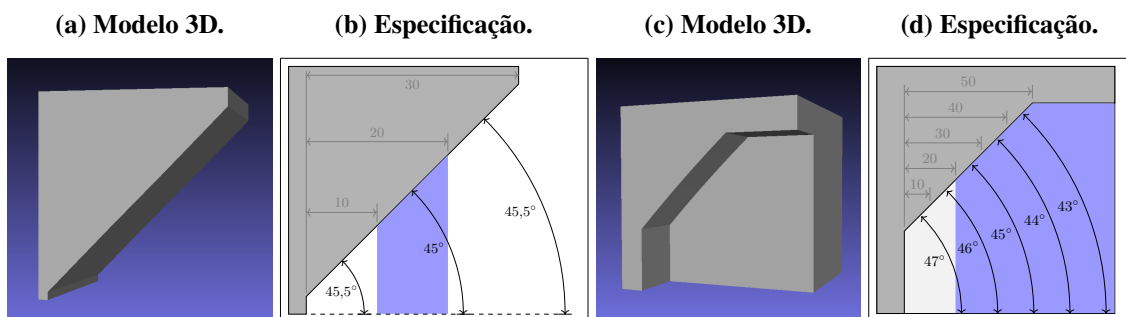
Neste capítulo são inicialmente descritos, na Seção 4.1, alguns experimentos realizados para verificar a identificação de regiões de suporte conforme o método proposto. Na Seção 4.2, é apresentada uma discussão de como utilizar as regiões de suporte identificadas para gerar estruturas de suporte em forma de colunas. Estas formas podem ser facilmente obtidas a partir das imagens com simples operações com máscaras binárias. A implementação dos algoritmos foi feita usando a linguagem *Python* (versão 3.8.5) e a biblioteca de visão computacional *OpenCV* (versão 4.2.0).

4.1 VERIFICAÇÃO DAS REGIÕES DE SUPORTE

Para a verificação da identificação de regiões de suporte, foram inicialmente utilizados alguns modelos cuja geometria é bem definida e conhecida. Desta forma, os ângulos em cada fatia podem ser identificados com precisão e é possível comparar, objetivamente, as regiões onde estruturas de suporte são necessárias. Também foram utilizados modelos de formas mais orgânicas para observar o comportamento da implementação em objetos com características mais complexas. Nestes modelos, a verificação da correta geração de suporte foi realizada comparando os registros dos ângulos de cada segmento dos contornos das fatias com as imagens de saída da computação de cada fatia. Nos experimentos desta seção, os parâmetros para o método foram: resolução de 300 DPI, largura de fatia de 2mm e ângulo de autossuporte de 45° .

Na Figura 23 são mostrados dois modelos cuja especificação dos ângulos de suas faces são conhecidas. Ao lado de cada modelo é apresentada a descrição dos ângulos e a região esperada de suporte nas faces inclinadas que foram comparadas com a saída do método proposto.

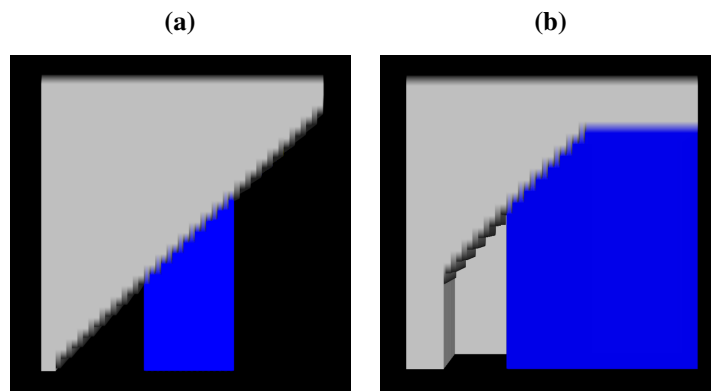
Figura 23 – Modelos com geometria conhecida usados nos experimentos.



Fonte: Autoria própria.

A Seção 3.5 reportou falhas na identificação das regiões de suporte para estes modelos quando usada uma resolução de 300 DPI. Após as implementações das melhorias propostas nas Seções 3.7 e 3.8, a execução do algoritmo gerou os resultados de acordo com as Figuras 24(a) e 24(b), respectivamente. Observa-se que foram identificadas corretamente as regiões onde o suporte deve ser gerado, pois estão em conformidade com as documentações especificadas nas Figuras 23(b) e 23(d).

Figura 24 – Geração das regiões de suporte para modelos bem definidos.



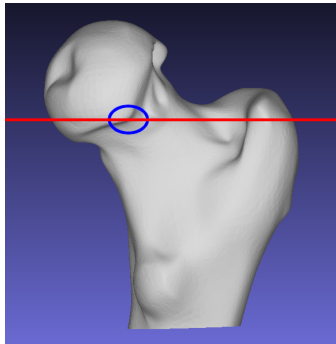
Fonte: Autoria própria.

Para o experimento com um modelo de formas orgânicas, foi usada a malha triangular de um fêmur, mostrado na Figura 25(a). Como este modelo não possui uma documentação com os ângulos de cada parte de sua superfície, para verificar se as identificações das regiões que necessitam de suporte foram feitas adequadamente, foi necessário apurar os ângulos dos segmentos que formam os contornos do objeto para cada polígono obtido do fatiamento. A linha vermelha da Figura 25(a) indica a localização do corte de um plano sobre o modelo e em azul foi destacada a área desta fatia onde ocorrem inclinações menores ou iguais a 45° , que necessitam de suporte. A Figura 25(b) mostra o contorno obtido do fatiamento sobre a linha vermelha e a Figura 25(c) representa o polígono convertido em imagem 2D. Com a melhoria implementada no processo de fatiamento, foi possível selecionar alguns segmentos para a identificação dos seus ângulos, ilustrados na Figura 25(d), permitindo então a conferência se a geração dos suportes ocorreu nas regiões corretas, conforme a região em azul na Figura 25(e).

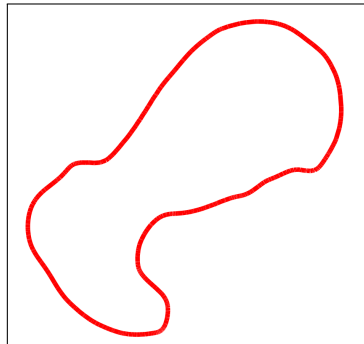
A fatia adjacente seguinte, abaixo da representada na Figura 25, também apresenta segmentos de ângulos menores que o ângulo de autossuporte e foram classificados como regiões que necessitam de suporte corretamente. Na Figura 26(a) são ilustrados os ângulos de alguns segmentos do contorno e na Figura 26(b) é mostrada a imagem da fatia com a região de suporte calculada somada à região de suporte acumulada dos processamentos anteriores. Foi feita a

Figura 25 – Identificação das regiões de suporte de uma fatia de um modelo orgânico.

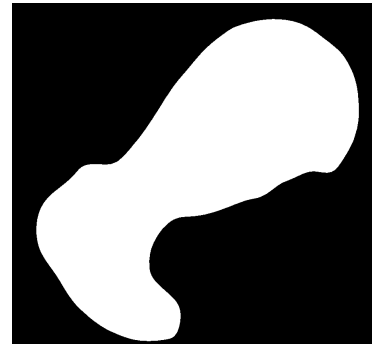
(a) Modelo 3D com a indicação da região de corte.



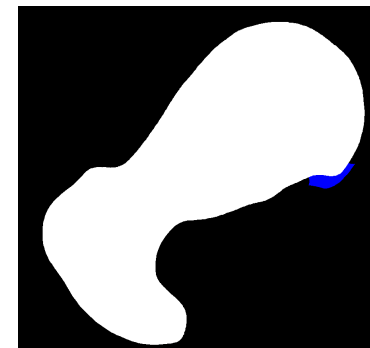
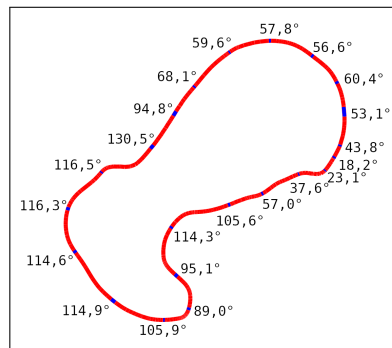
(b) Polígono da fatia.



(c) Imagem da fatia.



(d) Indicação dos ângulos de alguns segmentos do contorno.



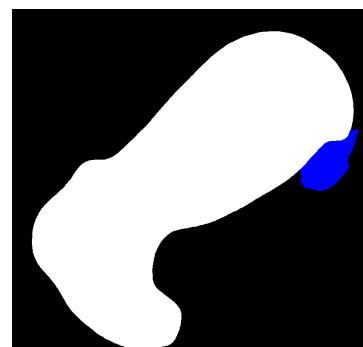
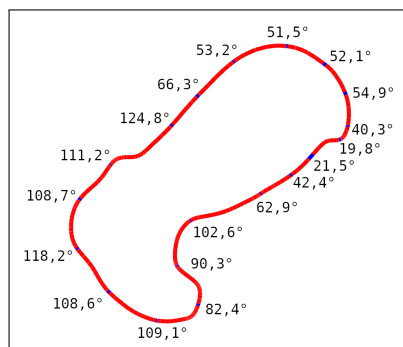
(e) Imagem da fatia com suporte.

Fonte: Autoria própria.

conferência de todas as fatias de acordo com esta descrição, confirmando o funcionamento adequado da implementação do algoritmo proposto.

Figura 26 – Conferência das regiões de suporte de acordo com os ângulos dos segmentos.

(a) Indicação dos ângulos de alguns segmentos do contorno.



(b) Imagem da fatia com suporte.

Fonte: Autoria própria.

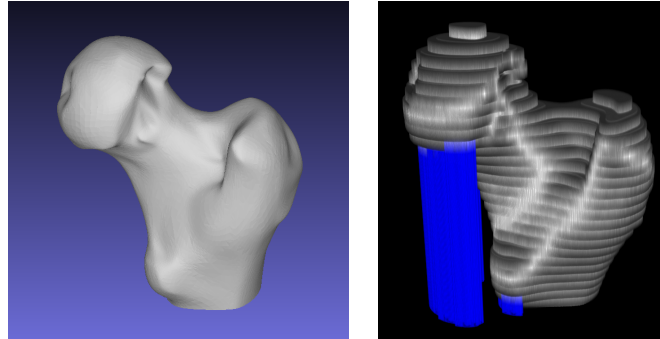
Ao final da execução, foi gerada uma saída conforme a Figura 27(b), que mostra o empilhamento das imagens obtidas com a espessura determinada no processo de fatiamento, de maneira a simular como ficaria o resultado da fabricação física após todos estes processos. Ao

lado, a Figura 27(a) mostra o modelo 3D para facilitar a identificação de cada parte.

Figura 27 – Geração de suporte no modelo da cabeça do osso fêmur.

(a) Modelo 3D.

(b) Resultado.



Fonte: Autoria própria.

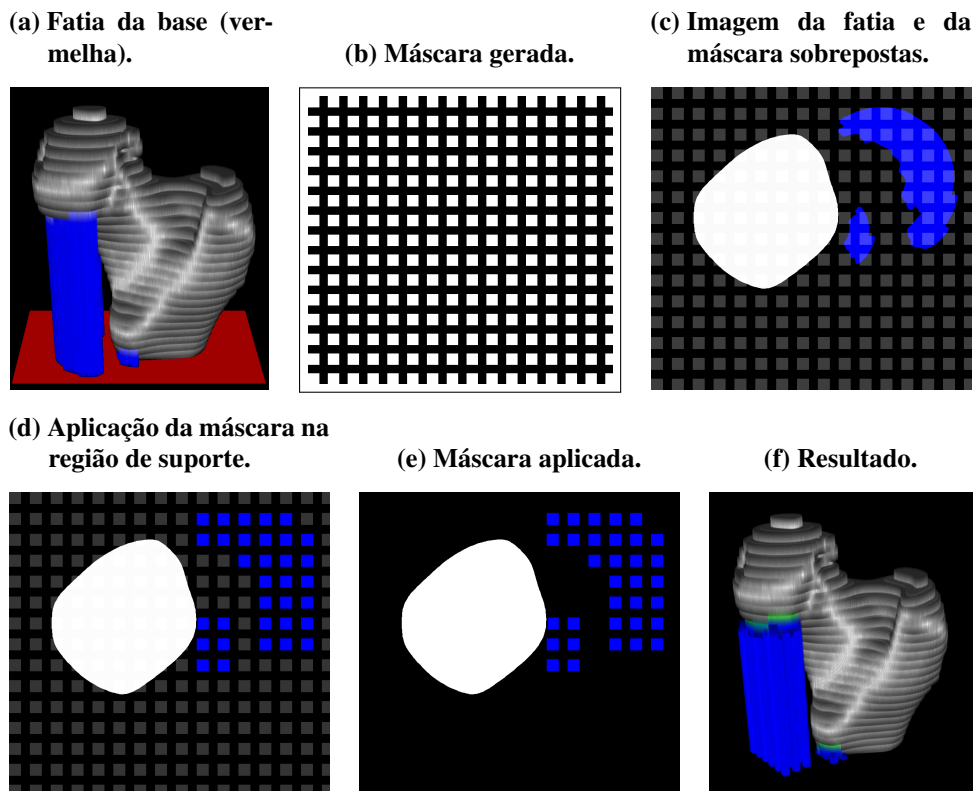
4.2 APLICAÇÃO DE MÁSCARAS E OUTRAS MELHORIAS NA REGIÃO DE SUPORTE

Identificadas as regiões onde devem ser gerados os suportes de sustentação para o objeto, podem ser aplicadas algumas operações sobre as imagens para diminuir a quantidade de material a ser utilizado no suporte computado e aumentar a qualidade da superfície da peça. A discussão apresentada nesta seção demonstra a facilidade de realizar alguns destes processamentos sobre as regiões de suporte ao trabalhar com imagens. Através de operações lógicas e morfológicas é possível, por exemplo, realizar alterações nas imagens para diminuir o contato do suporte com o objeto e aplicar máscaras (formas padronizadas) para criar estruturas de suporte menos densas, reduzindo o uso de material na impressão e facilitando que os suportes sejam destacados da peça após a impressão.

Para criar estruturas de suporte na forma de colunas, basta processar as imagens das regiões de suporte com máscaras contendo a forma desejada para as colunas. Uma máscara quadrangular pode ser criada facilmente usando apenas a medida do lado dos quadrados (que formarão as colunas) e a largura do espaço entre os quadrados (que forma a separação entre colunas). Estes parâmetros podem ser recebidos do usuário, para permitir uma personalização, desde que seja respeitada a largura máxima de autossuporte, quando necessário. Para a criação das estruturas de suporte basta então realizar uma operação de intersecção entre a máscara criada e as regiões de suporte em cada imagem das fatias. A Figura 28(a) mostra em vermelho o plano que forma a fatia da base do modelo, onde tem-se a projeção de todos os suportes acumulados das fatias superiores. Na Figura 28(b) é ilustrada a imagem de uma máscara gerada com as

dimensões das imagens das fatias. As partes brancas da máscara indicam que regiões de suporte devem ser mantidas e as partes pretas indicam que devem ser removidas. A imagem da fatia da base sobreposta à imagem da máscara está representada na Figura 28(c). Também representada sobrepondo a máscara, na Figura 28(d) tem-se a aplicação da máscara na região de suporte e na Figura 28(e), é ilustrada a imagem resultante desta execução, apresentando apenas a imagem do objeto em branco e o suporte em azul. A Figura 28(f) mostra o resultado final das colunas geradas ao empilhar todas as imagens das camadas.

Figura 28 – Aplicação de máscara nas regiões de suporte.



Fonte: Autoria própria.

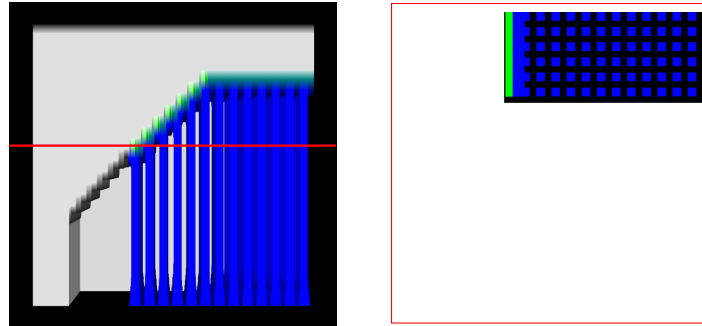
Na Figura 29(a) é ilustrada a vista lateral de um modelo com estrutura de suporte em forma de colunas. A linha vermelha indica a localização da fatia mostrada na Figura 29(b). Na imagem desta figura é possível identificar as regiões de objeto (em branco), as regiões de suporte acumuladas das fatias anteriores (em azul) e a região de suporte recém criada (em verde), que trata-se da porção de suporte que sustenta diretamente a parte suspensa do objeto relativa à fatia imediatamente acima. Neste tipo de região de suporte, pode ser interessante usar um critério diferente de tratamento, por exemplo, não aplicar a máscara quadrangular para a criação de colunas. Uma vez que este tipo de região está em contato direto com uma região suspensa da fatia superior, um preenchimento diferente pode ser adotado para manter a qualidade da superfície

impressa do objeto ou para facilitar que o suporte seja destacado do objeto após a impressão.

Figura 29 – Melhorias implementadas para a região de suporte.

(a) Vista lateral.

(b) Imagem da fatia.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 30(a) foram destacadas algumas partes do suporte para ilustrar algumas outras melhorias que podem ser usadas na criação das estruturas de suporte. Na Figura 30(b) é apresentada uma ampliação da parte destacada em marrom na Figura 30(a). Na ampliação, estão representadas as camadas computadas e os seguintes elementos: 1) um pequeno afastamento lateral entre o suporte e o objeto e 2) regiões de suporte em contato direto com o objeto (em verde). O pequeno afastamento lateral pode ser usado para facilitar a remoção do suporte após a impressão. Com relação às regiões de suporte imediatamente em contato com o objeto, o usuário pode optar por não imprimi-las, para deixar um espaço vertical, ou ainda, poderia ser aplicada uma máscara com pequenos pontos espaçados para que haja um contato mínimo que sustente o objeto, proporcionando também a facilitação da remoção do suporte após a impressão.

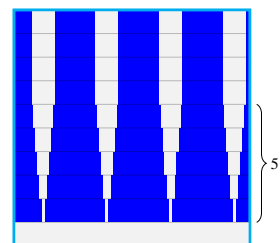
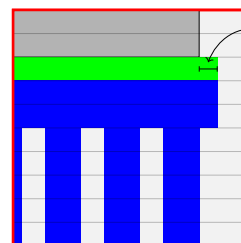
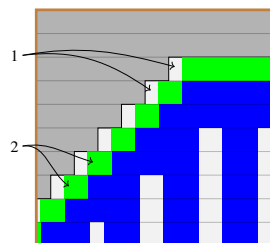
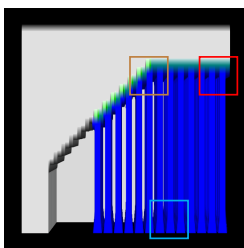
Figura 30 – Melhorias implementadas para a região de suporte.

(a) Vista lateral.

(b) Melhorias do contato com a superfície.

(c) Melhorias do contato com a superfície.

(d) Melhorias na base do suporte.



Fonte: Autoria própria.

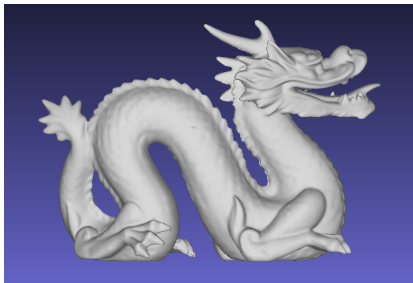
Na Figura 30(c) é apontado o elemento 3), ilustrando a adição de uma pequena faixa de suporte extrapolando a borda do objeto da fatia superior. Essa faixa extra pode ser usada de modo que o objeto possa ser fabricado inteiramente sobre a estrutura de suporte, possibilitando uma maior precisão e estabilidade de impressão. O elemento 4), destacado na Figura 30(c),

ilustra a aplicação da máscara de suporte (máscara quadrangular para colunas neste exemplo) apenas a partir da terceira camada abaixo do contato com o objeto. O uso de algumas camadas de suporte mais densas em contato com o objeto proporciona um apoio melhor para a produção da manufatura, permitindo que a superfície fique mais homogênea. Por fim, a ampliação da Figura 30(d), destacada em azul claro na Figura 30(a), ilustra no item 5) sucessivas dilatações dos suportes nas camadas próximas à base. O alargamento das colunas próximo à base do suporte proporciona maior estabilidade durante a fabricação.

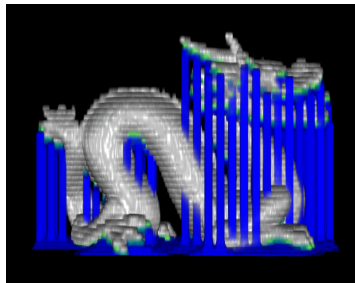
Ainda é possível regular a densidade do suporte alterando as dimensões das formas e dos espaços utilizados em uma máscara. Se forem utilizados quadrados pequenos com espaços pequenos, serão construídos muitos pilares com uma concentração maior por área analisada. Alterando a máscara para quadrados mais largos, com espaços maiores, os pilares ficarão mais grossos e mais espaçados, lembrando que a largura máxima de autossuporte deve ser respeitada para que não ocorram deformações no processo de fabricação da peça. Um exemplo da construção de pilares estreitos e próximos pode ser observado na Figura 31(b) e um exemplo de suporte menos denso, com pilares mais largos e mais espaçados é apresentado na Figura 31(c).

Figura 31 – Modelo de um dragão.

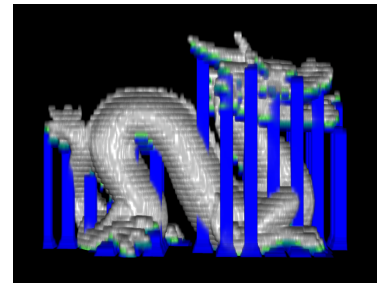
(a) Modelo 3D.



(b) Suporte mais denso.



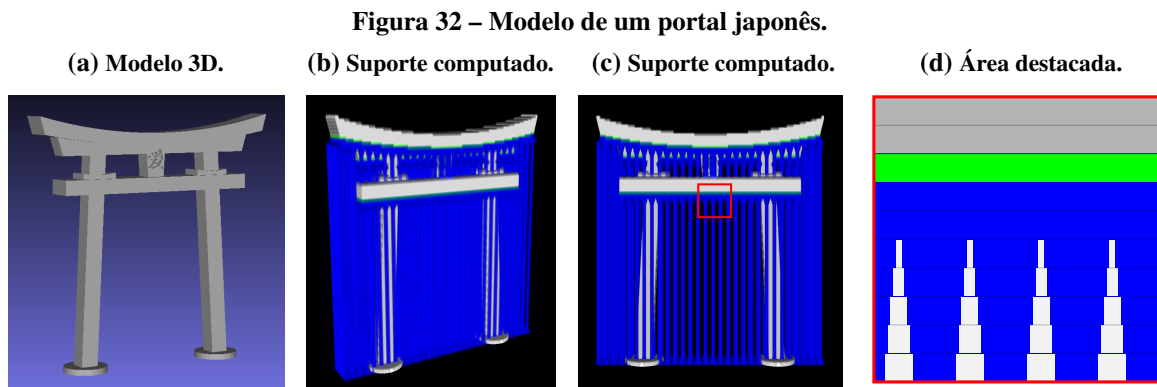
(c) Suporte menos denso.



Fonte: Autoria própria.

Uma forma de permitir que seja utilizada uma máscara com pilares mais finos e com espaços entre eles de distância maior que a largura máxima de autossuporte é realizando a aplicação de máscaras dilatadas nos suportes das camadas mais próximas do contato com o objeto, que seria semelhante aos passos que foram sugeridos para realizarem-se na base do suporte (Figura 30(d)), mas no sentido inverso, ou seja, o algoritmo continua computando os suportes inteiros nas três camadas abaixo do objeto e a partir da quarta camada, passa a aplicar máscaras dilatadas com elementos estruturantes cada vez menores, até que seja aplicada a máscara sem dilatações, que formam a estrutura menos densa. Na Figura 32(a) é apresentado o modelo 3D de um portal japonês. A aplicação do método proposto gera os suportes de acordo

com as Figuras 32(b) (vista em perspectiva) e 32(c) (vista frontal). A região em vermelho destaca uma área onde há o contato entre a peça e o suporte, onde são aplicadas as operações descritas, ilustrada em detalhes na Figura 32(d). A implementação desta melhoria permite que a quantidade de suporte gerada seja reduzida, tendo em vista que a máscara utilizada pode ter os espaços entre os quadrados aumentados consideravelmente.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

A geração de estrutura de suporte para a fabricação de objetos é uma etapa essencial para várias tecnologias da manufatura aditiva. Além de permitir a sustentação para a construção adequada de um objeto, este processo impacta na eficiência e qualidade da produção, assim como na quantidade de material utilizado. Pela sua importância, a geração de estruturas de suporte é o foco de diversos trabalhos de otimização do processo de manufatura aditiva.

A abordagem de cálculo de suportes através das imagens obtidas das fatias de um modelo 3D possui algumas vantagens em relação à abordagem que realiza os cálculos diretamente sobre malhas triangulares, como a facilidade de manipulação de imagens utilizando operações lógicas e morfológicas. Ainda, o fato da etapa de fatiamento ser realizada antes da geração de suporte propicia que o fatiamento ocorra em uma menor quantidade de dados e, portanto, menos problemas encontrados em malhas triangulares precisam ser tratados. Estes problemas dificultam abordagens baseadas no modelo 3D.

Em contrapartida, quando é feita a conversão dos polígonos obtidos do fatiamento para imagens binárias, ocorre a discretização na transformação de unidades de medida e coordenadas de valores contínuos (reais) para suas respectivas coordenadas na matriz de *pixels*, em valores inteiros. Estas aproximações de valores (arredondamentos) provocam alguns efeitos colaterais em regiões de inclinação muito próxima ao ângulo de autossuporte. Os critérios de geração de suporte da abordagem por imagens podem indicar equivocadamente a necessidade de geração de suporte, criando estruturas desnecessárias.

Este problema pode ser minimizado com o aumento do valor da resolução das imagens, contudo, pode haver situações em que a resolução necessária seja muito elevada, dificultando a manipulação das imagens por limitações de memória e poder de processamento. Deste modo, foi apresentada uma solução de melhoria no processo de fatiamento, integrada ao processo de computação de região de suporte, de maneira que a informação dos ângulos da superfície de um modelo 3D seja transportada até as imagens 2D das fatias. Com esta informação, ângulos próximos àquele de autossuporte podem ser devidamente tratados para que os suportes possam ser gerados corretamente.

Os experimentos realizados demonstraram que o problema com ângulos foi solucionado pelo método proposto. Ainda, foram discutidas melhorias para a criação de estruturas de suporte, explorando as facilidades do uso de imagens. Dentre estas melhorias estão a criação de estruturas

de suporte como colunas e o aprimoramento do contato entre regiões de suporte e do objeto, permitindo que a quantidade de material para impressão possa ser reduzida e que qualidade da superfície do objeto seja aumentada.

Como direções futuras, abordagens baseadas em imagens podem ser exploradas para criar estruturas de suporte com padrões diferentes. Uma estrutura em árvore, por exemplo, permite diminuir ainda mais a quantidade de material usado em fabricação. A criação de estruturas de suporte que minimizem o contato com regiões do objeto podem melhorar a qualidade final da impressão.

REFERÊNCIAS

BO, Qian; LI-CHAO, Z.; YU-SHENG, Shi; GUO-CHENG, Liu. Support fast generation algorithm based on discrete-marking in stereolithography rapid prototyping. **Rapid Prototyping Journal**, v. 17, p. 451–457, 2011.

CAMPBELL, R.I.; BOURELL, David; GIBSON, Ian. Additive manufacturing: Rapid prototyping comes of age. **Rapid Prototyping Journal**, v. 18, 06 2012.

CHALASANI, Kumar; JONES, Larry; ROSCOE, Larry. Support generation for fused deposition modeling. *In: 1995 International Solid Freeform Fabrication Symposium. [s.n.]*, 1995. Disponível em: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/1995/1995-28-Chalasan.pdf>.

CHUA, Chee Kai; LEONG, Kah Fai; LIM, Chu Sing. **Rapid Prototyping: Principles and Applications**. 3rd. ed. Singapore: World Scientific Pub Co, 2010.

DANIELSSON, Per-Erik. Euclidean distance mapping. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 14, n. 3, p. 227–248, 1980. ISSN 0146-664X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0146664X80900544>.

FOGGIATTO, Jose Aguiamar; SILVA, Jorge Viente Lopes da. Representação geométrica 3D para AM. *In: Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. 1st. ed. São Paulo, SP, Brazil: Blucher, 2017. p. 69–96. ISBN 9788521211518.

HEARN, Donald; BAKER, M. Pauline. **Computer Graphics (2nd Ed.): C Version**. USA: Prentice-Hall, Inc., 1996. ISBN 0135309247.

HUANG, Pu; WANG, Charlie C. L.; CHEN, Yong. Algorithms for Layered Manufacturing in Image Space. *In: Advances in Computers and Information in Engineering Research, Volume 1*. ASME Press, 2014. ISBN 9780791860328. Disponível em: https://doi.org/10.1115/1.860328_ch15.

HUANG, Xiaomao; YE, Chunsheng; MO, Jianhua; LIU, Haitao. Slice data based support generation algorithm for fused deposition modeling. **Tsinghua Science and Technology**, TUP, v. 14, n. S1, p. 223–228, 2009.

ISO/ASTM. **ISO/ASTM 52900:2015 - Standard Terminology for Additive Manufacturing: General principles — terminology**. Geneva, Switzerland, 2015.

JIANG, Jingchao; XU, Xun; STRINGER, Jonathan. Support structures for additive manufacturing: A review. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 2, n. 4, 2018. ISSN 2504-4494. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-4494/2/4/64>.

JIN, Yu-an; FU, Jian-Zhong. Support generation for additive manufacturing based on sliced data. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 80, 05 2015.

KIRSCHMAN, CF; JARA-ALMONTE, CC; BAGCHI, A; DOOLEY, RL; OGALE, AA. Computer aided design of support structures for stereolithographic components. *In: Proceedings of the ASME 1991 Computers in Engineering Conference*. [s.n.], 1991. p. 443–448. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/CIE1991-0055>.

KULKARNI, Prashant; MARSAN, Anne; DUTTA, Debasish. Review of process planning techniques in layered manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, v. 6, p. 18–35, 03 2000.

LIVESU, Marco; ELLERO, Stefano; MARTÍNEZ, Jonàs; LEFEBVRE, Sylvain; ATTENE, Marco. From 3D models to 3D prints: an overview of the processing pipeline. **Computer Graphics Forum**, v. 36, 05 2017.

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

MORALES, Angy. **Formlabs Announces Draft Mode and Smart Supports**. Formlabs, 2015. Disponível em: <https://formlabs.com/es/company/press/formlabs-announces-draft-mode-and-smart-supports/>.

OLIVEIRA, Marcelo Fernandes de. **Aplicações da prototipagem rápida em projetos de pesquisa**. 2008. 109 p. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

PEREZ, Mercedes; CAROU, Diego; RUBIO, Eva María; TETI, Roberto. Current advances in additive manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 88, p. 439–444, 2020. ISSN 2212-8271. 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 17-19 July 2019, Gulf of Naples, Italy. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120303978>.

QIAN, B. **The Research of on the Automatic Support Generation Algorithm for Stereolithography**. 2005. Dissertação (Mestrado) — Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 2005.

QIAN, B. **Research on the key technic for rapid prototyping and manufacturing**. 2009. Tese (Doutorado) — Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 2009.

SZELISKI, Richard. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. ISBN 1848829345.

THOMAS, D. **The development of design rules for selective laser melting**. 2009. Tese (Doutorado) — University of Wales Institute, Cardiff, 2009.

VAIDYA, Rohan; ANAND, Sam. Optimum support structure generation for additive manufacturing using unit cell structures and support removal constraint. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 1043–1059, 2016. ISSN 2351-9789. 44th North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 44, June 27-July 1, 2016, Blacksburg, Virginia, United States. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916300841>.

VANEK, J.; GALICIA, J. A. G.; BENES, B. Clever Support: Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication. **Computer Graphics Forum**, v. 33, n. 5, p. 117–125, ago. 2014. ISSN 01677055. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/cgf.12437>.

VOLPATO, Neri; CARVALHO, Jonas de. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. *In: Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. 1st. ed. São Paulo, SP, Brazil: Blucher, 2017. p. 15–30. ISBN 9788521211518.

VOLPATO, Neri; SILVA, Jorge Viente Lopes da. Planejamento de processo para tecnologias de AM. *In: Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. 1st. ed. São Paulo, SP, Brazil: Blucher, 2017. p. 97–127. ISBN 9788521211518.