

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

NORA NEI JESICA OLIVEIRA SANTANA

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA COM FILTRO DE ESTRUTURA DE SUPORTE
PARA MANUFATURA ADITIVA

Maceió

2024

NORA NEI JESICA OLIVEIRA SANTANA

**OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA COM FILTRO DE ESTRUTURA DE SUPORTE
PARA MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – PPGEC/UFAL, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Adeildo Soares Ramos Júnior

Maceió

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Elisângela Vilela dos Santos – CRB-4 – 2056

S232o Santana, Nora Nei Jesica Oliveira.
Otimização topológica com filtro de estrutura de suporte para manufatura aditiva /
Nora Nei Jesica Oliveira Santana. – 2024.
110 f. : il. color.

Orientador: Adeildo Soares Ramos Júnior.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.
Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 105-109.
Apêndice: f. 110.

1. Otimização topológica. 2. Manufatura aditiva. 3. Estrutura de suporte. 4.
Impressão 3D. I. Título.

CDU: 624 : 681.73

Aos meu pais, meus maiores incentivadores!

AGRADECIMENTOS

A Deus pela sua presença constante em minha vida, por todas as vezes que me sustentou em meu propósito.

Aos meus pais, José Oliveira e Noelia Patrício, por serem sinônimos de amor, proteção e incentivo. Toda minha gratidão e amor a vocês.

Aos meus irmãos, Nivia Leide, Mateus Olímpio e José Carlos, pelo apoio e carinho.

Aos meus amigos de longa data, Rose, Esli, Diogo, Karine, Henrique, Camila e Jobson, por serem tão presentes, apesar da distância física. Obrigada pelo carinho, apoio e por tantos momentos compartilhados.

À minha colega de apartamento e amiga, Evilly Raquel, pelo apoio nos momentos difíceis e pelos bons momentos de descontração. Todo meu carinho e respeito a você.

Aos meus amigos da pós-graduação, Thauany, Jéssica, Jorge, Yuri, Jonathan, Rafael, Leonardo, Luiza, Pedro, Celiane, Priscila, Evilly, Lorrán, Adysson e Kycianne, conviver com vocês durante esses últimos dois anos foi uma honra, muito aprendizado e momentos de alegria que tornaram o processo do mestrado mais leve.

Aos meus professores do Instituto Federal de Sergipe (IFS), Adysson André Fortuna de Souza, Marcus Alexandre Noronha de Brito, Carlos Mariano Melo Júnior e Maria Simone Morais Soares, por todo incentivo acadêmico e profissional.

Ao meu amigo de pesquisa, Lorrán, agradeço pelo suporte, conhecimento compartilhado, atenção e carinho.

Ao meu orientado, Adeildo Soares Ramos Júnior, pelo suporte, atenção, conhecimento compartilhado e cooperação para o desenvolvimento da pesquisa.

A Eduardo Quintella, por todo o suporte e conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores do PPGEC, pela presteza, especialmente na troca de conhecimento.

A todos os profissionais da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), pela receptividade e atenção.

À FAPEAL, pelo incentivo à pesquisa.

“Eis a grande ciência do cristão: conhecer que nada é e nada pode! O reconhecimento da própria ignorância é a primeira prova da inteligência.”

(Santo Agostinho)

RESUMO

A otimização topológica destaca-se como uma técnica importante para análise e concepção de projetos, buscando maximizar o desempenho estrutural por meio da distribuição eficiente de material, considerando as condições de contorno e restrições do problema. Entretanto, a fabricação dessas estruturas por meio dos métodos tradicionais nem sempre são viáveis, devido à configuração complexa e não convencional da geometria. Deste modo, a manufatura aditiva (MA) surge como uma solução inovadora, permitindo a produção de objetos camada por camada, sem a necessidade de moldes. Contudo, ângulos de projeção superiores a 45° na geometria podem exigir material de suporte para evitar falhas e deformações durante a impressão, aumentando custos de material e tempo de fabricação. Com isso, este estudo tem como objetivo avaliar a utilização da otimização topológica em conjunto com o filtro de estrutura de suporte para manufatura aditiva, destacando os potenciais benefícios em termos de economia de material e tempo de produção. Nesse sentido, o AMfilter, desenvolvido por Langelaar (2016), é utilizado juntamente com o código educacional de 88 linhas elaborado por Andreassen et al. (2010), cujo desempenho é verificado por meio de simulações de impressão dos modelos otimizados. O AMfilter busca eliminar a necessidade de estrutura de suporte com base na restrição geométrica, removendo as superfícies salientes que excedem o ângulo máximo permitido, tornando a geometria resultante diretamente imprimível sem estruturas de suporte. Os resultados indicam algumas limitações do AMfilter, como a dependência de malha e o aumento gradual de densidade intermediária na direção de impressão. Além disso, as soluções provenientes da otimização topológica em conjunto com o AMfilter não eliminaram completamente as estruturas de suporte. Apesar das modificações das topologias em relação ao modelo de referência, estas não foram suficientes para alcançar o resultado esperado. Entretanto, é observada uma redução no tempo estimando para a impressão de suporte e consequentemente no consumo de material em comparação com modelo de referência. Essa redução foi menos significativa nas simulações com ângulo de 45° para a geração de suporte, mas nas simulações com ângulos superiores de 53° e 60° , atingiu uma média de redução de 25% e 37%, respectivamente, entre os exemplos discutidos.

Palavras-chave: Otimização topológica, Manufatura aditiva, Estrutura de suporte.

ABSTRACT

Topological optimization stands out as an important technique for project analysis and design, seeking to maximize structural performance through efficient material distribution, considering the boundary conditions and constraints of the problem. However, manufacturing these structures using traditional methods is not always feasible due to the complex and unconventional geometry configuration. In this way, additive manufacturing (AM) emerges as an innovative solution, allowing the production of objects layer by layer without the need for molds. However, projection angles greater than 45° in the geometry may require support material to avoid failures and deformations during printing, increasing material costs and manufacturing time. Thus, this study aims to evaluate the use of topological optimization in conjunction with the support structure filter for additive manufacturing, highlighting potential benefits in terms of material savings and production time. In this context, the AMfilter, developed by Langelaar (2016), is used together with the educational 88-line code developed by Andreassen et al. (2010), whose performance is verified through print simulations of the optimized models. The AMfilter seeks to eliminate the need for support structures based on geometric constraints, removing overhanging surfaces that exceed the maximum allowed angle, making the resulting geometry directly printable without support structures. The results indicate some limitations of the AMfilter, such as mesh dependency and the gradual increase of intermediate density in the printing direction. Furthermore, the solutions resulting from the topological optimization combined with the AMfilter did not completely eliminate the support structures. Despite the modifications of the topologies concerning the reference model, these were not sufficient to achieve the expected result. However, a reduction in the estimated time for support printing and consequently in material consumption compared to the reference model is observed. This reduction was less significant in simulations with a 45° angle for support generation, but in simulations with higher angles of 53° and 60° , it reached an average reduction of 25% and 37%, respectively, among the discussed examples.

Keywords: Topological optimization, Additive manufacturing, Support structure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Suporte de antena para o satélite Sentinel da RUAG.....	20
Figura 2 – Exemplos ilustrativos de geometrias sem e com exigência de estrutura de suporte.....	21
Figura 3 – (a) Comparação da concepção convencional de projetos e (b) usando técnicas de otimização.....	24
Figura 4 – Categorias de otimização estrutural.....	26
Figura 5 – Exemplos de aplicação da OT na indústria aeroespacial e automotiva.....	26
Figura 6 – Exemplos de aplicação da OT nas indústrias da construção civil e médica.....	27
Figura 7 – Exemplos de otimização topológica.....	27
Figura 8 – Resultados da otimização da viga, com diferentes valores para p	31
Figura 9 – Exemplo de dependência de malha.....	32
Figura 10 – Solução apresentando padrões xadrez.....	33
Figura 11 – Variações da nomenclatura da área da MA.....	37
Figura 12 – Representação do processo de MA.....	38
Figura 13 – Definição do ângulo de inclinação.....	41
Figura 14 – Representação geométrica de modelos e material de suporte.....	42
Figura 15 – Representação dos modelos sem a necessidade de suporte.....	42
Figura 16 – Ilustração do volume de suporte calculado a partir da projeção do elemento na placa de base.....	43
Figura 17 – Exemplo de otimização topológica de uma peça em quatro orientações diferentes.....	44
Figura 18 – Exemplo da geração de suporte em modelos vazados.....	45
Figura 19 – Processo de impressão por FDM.....	46
Figura 20 – Preenchimento interno hexagonal, concêntrico, retilíneo, curvas de Hilbert e cordas arquimedianas, respectivamente da esquerda para a direita.....	47

Figura 21 – Percentual de preenchimento.....	48
Figura 22 – Fluxograma com as possíveis saídas usando o <i>TOPslicer</i>	49
Figura 23 – Elemento $e(i, j)$ devidamente suportado pela região de apoio $\Omega_{(i,j)}$	51
Figura 24 – Aproximação suave com operador $smin(\rho, \mathcal{E})$	52
Figura 25 – Aproximação suave com operador $smax(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \bar{\rho}_3)$	53
Figura 26 – Comparação de resultado, usando a norma P regular e a penalizada.....	55
Figura 27 – Representação do domínio discretizado.....	56
Figura 28 – Solução da otimização topológica.....	57
Figura 29 – Fluxograma do procedimento metodológico da pesquisa.....	58
Figura 30 – Modelo discretizado.....	60
Figura 31 – Exemplo 1: Modelo da viga MBB.....	61
Figura 32 – Exemplo 2: Modelo de viga em balanço.....	62
Figura 33 – Exemplo 3: Modelo com mais de uma carga.....	63
Figura 34 – Exemplo 4: Modelo com elemento passivo.....	64
Figura 35 – Representação da implementação do AMfilter no código 88 linhas.....	66
Figura 36 – Viga MBB.....	67
Figura 37 – Solução de otimização após o refinamento da malha (720 x 240).....	68
Figura 38 – Solução após a penalização das densidades intermediárias.....	69
Figura 39 – Imagem <i>raster versus</i> imagem vetorizada.....	70
Figura 40 – Imagem vetorizada.....	70
Figura 41 – Etapas do processo de conversão para o formato STL.....	71
Figura 42 – Pré-visualização de impressão camada por camada.....	72
Figura 43 – Solução otimizada do modelo de viga.....	74
Figura 44 – Exemplos da variação dos parâmetros P e ϵ para o caso da viga MBB.....	77
Figura 45 – Soluções desfavoráveis da variação dos parâmetros P e ϵ obtido por Langelaar (2016).....	78

Figura 46 – Solução da otimização topológica da viga MBB.....	79
Figura 47 – Solução da otimização do modelo de viga MBB, sem a presença de densidade intermediária.....	81
Figura 48 – Simulação de impressão 3D da viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.....	82
Figura 49 – Simulação de impressão 3D da viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.....	84
Figura 50 – Simulação de impressão 3D da viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.....	85
Figura 51 – Solução da otimização topológica do modelo de viga em balanço.....	87
Figura 52 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.....	88
Figura 53 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.....	89
Figura 54 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.....	90
Figura 55 – Solução da otimização topológica do modelo de viga em balanço com mais de uma carga.....	91
Figura 56 – Solução da otimização topológica do modelo de orientação “N”.....	92
Figura 57 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.....	93
Figura 58 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.....	94
Figura 59 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.....	95
Figura 60 – Solução da otimização topológica do modelo com elemento passivo.....	96
Figura 61 – Simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.....	97

Figura 62 – Simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.....	99
Figura 63 – Simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.....	100
Figura 64 – Modelo da viga impresso.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos de malha.....	68
Tabela 2 – Parâmetros de configuração de impressão.....	72
Tabela 3 – Dados da otimização do modelo de viga MBB.....	81
Tabela 4 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.....	83
Tabela 5 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.....	84
Tabela 6 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.....	86
Tabela 7 – Dados da otimização do modelo de viga em balanço.....	87
Tabela 8 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.....	88
Tabela 9 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.....	89
Tabela 10 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.....	90
Tabela 11 – Dados da otimização do modelo de viga em balanço com mais de uma carga.....	91
Tabela 12 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.....	93
Tabela 13 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.....	94
Tabela 14 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.....	95
Tabela 15 – Dados da otimização do modelo com elemento passivo.....	97

Tabela 16 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.....	98
Tabela 17 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.....	99
Tabela 18 – Dados da simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
AMF	Additive Manufacturing File Format
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CONLIN	Convex linearization
FDM	Fused Deposition Modeling
MA	Manufatura aditiva
MBB	Messerschmitt-Bölkow-Blohm
MMA	Method of moving asymptotes
OC	Optimality Criteria
OT	Otimização topológica
PLA	Ácido poliláctico
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
STL	StereoLithography
XML	Extensible Markup Language
3MF	3D Manufacturing Format

LISTA DE SÍMBOLOS

E_e	Módulo elasticidade longitudinal do elemento “e”
E_0	Módulo elasticidade longitudinal material sólido
E_{min}	Rigidez do material vazio
$f(\mathbf{x})$	Função objetivo
\mathbf{F}	Vetor de forças
f_r	Fração de volume prescrita
f_p	Fator de desempenho
$g_i(\mathbf{x})$	Restrições de desigualdade
$h_i(\mathbf{x})$	Restrições de igualdade
H_i	Operador de convolução (fator de peso)
\mathbf{K}	Matriz de rigidez da estrutura
\mathbf{k}_0	Matriz de rigidez do elemento
m	Limite de movimento do OC
N	Número de elementos
N_e	Vizinhança do elemento
n_s	Número de elementos para região de suporte
p	Fator de penalização
P	Parâmetro da norma P
Q	Parâmetro de penalização
r_{min}	Raio mínimo de projeção do filtro
R	Raio do filtro
S	Região de suporte
\mathbf{u}	Vetor de deslocamentos nodais
\mathbf{u}_e	Vetor de deslocamentos do elemento “e”
\mathbf{V}	Vetor de volumes dos elementos
V_0	Volume máximo de material que será redistribuído
\mathbf{x}	Vetor de variáveis de projeto
x_i	Centroide do elemento “i”
x^L	Limite inferior das variáveis de projeto
x^U	Limite superior das variáveis de projeto

ε	Parâmetro de precisão
$\bar{\rho}$	Vetor de densidade impressa
\bar{E}	Densidade máxima de impressão
η	Coefficiente de amortecimento numérico
ρ	Vetor de densidades
ρ_e	Densidade do elemento “e”
$\tilde{\rho}_e$	Densidade modificada do elemento “e”
ρ_{min}	Densidade mínima
λ	Multiplicador de Lagrange

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Objetivo Geral	23
1.1.1 Objetivo Específicos.....	23
1.2 Estrutura do trabalho	23
2 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	24
2.1 Método da densidade.....	28
2.1.1 Instabilidade numérica.....	31
2.1.2 Filtro de sensibilidade.....	33
2.1.3 Filtro de densidade	34
3 MANUFATURA ADITIVA	36
3.1 Estrutura de suporte	40
3.2 Técnica de extrusão de material.....	45
3.3 Formatos de arquivos para manufatura aditiva	48
3.4 AMfilter	50
3.4.1 Formulação do AMfilter.....	51
3.4.2 Análise de sensibilidade	54
3.4.3 Exemplos numéricos	54
4 METODOLOGIA	58
4.1 Código de otimização topológica.....	59
4.1.1 Exemplo 1.....	61
4.1.2 Exemplo 2.....	61
4.1.3 Exemplo 3.....	62
4.1.4 Exemplo 4.....	64
4.2 Implementação do AMfilter	65
4.2.1 Análise da orientação de construção e dos parâmetros P e ϵ	66
4.3 Simulação de impressão 3D	67
5 RESULTADOS	74
5.1 Análise da orientação de impressão	74
5.2 Influência dos parâmetros P e ϵ.....	76
5.3 Exemplo 1.....	79

5.4 Exemplo 2	86
5.5 Exemplo 3	91
5.6 Exemplo 4	96
6 CONCLUSÕES	102
6.1 Sugestões de trabalhos futuros	104
REFERÊNCIAS	105
APÊNDICE A – PROTÓTIPO DA VIGA MBB	110

1 INTRODUÇÃO

Na frequente busca pela eficiência, a otimização se revela como uma ferramenta essencial para resolver problemas complexos e alcançar resultados ótimos. Desde os tempos longínquos, os seres humanos têm demonstrado um instinto natural de realizar tarefas de maneira eficiente, seja para economizar tempo e energia ou minimizar situações de desconforto. A começar das primeiras invenções, como alavancas e polias, até os avanços tecnológicos atuais, os humanos demonstram o desejo de maximizar a eficiência mecânica e teórica (HAFTKA e GÜRDAL, 1992).

Em seu fundamento, a otimização envolve a aplicação de técnicas e métodos para explorar eficientemente o espaço de soluções que compreende as inúmeras soluções possíveis, buscando por aquela que oferece o melhor desempenho e que atende aos critérios estabelecidos. Esse conceito é amplamente aplicado a diversas áreas, como engenharia, economia, ciência da computação e gestão, em que desafios complexos exigem soluções criativas e eficazes.

Na engenharia, a otimização assume um papel crucial, principalmente na otimização estrutural. Nesse contexto, o objetivo é projetar estruturas duráveis, seguras e eficientes em termos de peso e uso de materiais. Para isso, utilizam-se métodos computacionais avançados como forma de obter a melhor solução geométrica possível, considerando condições de carregamento, restrições de projeto e materiais disponíveis. Isso permite que engenheiros desenvolvam estruturas econômicas e de alto desempenho, sem comprometer sua integridade.

A otimização estrutural pode ser abordada em três maneiras distintas: otimização paramétrica, otimização de forma e otimização topológica (BENDSØE e SIGMUND, 2003). A otimização paramétrica compreende o ajuste de dimensões específicas dentro das limitações de uma estrutura já definida, enquanto a otimização de forma modifica a forma (geometria) externa da estrutura. Ao contrário desses métodos, a otimização topológica não depende da configuração inicial e oferece um espaço de design mais amplo, permitindo uma exploração mais abrangente das soluções possíveis (ZHU et al., 2021).

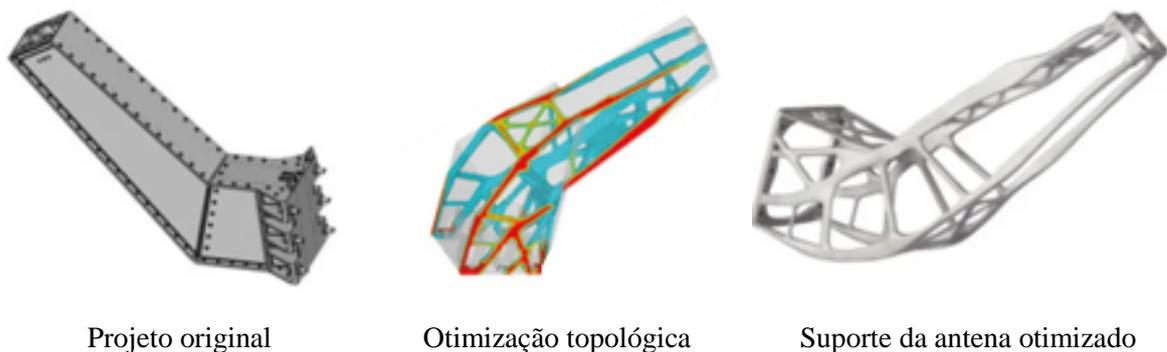
Nesse sentido, a otimização topológica se destaca como um método inovador que revoluciona o processo de design na engenharia, buscando alcançar a configuração ideal da estrutura por meio da distribuição eficiente de material, satisfazendo às condições de contorno e restrições do problema. A liberdade de solução oferecida por esse método frequentemente apresenta configurações complexas e não convencionais, desafiando os métodos tradicionais de fabricação. Como resposta, tratamentos adicionais podem ser necessários para viabilizar a

concretização dos projetos, que dificilmente cumpre todo o potencial da otimização topológica. Nesse contexto, a manufatura aditiva (MA) surge como uma tecnologia avançada de fabricação que preenche a lacuna entre a concepção otimizada e a fabricação física da estrutura (ZHU et al., 2021).

A manufatura aditiva possibilita a produção de objetos tridimensionais camada a camada, com base em modelos 3D, permitindo a criação de peças geometricamente complexas sem a necessidade de ferramentas adicionais ou moldes. Com isso, há uma maior autonomia no desenvolvimento de projetos, possibilitando a elaboração de produtos econômicos e eficientes. Dentre as tecnologias que compreendem a fabricação aditiva, encontram-se a *Selective Laser Melting* (SLM), *Selective Laser Sintering* (SLS), *Metal Deposition* (LMD), *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Selective Deposition Lamination* (SDL) e *Stereolithography* (SLA). A principal diferença entre elas consiste no tipo de material envolvido na fabricação, na forma como as camadas são criadas e interligadas (GIBSON et al., 2015).

Um exemplo prático da associação entre as técnicas de otimização topológica e manufatura aditiva foi a fabricação da estrutura de suporte da antena do satélite Sentinel, conforme apresentado na Figura 1. Esse projeto foi desenvolvido pelo grupo tecnológico suíço RUAG, com atuação global nas áreas aeroespacial, defesa e segurança. Nele, os engenheiros buscaram o equilíbrio entre a resistência e o peso, conseguindo um resultado em mais de 30% dos requisitos mínimo exigidos para a rigidez e 40% na redução de peso com a utilização da fabricação aditiva (EOS, 2023).

Figura 1 – Suporte de antena para o satélite Sentinel da RUAG.



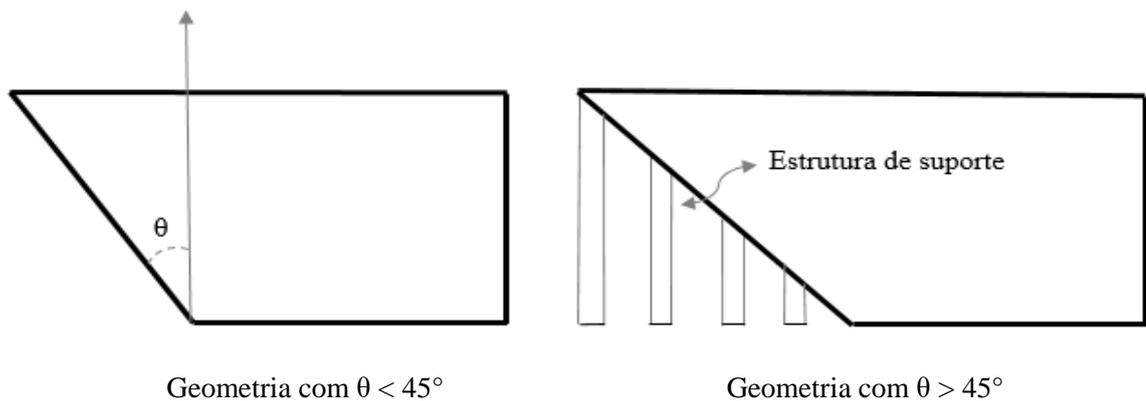
Fonte: Adaptado de (EOS, 2023).

Embora os processos de manufatura aditiva ofereçam vantagens consideráveis em relação aos métodos tradicionais, é importante reconhecer que existem restrições de fabricação que devem ser consideradas desde a fase de projeto para garantir a qualidade e a integridade da

peça final. Um dos pontos críticos, amplamente estudado no contexto da otimização topológica, é a necessidade de evitar inclinações de superfícies voltadas para baixo (saliências) com ângulos de 45° , via regra da MA. Isso porque a solução geométrica otimizada pode apresentar tais características (FIGUEIREDO, 2022; LANGELAAR, 2016; RANJAN, et. al., 2023).

Quando uma saliência possui um ângulo superior a 45° em relação à superfície de construção, como exemplificado na Figura 2, a gravidade pode exercer uma força significativa durante o processo de deposição de material, o que pode resultar em deformações ou falhas na peça, caso não sejam fornecidos suportes adequados. Em contrapartida, a utilização dessas estruturas de suporte tem impacto na qualidade final do produto, uma vez que sua remoção pode danificar superficialmente ou mecanicamente a peça, dependendo do processo empregado, além de corroborar para custos adicionais de fabricação, considerando o tempo e o material envolvido (KUMAR e SATHIYA, 2020).

Figura 2 – Exemplos ilustrativos de geometrias sem e com exigência de estrutura de suporte.



Fonte: Elaborada pela autora.

Portanto, além das restrições estruturais convencionais, são adicionadas restrições de fabricação relacionadas à MA ao problema de otimização topológica. Essa integração permite aos engenheiros garantir que a peça final seja não apenas estruturalmente eficiente, mas também viável para a manufatura aditiva, minimizando custos e tempo de produção, e maximizando a qualidade e desempenho do produto final.

Atualmente, há uma variedade de *softwares* comerciais que oferecem a capacidade de simulação de designs, permitindo que os usuários definam as restrições de fabricação, como orientação de construção e necessidade de suporte, durante o processo de otimização. Ainda, esses *softwares* permitem o tratamento do modelo otimizado desenvolvido sem considerar as restrições de MA. Por exemplo, as saliências são modificadas a partir de um ângulo definido,

de modo que não exija a utilização de material de suporte. Com isso, esses *softwares* representam uma ferramenta valiosa para engenheiros e pesquisadores no campo da otimização e manufatura aditiva. No entanto, é importante reconhecer que esses *softwares* nem sempre são acessíveis academicamente devido aos custos associados à sua utilização. Isso pode representar um obstáculo para pesquisadores, principalmente para aqueles que estão iniciando na área.

À vista disso, a realização de pesquisas utilizando códigos educacionais e ferramentas de código aberto demonstra-se como uma alternativa viável e pertinente. Esses recursos permitem que os pesquisadores tenham acesso a algoritmos e métodos de otimização, bem como a capacidade de desenvolver seus próprios modelos de simulação, incrementando novas rotinas de cálculos e análises. Ademais, a utilização desses códigos oferece a oportunidade de melhor compreensão dos fundamentos teóricos por trás dos algoritmos de otimização topológica e técnicas de manufatura aditiva.

Nesse intuito, esta pesquisa propõe um estudo empregando códigos educacionais sobre o uso combinado das técnicas de otimização topológica e do filtro de estrutura de suporte para manufatura aditiva (AMfilter), desenvolvido por Langellar (2016). O AMfilter propõe eliminar a necessidade de estrutura de suporte com base em restrição geométrica, removendo as superfícies salientes que excedem o ângulo máximo permitido, tornando a geometria descrita diretamente imprimível sem estruturas de suporte.

A metodologia utiliza um código aberto em MATLAB[®] de 88 linhas, elaborado por Andreassen et al. (2010), no qual o AMfilter é integrado durante a análise numérica do problema de otimização topológica utilizando o método da densidade. Este método busca obter a distribuição ideal de material para um domínio específico, considerando as restrições do problema. Nesse sentido, o objetivo é minimizar a flexibilidade (*compliance*) de uma estrutura 2D, de modo a simplificar a interpretação e o desenvolvimento do estudo.

O desempenho e a eficiência dessa abordagem são avaliados por meio da simulação de impressão dos modelos otimizados utilizando o *software* de fatiamento UltiMaker Cura 5.6, uma ferramenta gratuita e de fácil configuração. Nesta pesquisa, a configuração de impressão é baseada na tecnologia FDM, uma vez que essa tecnologia requer material de suporte em seu processo de fabricação, além de ser uma das técnicas mais populares e de baixo custo.

A análise compara os modelos otimizados que fazem uso do AMfilter com aqueles que não o incorporam, permitindo identificar os possíveis ganhos em termos de economia de material e tempo de produção.

Portanto, este estudo contribui para uma compreensão teórica e prática do uso de algoritmos de OT e técnicas de MA, impulsionando novos estudos para o desenvolvimento e aprimoramento de algoritmos existentes.

1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a utilização da otimização topológica em conjunto com o filtro de estrutura de suporte para manufatura aditiva, destacando os potenciais benefícios em termos de economia de material e tempo de produção.

1.1.1 Objetivo Específicos

- Realizar o estudo bibliográfico sobre otimização topológica e manufatura aditiva, destacando as limitações e uso de ambas as áreas.
- Avaliar a funcionalidade da inclusão do filtro em um algoritmo de domínio público desenvolvido em MATLAB[®], por meio de simulações de exemplos.
- Comparar a eficiência de modelos otimizados que fazem uso do filtro de estrutura de suporte com modelos que não incorporam esse filtro, por meio de simulações de impressão em software de fatiamento para a tecnologia FDM.

1.2 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1, é apresentada uma breve introdução sobre o tema, juntamente com a justificativa e os objetivos do trabalho. No Capítulo 2, são revisados os conceitos fundamentais sobre a otimização estrutural em geral, com atenção específica à otimização topológica. Além disso, são abordados princípios básicos sobre o método da densidade e uso de filtros tradicionais.

No Capítulo 3, são apresentados conceitos sobre a manufatura aditiva, incluindo o uso de estrutura de suporte, pesquisas relacionadas à otimização topológica e manufatura aditiva, e uma breve explicação sobre o filtro de estrutura de suporte (AMfilter).

O Capítulo 4 descreve a metodologia para implementação do AMfilter no processo da análise numérica do problema de otimização topológica, bem como o procedimento simulação de impressão 3D dos modelos otimizados.

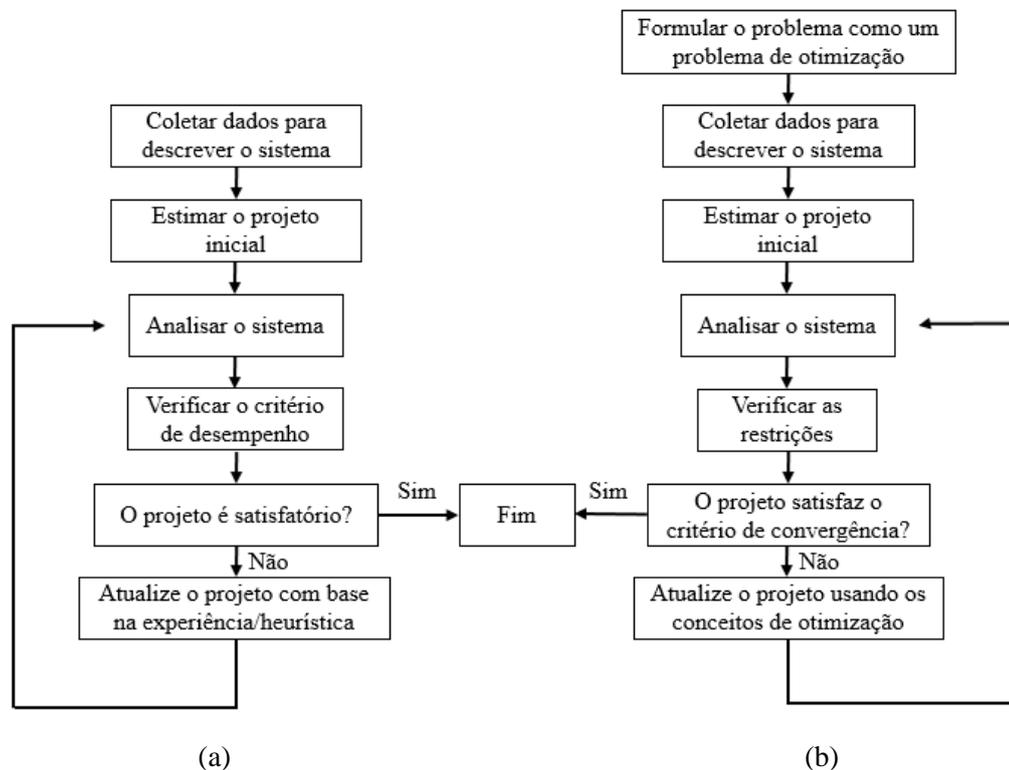
Por fim, no Capítulo 5, são discutidos os resultados obtidos, enquanto as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 6.

2 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A otimização estrutural é uma área em constante expansão na engenharia para análise e concepção de projeto, cujo objetivo é encontrar a melhor configuração estrutural, considerando critérios como rigidez, resistência, economia e estabilidade. Para tanto, são utilizados métodos numéricos na solução do problema de otimização (CHRISTENSEN e KLARBRING, 2009).

Embora a expertise, normas técnicas e intuição sejam valiosas na fase de concepção estrutural, em muitos casos não são suficientes, resultando em sucessivas tentativas de erros e acertos. Nesse contexto, a técnica de otimização apresenta-se como uma abordagem atrativa, na qual é possível formular o problema matematicamente e obter a solução ótima dentre as diversas possibilidades viáveis. Desse modo, a otimização contribui para a redução de tempo e custo envolvidos na concepção da estrutura, bem como garante que o projeto atenda às restrições e necessidades especificadas (ARORA, 2017).

Figura 3 – (a) Comparação da concepção convencional de projetos e (b) usando técnicas de otimização.



Fonte: Adaptada de (ARORA, 2017).

A formulação de um problema de otimização consiste na identificação de uma função que quantifica ao menos uma das características desse problema. Esta função, denominada como função objetivo, depende de variáveis que podem ser ajustadas durante o processo de

otimização, conhecidas como variáveis de projeto. O objetivo é minimizar ou maximizar a função objetivo, de forma que um conjunto de restrições pré-definidas sejam atendidas (NOCEDAL e WRIGHT, 2006). A formulação a seguir apresenta um modelo de otimização padrão que contém essas componentes:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{x}}: f(\mathbf{x}) \\ & \text{Sujeito a:} \\ & \quad g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & \quad h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j = 1, \dots, l \\ & \quad \mathbf{x}^L \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^U \end{aligned} \tag{1}$$

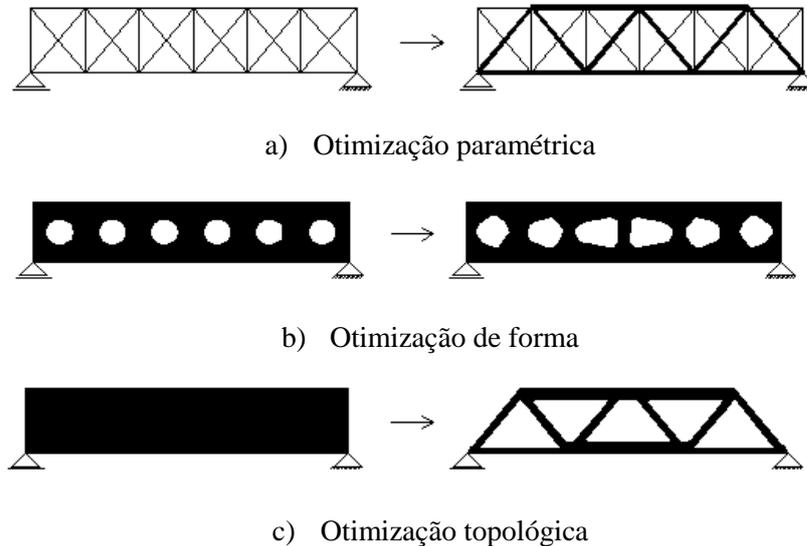
em que, \mathbf{x} corresponde ao vetor das variáveis de projeto, no qual pode assumir valores reais, inteiros ou ambos, a depender do modelo de otimização utilizado (contínuo, discreto ou misto), f é a função objetivo, g_i representa as restrições de desigualdade, h_j as restrições de igualdade e, por fim, \mathbf{x}^L e \mathbf{x}^U corresponde aos limites inferior e superior das variáveis de projeto, respectivamente.

A etapa de modelagem do problema de otimização é considerada uma das mais importantes no processo, pois um modelo muito simples pode resultar em informações pouco úteis, enquanto um modelo excessivamente complexo pode dificultar ou inviabilizar a solução. Após a construção do modelo, a escolha do algoritmo de otimização é fundamental e depende da natureza do problema, do espaço de busca, das restrições e dos requisitos de precisão para a solução do problema (NOCEDAL e WRIGHT, 2006). Algoritmos como Simplex, *Convex linearization* (CONLIN), *Method of moving asymptotes* (MMA), *Optimality Criteria* (OC), são exemplos comuns de utilização, cada um com suas vantagens e limitações.

No geral, a otimização estrutural pode ser classificada em três categorias principais: paramétrica, de forma e topológica, como ilustradas na Figura 4. A otimização paramétrica envolve a variação de parâmetros relacionados à geometria de projeto, como espessura ou área da seção transversal, enquanto mantém a configuração inicial de projeto, permitindo apenas as alterações de dimensões. A otimização de forma busca encontrar a melhor forma ou contorno do domínio da estrutura. Por fim, a otimização topológica, considerada a categoria mais abrangente, procura determinar a distribuição ideal de material dentro de um domínio, levando em consideração as solicitações estruturais, cujas variáveis de projeto podem influenciar

simultaneamente a forma e a conectividade dos elementos que compõem a estrutura (BENDSØE e SIGMUND, 2003; CHRISTENSEN e KLARBRING, 2009).

Figura 4 – Categorias de otimização estrutural.



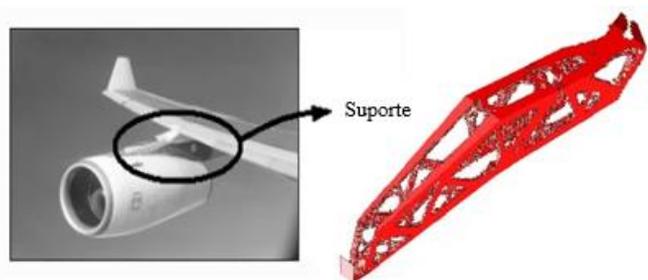
Fonte: Adaptada de (BENDSØE E SIGMUND, 2003).

O processo de otimização topológica tem como principal vantagem a capacidade de criar projetos multifuncionais e de alto desempenho, ao mesmo tempo que reduz o peso e maximiza a resistência da estrutura. Em contraste com as outras formas de otimização, a otimização topológica é independente da configuração inicial da estrutura e possui um espaço de projeto mais amplo. Dessa forma, é possível obter estruturas mais leves, sustentáveis e econômicas. Esse tipo de otimização é amplamente empregado em diversos setores da indústria, incluindo aeroespacial, automotiva, civil, médica, entre outras (ZHU et al., 2021). As Figuras 5 e 6 apresentam exemplos obtidos pela utilização dessa técnica em áreas distintas.

Figura 5 – Exemplos de aplicação da OT nas indústrias aeroespacial e automotiva.



(a) Estrutura de chassi de moto



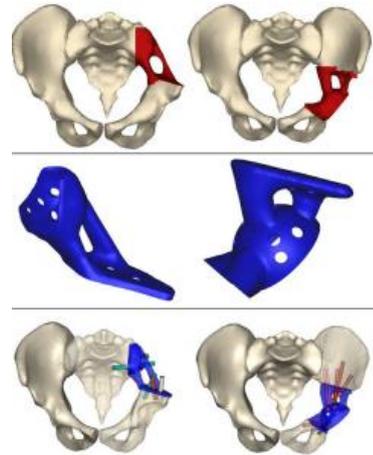
(b) Estrutura de suporte de uma aeronave

Fonte: (FORMLABS, 2023 (a); Adaptada de REMOUCHAMPS et al., 2011 (b)).

Figura 6 – Exemplos de aplicação da OT nas indústrias da construção civil e médica.



(a) Centro Nacional de Convenções do Qatar

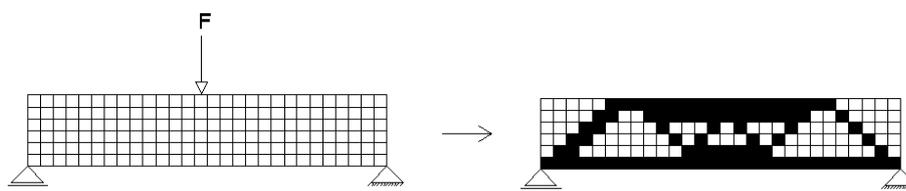


(b) Próteses pélvicas

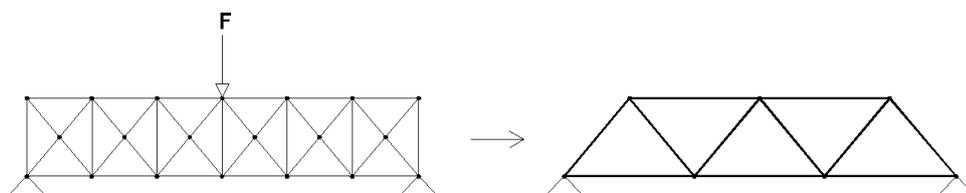
Fonte: (GARRIDO, 2011 (a); IQBAL et al., 2019 (b)).

A otimização topológica é uma técnica que permite ajustes na geometria e na topologia de uma estrutura. Isso implica que ela pode provocar alterações no número de elementos e suas conexões para definir um *layout* estrutural. No caso da abordagem contínua, as variáveis de projeto podem envolver o número de elementos, conectividade, a forma e a distribuição de material, conforme mostra a Figura 7a. Na abordagem discreta, essas variáveis podem se referir à conectividade, às coordenadas e à área da seção transversal dos elementos que compõem a estrutura, como mostrado na Figura 7b (SAADLAOUI, et al. 2017).

Figura 7 – Exemplos de otimização topológica.



(a) Abordagem contínua



(b) Abordagem discreta.

Fonte: Elaborada pela autora

Nas últimas décadas, diversos métodos de otimização topológica foram propostos. Entre eles, destaca-se o método da densidade. Nessa abordagem, o problema de otimização discreta

é flexibilizado para um problema contínuo, permitindo que as variáveis de projeto assumam valores no intervalo de 0 a 1, representando a quantidade de material presente naquela posição específica da estrutura. O método da densidade permite um comportamento mais flexível e uma melhor solução para problemas em estruturas contínuas (ZHU et al., 2021).

Aprofundando-se no método, o item 2.1 fornecerá uma análise mais detalhada. Essa explanação é relevante, uma vez que o método em questão é comumente utilizado para obter soluções que minimizem a flexibilidade (*compliance*) da estrutura, um problema de otimização topológica abordado no código desenvolvido por Andreassen et al. (2010), o qual é utilizado como base de estudo para essa pesquisa.

2.1 Método da densidade

O método da densidade, desenvolvido inicialmente por Bendsoe e Kikuchi em 1988, abriu espaço para que outros pesquisadores explorassem o tema amplamente, tornando-o um dos métodos mais utilizados atualmente para otimização topológica de estruturas contínuas.

O problema de otimização topológica tem como objetivo determinar a distribuição ideal de material em um domínio de projeto específico, tendo como base o carregamento e as condições de contorno do problema. Nesse sentido, o método da densidade busca determinar quais regiões da estrutura devem ser preenchidas por material e quais devem permanecer vazias para alcance da solução ótima. De acordo com os autores Bendsoe e Sigmund (2003), esse método funciona semelhante a uma renderização, representando geometricamente a estrutura em uma imagem preto e branco, na qual o preto representa a presença de material e o branco representa o vazio.

Durante o processo de otimização, o problema de análise estrutural é, geralmente, resolvido pela aplicação de métodos numéricos, sendo muito comum a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF). Seguindo essa estratégia, a estrutura contínua é discretizada em uma malha de elementos finitos, na qual a cada elemento é atribuída uma densidade (ρ_e). Quando $\rho_e = 0$, significa que o elemento “*e*” é vazio e representa a ausência total de material em sua posição dentro do domínio. Por outro lado, quando $\rho_e = 1$, entende-se que aquele elemento está totalmente preenchido com material (elemento sólido) (SIGMUND e PETERSSON, 1998). Com isso, o problema de otimização topológica discreta pode ser escrito de forma geral como:

$$\min_{\rho} f(\rho),$$

Sujeito a:

$$V = \sum_{i=1}^N \rho_e v_e \leq V^*, \quad (2)$$

$$\rho_e = 0 \text{ ou } 1, \quad e = 1, \dots, N$$

em que ρ representa a variável de projeto (vetor densidade), ρ_e e v_e são, respectivamente, a densidade e volume do elemento e V^* é o limite total de volume.

Todavia, o problema mencionado em (2) não está adequadamente definido, o que pode levar à inexistência de soluções (SIGMUND e PETERSSON, 1998). Para lidar com essa questão, Bendsøe (1989) propôs uma relaxação do problema original, seguido por Zhou e Rozvany (1991). O resultado desse enfoque é permitir que as densidades assumam valores intermediários entre 0 e 1, no qual esse intervalo é conhecido como regiões cinzentas ou regiões com densidades intermediárias.

Contudo, como mencionado, espera-se uma solução ótima representada em “preto e branco”. Para tal, utiliza-se o método de penalização chamado *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP), que é eficaz na penalização das densidades intermediárias (SIGMUND e PETERSSON, 1998). Este método estabelece uma relação entre o módulo elasticidade do elemento (E_e) e sua densidade ρ_e , conforme expresso a seguir:

$$E_e(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \quad \text{com} \quad p \geq 1; \quad e = 1, \dots, N \quad (3)$$

Nesse contexto, o parâmetro p representa o fator de penalização que assegura que as variáveis contínuas sejam direcionadas à solução “preto e branco” e E_0 remete ao módulo de elasticidade do material sólido. Entretanto, esse tipo de solução provoca desafios significativos relacionados à singularidade do problema de equilíbrio quando $\rho_e = 0$ (SIGMUND e PETERSSON, 1998). Com isso, é introduzido um limite inferior $\rho_{min} = \varepsilon$, em que ε representa um valor positivo muito pequeno, tipicamente definido como 10^{-3} , mas que ainda é interpretado como um vazio no domínio do problema (BENDSØE e SIGMUND, 2003; CHRISTENSEN e KLARBRING, 2009). Dessa forma, o problema de otimização (2) passa a ser reformulado da seguinte maneira:

$$\min_{\rho} f(\rho),$$

Sujeito a:

$$V = \sum_{i=1}^N \rho_e v_e \leq V^*, \quad (4)$$

$$0 < \rho_{min} \leq \rho_e \leq 1, \quad e = 1, \dots, N$$

Dado que a presente pesquisa aborda o problema de otimização topológica que trata da minimização da flexibilidade em específico a abordada no estudo desenvolvido por Andreassen et al. (2010), a formulação (4) é reorganizada de forma a refletir esse objetivo:

$$\min_{\rho} c(\rho) = \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u}$$

Sujeito a:

$$\mathbf{V}(\rho) = \text{fr} V_0 \quad (5)$$

$$0 < \rho_{min} \leq \rho_e \leq 1, \quad e = 1, \dots, N$$

Com:

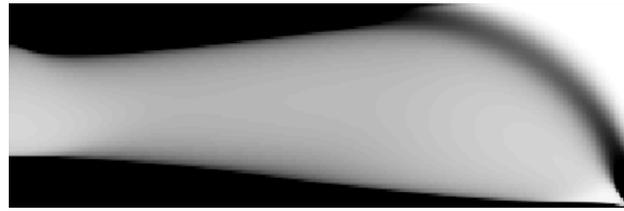
$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F}$$

Na formulação acima, c representa a flexibilidade, \mathbf{u} e \mathbf{F} são os vetores globais de deslocamentos e forças nodais, respectivamente. \mathbf{K} é a matriz de rigidez da estrutura, \mathbf{V} é o vetor que define os volumes de cada elemento, V_0 representa o volume do domínio de projeto e fr representa a fração de volume prescrita, indicando a porcentagem de volume que deve ser ocupada pelo material na estrutura. Por sua vez, ρ_{min} representa a densidade mínima e N é o número de elementos utilizados para discretizar o domínio de projeto.

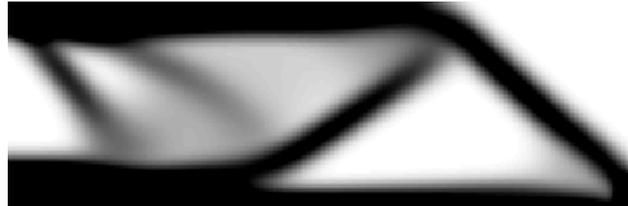
Estudos conduzidos por Bendsøe e Sigmund (1999) demonstraram que para alcançar uma boa convergência e reduzir o surgimento de densidades intermediárias, recomenda-se adotar $p = 3$, o que foi reforçado posteriormente por outros autores (SIGMUND e MAUTE, 2013).

A Figura 8 apresenta a solução da otimização de uma viga Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB). A solução ilustra as variações para diferentes valores de penalização p . Observa-se que, à medida que o valor de p aumenta, a presença de densidade intermediária no domínio de projeto diminui. Esses resultados foram obtidos por meio do código de otimização de 88 linhas desenvolvido em MATLAB[®] por Andreassen et al. (2010).

Figura 8 – Resultados da otimização da viga, com diferentes valores para p .



(a) $p = 1$



(b) $p = 2$



(c) $p = 3$

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao longo do tempo, o método SIMP clássico passou por modificações. Deste modo, a equação (3) pode ser reescrita como:

$$E_e = E_e(\rho_e) = E_{min} + \rho_e^p(E_0 - E_{min}), \quad \rho_e \in [0,1] \quad (6)$$

Na equação apresentada, E_{min} representa a rigidez do material vazio, assumindo um pequeno valor não nulo para evitar possíveis problemas de singularidade na matriz de rigidez. Essa evolução do método possibilitou a implementação mais flexível e direta de filtros adicionais, tais como o filtro de densidade e de sensibilidade, os quais podem melhorar o processo de otimização, contribuindo para a redução da instabilidade numérica (SIGMUND, 2007).

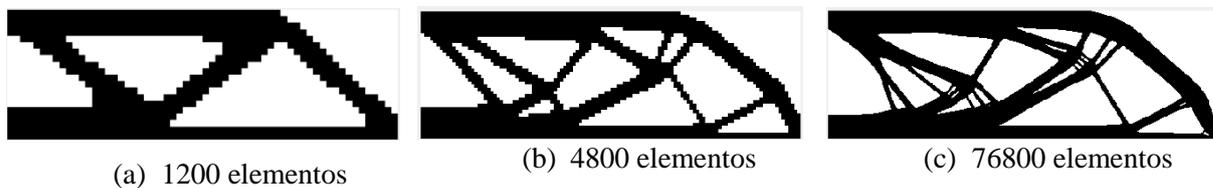
2.1.1 Instabilidade numérica

Os problemas de instabilidade numérica podem ocorrer durante o processo de otimização da estrutura, principalmente quando envolve análises de elementos finitos e cálculos numéricos. Nesse caso, o algoritmo de otimização pode não convergir corretamente, resultando em projetos não ótimos. Na otimização topológica para estruturas contínuas, tais problemas

podem surgir devido à dependência de malha e/ou ao tabuleiro de xadrez (KOTUCHA e HACKL, 2007).

A dependência de malha está associada à sensibilidade da solução ótima em relação à discretização do domínio, ou seja, à forma como a malha de elementos finitos é definida. Isso significa que a solução encontrada pelo processo de otimização varia à medida que a malha é refinada, resultando em alterações na configuração estrutural interna em elementos mais finos e com maior rigidez, como ilustrado na Figura 9 (BENDSØE E SIGMUND 2003).

Figura 9 – Exemplo de dependência de malha.



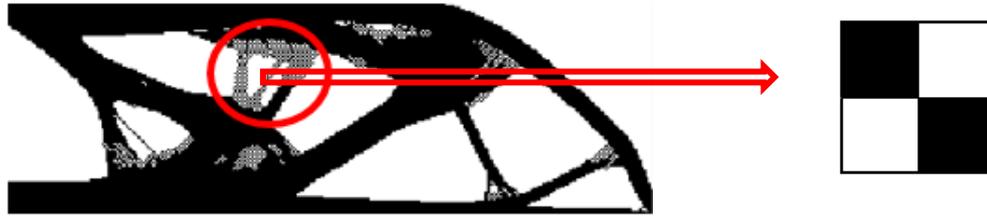
Fonte: Elaborada pela autora.

Para contornar a dependência de malha e obter um problema bem definido, além da relaxação mencionada anteriormente, é importante definir adequadamente as restrições do problema. Isso pode ser alcançado introduzindo restrições adicionais para limitar a oscilação máxima permitida na densidade do material, ou seja, o número máximo de perfurações (vazios) presentes na estrutura. Ademais, também pode ser feita a implementação de filtros durante o processo de otimização, a exemplo do filtro de sensibilidade, como forma de mitigar a dependência de malha (SIGMUND e PETERSSON, 1998).

Outro desafio comum a esse tipo de otimização é a ocorrência de um padrão xadrez, conhecido como “tabuleiro de xadrez”. Esse comportamento indesejado consiste na alternância entre elementos sólidos e vazios na estrutura, ilustrado na Figura 10, ao invés de uma distribuição suave e contínua. No passado, acreditava-se que esse resultado pudesse representar de alguma forma a microestrutura ótima. No entanto, estudos desenvolvidos por Díaz e Sigmund (1995) e Jog e Haber (1996) demonstraram que o tabuleiro de xadrez é um problema relacionado à modelagem numérica da rigidez.

Esse problema geralmente ocorre devido à utilização de elementos quadriláteros bilineares de quatro nós (Q4) na análise de elementos finitos. Esses elementos introduzem maior rigidez artificial ao modelo numérico, resultando em um arranjo estrutural mais eficiente, contudo, não representa a solução real para o problema (DÍAZ e SIGMUND, 1995).

Figura 10 – Solução apresentando padrões xadrez.



Fonte: Elaborada pela autora.

Dessa forma, sugerem-se técnicas para contornar o problema do tabuleiro de xadrez, como a utilização de elementos finitos de ordem superior, exemplificada pelos elementos quadrangulares de oito ou nove nós (Q8 e Q9). Esses elementos empregam funções de interpolação de maior eficiência e precisão ao descrever o campo de deslocamento da estrutura. Porém, é importante observar que esse método pode ser computacionalmente custoso, em razão do aumento dos graus de liberdade em análise. Por essa razão, esses elementos são raramente utilizados na otimização topológica, embora a maioria dos autores afirme que soluções baseadas neles não apresentam problemas relacionados ao tabuleiro de xadrez. Como alternativa ao uso de elementos de ordem superior, pode-se recorrer a filtros, como os de sensibilidade ou densidade (CHRISTENSEN e KLARBRING, 2009; SIGMUND e PETERSSON, 1998).

2.1.2 Filtro de sensibilidade

No contexto da otimização topológica, o filtro de sensibilidade desempenha um papel importante, no que diz respeito à suavização da distribuição de densidade de material, o que garante soluções confiáveis e independentes da discretização da malha de elementos finitos. Para atingir esse objetivo, o filtro ajusta a sensibilidade de projeto de um elemento específico por meio do cálculo da média ponderada da sensibilidade de todos os elementos na vizinhança desse elemento (BENDSØE e SIGMUND, 2003). Assim, a sensibilidade da função objetivo pode ser ajustada em razão da densidade relativa de cada elemento, como mostra a equação a seguir:

$$\frac{\widehat{\partial c}}{\partial \rho_k} = \frac{1}{\rho_k \sum_{i=1}^N H_i} \sum_{i=1}^N H_i \rho_i \frac{\partial c}{\partial \rho_i} \quad (7)$$

O fator de peso H_i pode ser escrito como:

$$H_i = r_{min} - dist(k, i), \quad \{i \in N \mid dist(k, i) \leq r_{min}\}, \quad k = 1, \dots, N \quad (8)$$

Em que:

$dist(k, i)$ – Operador que representa a distância entre os centroides dos elementos k e i ;

r_{min} – Raio mínimo de projeção do filtro;

$\frac{\partial c}{\partial \rho_i}$ – Sensibilidade analítica do elemento i .

2.1.3 Filtro de densidade

A prática de implementar filtros de densidade para suavizar funções durante processos de otimização foi inicialmente proposta por Bruns e Tortorelli (2001). Nesse contexto, Bourdin, no mesmo ano, forneceu uma fundamentação matemática, confirmando a viabilidade e eficácia dessa abordagem (SIGMUND, 2007).

O filtro de densidade opera de maneira semelhante ao filtro de sensibilidade, com a diferença que, neste caso, a densidade de cada elemento é ajustada com base em uma média ponderada das densidades dos elementos vizinhos (SIGMUND, 2007). Dessa forma, a densidade modificada ($\tilde{\rho}_e$) pode ser expressa em função das densidades vizinhas ($\rho_i \in N_e$):

$$\tilde{\rho}_e = \tilde{\rho}_e(\rho_i \in N_e) \quad (9)$$

na qual, N_e especifica a vizinhança do elemento “ e ” e pode ser escrito da seguinte forma:

$$N_e = \{i \mid \|x_i - x_e\| \leq R\} \quad (10)$$

em que x_i é a localização do centróide do elemento i no espaço e R é o raio do filtro. Assim, mediante a modificação da densidade a rigidez também é ajustada. Logo, a rigidez passa a ser definida da seguinte maneira:

$$E_e = E_e(\rho) = E_e(\tilde{\rho}_e) = E_{min} + \tilde{\rho}_e^p (E_0 - E_{min}) \quad (11)$$

É importante ressaltar que os operadores de filtros devem preservar o volume de material, ou seja, o volume deve permanecer o mesmo antes e após o processo de filtragem. Porém, isso nem sempre é exato devido a influência dos limites do domínio, pois os elementos próximos às bordas podem não ser processados corretamente, visto que nesses limites possuem menos elementos para o ajuste da média ponderada para o cálculo da $\tilde{\rho}_e$. Para que essa influência não se torne um problema, a restrição de fração de volume também deve ser modificada (SIGMUND, 2007).

Para a função de densidade modificada, a restrição de volume também deve ser imposta à densidade física (filtrada). Logo, a restrição de volume para este caso pode ser definida como:

$$g = \frac{V(\tilde{\rho})}{V_0} - 1 = \sum_e \frac{v_e \tilde{\rho}_e}{V_0} - 1 \leq 0 \quad (12)$$

Os filtros discutidos até o momento são considerados tradicionais devido à sua ampla utilização em problemas otimização topológica, onde desempenham um papel importante para obtenção de soluções eficientes, como destacado anteriormente. No entanto, durante o processo de otimização, é possível inserir outros tipos de filtros para garantir que restrições específicas do problema sejam atendidas.

A otimização topológica oferece liberdade para desenvolvimento de projetos modernos e de alta performance. Contudo, a complexidade e o nível de detalhe desses projetos muitas vezes os tornam incompatíveis com os métodos de fabricação convencionais. Para abordar essa lacuna, Langelaar (2016) desenvolveu o AMfilter, um filtro específico para manufatura aditiva, um método industrial cada vez mais popular na produção de peças complexas. A integração do AMfilter ao processo de otimização certifica que os projetos resultantes atendam às limitações geométricas necessárias para a fabricação, visando eliminação de superfícies em balanço ou regiões com angulações significativas que requerem estrutura de suporte de sacrifício para viabilizar a produção da peça. Essa abordagem será discutida em detalhes em um subitem posterior deste trabalho, pois sua aplicação requer conceitos tanto de otimização topológica quanto de MA, abordado no próximo capítulo.

3 MANUFATURA ADITIVA

Com a evolução das tecnologias, os mercados passaram a exigir melhorias no desenvolvimento e fabricação de produtos, em especial no controle de qualidade e flexibilidade, bem como na redução de custo e tempo de produção. Tendo isso em vista, as empresas estão implementando alterações na gestão de processos e empregando novas técnicas e ferramentas para projetar, analisar, simular e otimizar componentes e sistemas de produtos (VOLPATO e CARVALHO, 2017; GODEC et al., 2022).

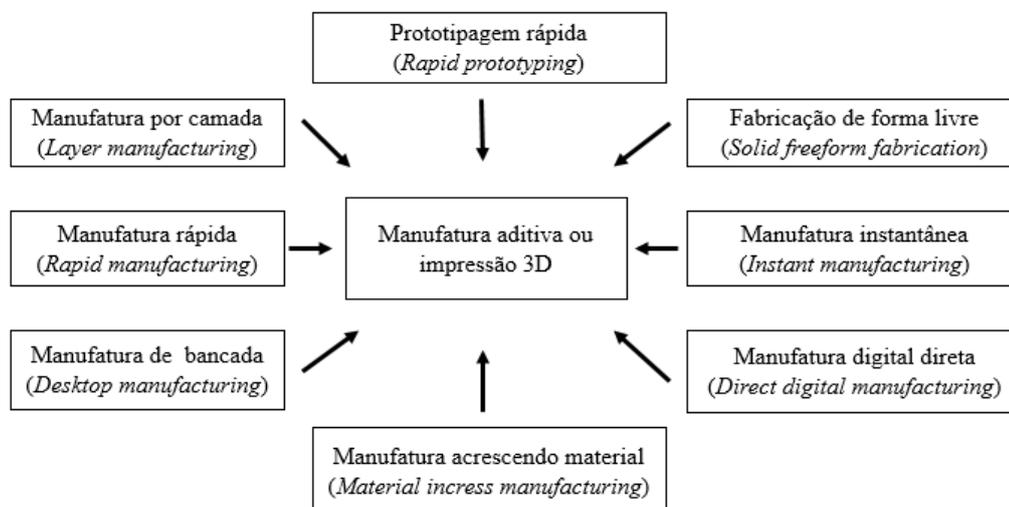
Dessa forma, a manufatura aditiva entra como uma tecnologia do sistema de produção que possibilita a fabricação de objetos tridimensionais camada por camada a partir de modelos geométricos normalmente desenvolvido em sistemas *Computer Aided Design* (CAD). Essa tecnologia facilita a criação de peças com geometrias complexas de diferentes materiais, na qual o processo de impressão é realizado de forma automática e relativamente rápida se comparado com a fabricação convencional (usinagem e fundição). Com isso, a MA pode reduzir o tempo e o custo necessários para produzir uma nova peça, desde o conceito inicial até a produção (GODEC et al., 2022).

Historicamente, a MA começou a ser implementada na década de 1980, inicialmente com a finalidade de que protótipos físicos fossem fabricados de forma rápida. Isso deu origem ao termo tão disseminado de “prototipagem rápida”. No entanto, com o passar dos anos e a evolução das máquinas de impressão, em que é possível imprimir o produto de forma direta, o termo “protótipo” não mais condiz com as aplicações recentes (GIBSON et. al., 2015).

Nesse contexto, surgiram discussões acadêmicas e técnicas que culminaram na definição da manufatura aditiva pela *ASTM International Committee F42* em 2009, como o termo mais adequado para caracterizar todos os processos de união de materiais camada por camada para obtenção de peças. Esse termo é mais abrangente e não se limita apenas à produção de protótipos, sendo adequado para descrever a fabricação de produtos em diversos setores.

A Figura 11 apresenta os principais termos que podem ser encontrados em trabalhos científicos e até mesmo no setor da indústria. Nesta Figura é possível observar que há uma relação de sinônimo entre a MA e a impressão 3D. Entretanto, é importante destacar que a manufatura aditiva é um método geral de fabricação que abrange várias tecnologias, incluindo a impressão 3D, já que matéria-prima empregada no processo é depositada gradualmente em camadas até formar o objeto físico final (MORANDINI e DEL VECHIO, 2020).

Figura 11 – Variações da nomenclatura da área da MA.



Fonte: Adaptada de (VOLPATO E CARVALHO, 2017).

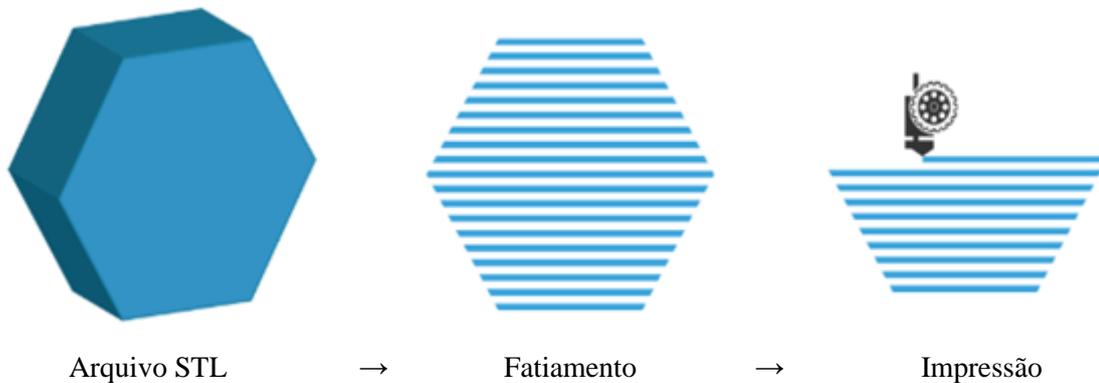
A manufatura aditiva envolve diversas etapas, desde a escolha dos materiais utilizados para impressão até a fase de pós-processamento do produto, quando necessário, onde cada uma dessas etapas tem um papel importante na qualidade e na durabilidade do produto. Volpato e Carvalho (2017) destacam, de maneira geral, as fases necessárias para o desenvolvimento de um projeto:

- (1) Preparação do modelo geométrico tridimensional (geralmente é feito usando um sistema CAD);
- (2) Obtenção do formato específico para a MA a partir do modelo geométrico 3D. Os formatos geralmente utilizados são, o *StereoLithography* (STL), o *Additive Manufacturing File Format* (AMF), dentre outros;
- (3) Planejamento do processo de fabricação por camada, utilizando *software* de fatiamento, no qual é possível definir estratégias de deposição de material, assim como verificar a necessidade ou não de utilizar estruturas de suporte, entre outras configurações;
- (4) Fabricação da peça em si no equipamento de MA;
- (5) Pós-processamento, que varia de acordo com a técnica utilizada para impressão.

A Figura 12 ilustra o processo de fabricação de uma peça utilizando a tecnologia de MA, em que a deposição sucessiva camada a camada do material consegue descrever a geometria de acordo com as informações do modelo tridimensional. Logo, é possível obter objetos geometricamente complexos ou difíceis de serem produzidos de forma tradicional.

Outra característica importante é a flexibilidade de alteração ou correção de falhas ainda no modelo digital, reduzindo a possibilidade de retrabalhos e custo de produção.

Figura 12 – Representação do processo de MA.



Fonte: Adaptada de (FABHEADS, 2019).

Uma das classificações dos processos de MA pode ser feita de acordo com o estado inicial dos materiais utilizados na fabricação. Dessa forma, são classificados em líquido, filamento/pasta, pó e sólido. Entretanto, tais informações não são suficientes para distinguir o princípio de processamento do material das diferentes tecnologias (PRAKASH, et al., 2018). Com isso, a NBR ISO/ASTM 52900:2018 propõe uma classificação em sete categorias das tecnologias da MA, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1– Classificação das tecnologias de MA

Categorias das tecnologias	Processo de fabricação	Técnicas de impressão
Jato aglutinante (<i>binder jetting</i>)	Um agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó.	Impressão com pulverização de aglutinante, tecnologia da <i>VoxelJet</i> , <i>ExOne</i> , <i>Three-dimensional printing</i> (3DP)
Deposição por energia direcionada (<i>direct energy deposition</i>)	A energia térmica focada é usada para unir materiais por fusão, à medida que estão sendo depositados.	Forma final obtida por laser e feixes de elétrons, <i>Laser Metal Deposition</i> (LMD) e <i>Electron Beam Additive Manufacturing</i> (EBAM), respectivamente. <i>Direct metal deposition</i> (DMD).
Extrusão de material (<i>material extrusion</i>)	O material é depositado seletivamente por meio de um bico extrusor ou orifício.	Impressão por fusão e deposição de material, <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM).

Continuação		
Jateamento de material (<i>material jetting</i>)	As gotas de material de fabricação são depositadas seletivamente.	Impressão por múltiplos jatos, curados por luz UV ou por calor, tecnologias <i>Inkjet printing</i> (IJP), <i>Multijet modeling</i> (MJM) e <i>Ballistic particle manufacturing</i> (BPM).
Fusão em leito de pó (<i>powder bed fusion</i>)	A energia térmica funde seletivamente regiões do leito de pó.	<i>Multi Jet Fusion</i> (MJF), <i>Selective Laser Sintering</i> (SLS), <i>Selective Laser Melting</i> (SLM) e <i>Electron Beam Melting</i> (EBM).
Laminação de folha (<i>sheet lamination</i>)	As folhas de material são ligadas para formar uma peça.	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (LOM) e <i>Selective Deposition Lamination</i> (SDL), outros.
Fotopolimerização em cuba (<i>vat photopolymerization</i>)	O fotopólímero líquido em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz.	Impressão por laser, projetor e LED e oxigênio, <i>Stereolithography</i> (SLA), <i>Digital Light Processing</i> (DLP) e <i>Continuous Digital Light Processing</i> (CDLP), respectivamente.

Fonte: Adaptado da (NBR ISSO/ASTM 52900:2018).

Considerada como uma das tecnologias da revolução da indústria 4.0, a MA está constantemente em desenvolvimento para acondicionar diferentes materiais de produção, como polímeros, metais e cerâmica. Esta tecnologia tem sido amplamente adotada na fabricação de peças para diversas áreas de aplicação, incluindo a engenharia, medicina, indústria aeroespacial e automotiva. Ao contrário dos métodos convencionais, a MA permite a produção de peças como um único componente sem necessidade de moldes, resultando em economia significativa de material e tempo (KUMAR e SATHIYA, 2020).

Apesar dos avanços na tecnologia de MA, permanecem desafios relacionados à resistência mecânica das peças, bem como problemas de distorção e empenamento do material. Além disso, a precisão e qualidade superficial das peças podem ser limitadas se comparadas com os métodos convencionais de fabricação, necessitando frequentemente de atividades de pós-processamento, como limpeza, polimento, pintura e remoção de material de suporte, a fim de alcançar melhores resultados (VOLPATO e CARVALHO, 2017).

3.1 Estrutura de suporte

O material de suporte é essencial quando partes do modelo 3D apresentam superfícies inclinadas com ângulo significativo ou regiões suspensas. Normalmente, adota-se o ângulo limite de 45° como regra geral, amplamente discutido na literatura referente à MA. Contudo, é importante ressaltar que esse ângulo pode variar dependendo do material utilizado para impressão, informação que pode ser obtida junto ao fabricante para melhor eficiência do processo. Ademais, nem todas as técnicas de MA requerem de estruturas de suporte durante o processo de fabricação, como destacado no Quadro 2 (FIGUEIREDO, 2022).

Quadro 2– Técnicas de impressão e necessidade de material de suporte.

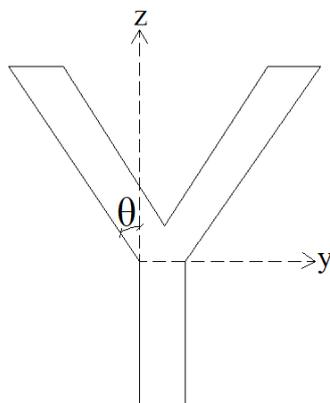
Técnicas de impressão	Requer estrutura de suporte	Função do suporte		
		Dissipação térmica	Capacidade de impressão	Equilíbrio da peça
3DP	Sim		✓	✓
LMD e EBAM	Não			
DMD	Sim	✓	✓	✓
FDM	Sim	✓	✓	✓
IJP e MJM	Não			
BPM	Sim		✓	✓
SLS	Geralmente não é necessário, depende do material.			
SLM	Sim	✓	✓	✓
EBM	Sim	✓		
LOM	Não			
SLA	Sim		✓	✓

Fonte: Adaptado da (JIANG et al., 2018)

Ao analisar as informações do Quadro 2, observam-se diferentes funções para a estrutura de suporte. Algumas técnicas demandam esse suporte para evitar deformações ou falhas devido à gravidade durante o processo de fabricação, além de utilizá-lo para conectar partes da peça que não estão diretamente ligadas à estrutura principal, deixando-a em equilíbrio. Além disso, as estruturas de suporte também são úteis para minimizar distorções térmicas, especialmente em casos que se utiliza o metal como material de fabricação.

Para determinar quais superfícies exigirão material de suporte, o software de fatiamento verifica se o ângulo entre o eixo vertical e a superfície inclinada (Figura 13) é maior que 45° , caso seja, a peça exigirá material de suporte (DIEGEL, 2022).

Figura 13 – Definição do ângulo de inclinação.

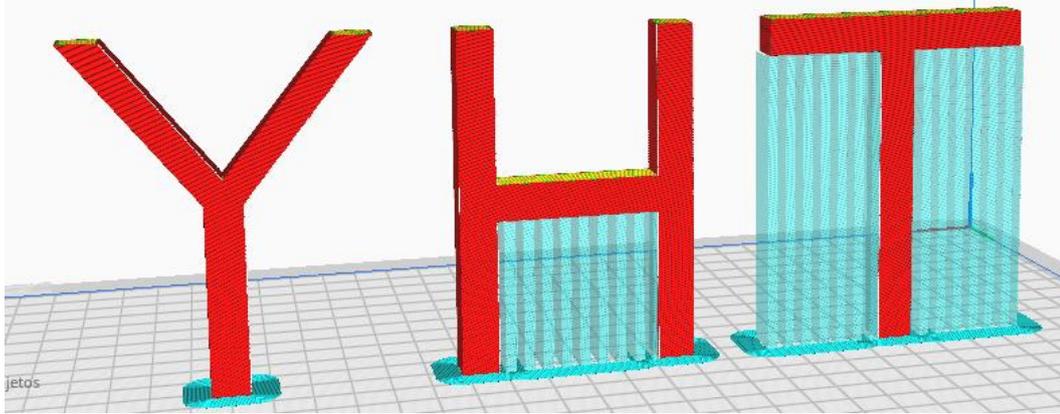


Fonte: Elaborada pela autora

A complexidade dos detalhes geométricos do modelo também é um fator que influencia diretamente no uso e quantidade de material de suporte (JIANG et al., 2018). Um exemplo prático dessa necessidade pode ser observado na comparação entre os formatos das letras “Y”, “H” e “T”, conforme ilustrado Figura 14. Enquanto a letra “Y” poder ser impressa sem suporte devido à sua estrutura bifurcada, que não ultrapassa o ângulo de 45° em relação ao eixo de construção vertical, a letra “H” pode exigir suporte para o elemento na horizontal caso os dois elementos verticais estejam afastados por mais de 5 mm. Por fim, a letra “T” com ambos os braços horizontais formando um ângulo de 90° com o elemento vertical, também necessitará de suporte (FIGUEIREDO, 2022).

O uso de estruturas de suporte pode acarretar impactos adversos, dentre eles, reduzir a eficiência do material, aumentar o tempo de impressão e resultar em consumo maior de energia. Ainda, sua remoção pode causar danos superficiais à peça principal. Kumar e Sathiya (2020) ressaltam que os materiais utilizados para essas estruturas devem ser facilmente removíveis, preferencialmente por ruptura ou solúvel em água/solvente. No entanto, essa abordagem pode ser inviável para técnicas que empregam metais no processo de fabricação.

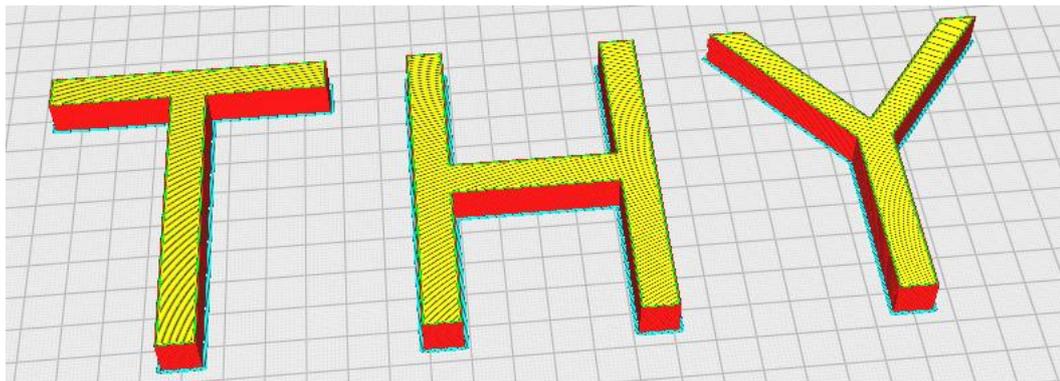
Figura 14 – Representação geométrica de modelos e material de suporte.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Ao analisar o tempo de impressão estimado para as três letras da Figura 14, o software de fatiamento estima um total de 12 horas e 20 minutos, dos quais 3 horas e 52 minutos são dedicados à impressão de suportes. No entanto, é importante destacar que pequenas alterações na orientação das peças na mesa de impressão podem alterar significativamente a exigência do uso de suportes. Por exemplo, ao posicionar as letras na horizontal, é possível eliminar completamente as superfícies salientes, suprimindo a demanda dessas estruturas, como ilustrado na Figura 15. Essa mudança na orientação não apenas otimiza o tempo de impressão, mas também minimiza o desperdício de material. Desse modo, a impressão das letras sem suporte é reduzida para 7 horas e 57 minutos.

Figura 15 – Representação dos modelos sem a necessidade de suporte.



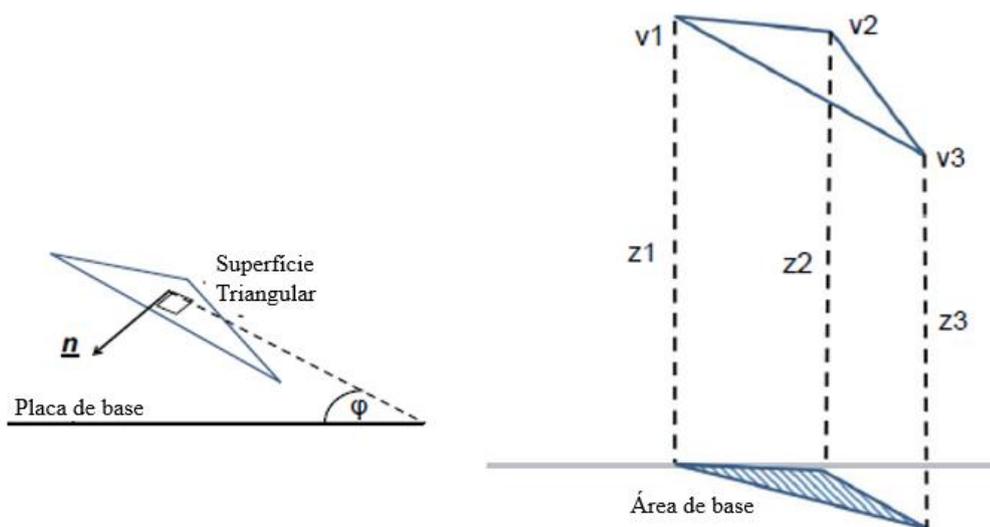
Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Portanto, fica claro que fatores como a geometria e a orientação de construção podem representar desafios para a manufatura aditiva no que diz respeito ao uso de suporte. Porém, tais obstáculos conseguem ser superados ou mitigados em alguns casos. Ao conectar esse ponto com a otimização topológica, esses fatores podem ser inclusos ao processo como restrições, contribuindo para o desenvolvimento de modelos mais eficientes e precisos.

Pesquisas sobre restrições de manufatura aditiva integrada à otimização topológica de projetos têm sido desenvolvidas ao longo do tempo. Esses estudos permitem que tais restrições sejam consideradas diretamente durante a otimização estrutural, assegurando que apenas modelos viáveis para a fabricação sejam executados (GÖKDAG e ACAR, 2023). Um exemplo é o trabalho desenvolvido por Morgan et al. (2016) que explorou a técnica de otimização estrutural para determinar a orientação de construção mais eficiente, de modo a minimizar o volume da estrutura de suporte necessário durante a construção. Eles desenvolveram um software em MATLAB®, no qual o algoritmo implementado inicia a busca a partir dos vários pontos de partida definidos, explorando diferentes rotações da peça para identificar a configuração com a menor exigência de suportes.

A partir dessas informações, o software realiza o cálculo do volume de suporte com base no ângulo crítico entre a placa de base e a superfície do elemento, conforme a Figura 16. É importante destacar que, conforme apontado por Morgan et al. (2016), esse cálculo é baseado exclusivamente em fatores geométricos. Ele não considera a necessidade de suporte adicional para lidar com tensões internas geradas durante o processo de impressão, nem na exigência de dissipação de calor. Em outras palavras, apenas é considerado a função de suporte para capacidade de impressão.

Figura 16 – Ilustração do volume de suporte calculado a partir da projeção do elemento na placa de base.



Fonte: Adaptada de (MORGAN et al., 2016).

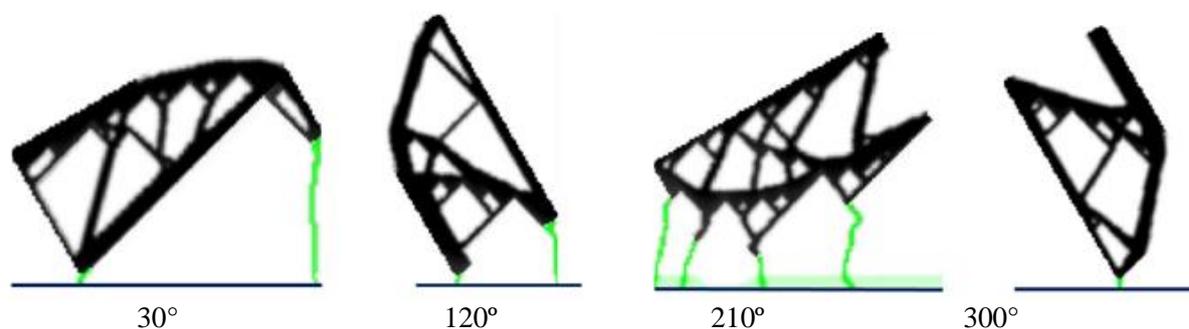
De forma mais abrangente, Langellar (2018) conduziu um estudo sobre a otimização simultânea da geometria da peça, layout da estrutura de suporte e orientação de construção. Este tipo de problema envolve uma otimização topológica altamente não linear e não convexa, na

qual soluções globalmente ótimas são difíceis de serem obtidas. No entanto, pode-se encontrar soluções satisfatórias, que possam contribuir para o equilíbrio entre o custo de fabricação e o desempenho da peça.

Nesse processo, são exploradas diversas orientações possíveis, simultaneamente, em um processo que otimiza e avalia o desempenho de uma única geometria. Além disso, à medida que o projeto evolui, também é avaliada qual orientação exige menos material de suporte. Assim, a geometria impressa pode ser definida a partir das combinações das geometrias testadas em todas as orientações.

Na Figura 17 é apresentado um exemplo de otimização topológica de uma viga em balanço em quatro orientações possíveis de impressão. Observa-se que a estrutura não está diretamente posicionada na placa de base, iniciando primeiramente a impressão da estrutura de suporte (destacada na cor verde). Esse resultado é justificado, pois Langellar (2018) considerou a tecnologia de fusão de leito de pó de metal para construção, e nessa tecnologia é comum essa distância para facilitar a remoção das peças e reduzir as tensões residuais.

Figura 17 – Exemplo de otimização topológica de uma peça em quatro orientações diferentes.



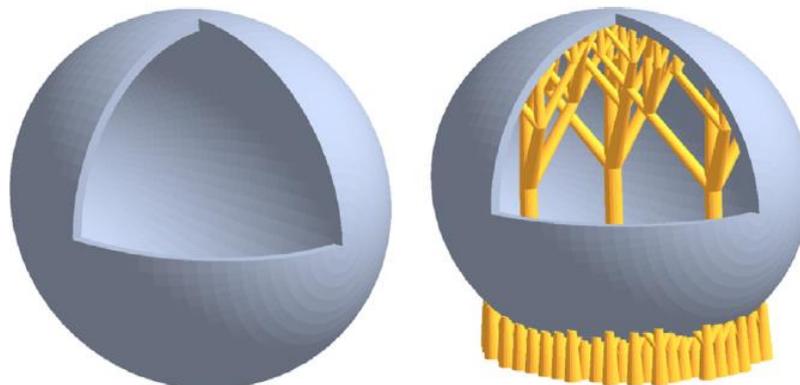
Fonte: (LANGELAAR, 2018).

Visualmente, comparando os resultados do autor, observa-se que a orientação de 300° se destaca como a mais eficiente entre as demais. Nessa orientação, a quantidade de material de suporte é a menor possível, e a topologia de projeto parece ser a melhor. Isso mostra que as restrições de manufatura (geometria da peça, layout da estrutura de suporte e orientação de construção) foram atendidas dentro do problema de otimização topológica.

Em contraste, a pesquisa conduzida por Zhou et al. (2019) abordou a presença de suporte considerando a estabilidade da estrutura junto com a eficiência no uso de material. Dessa forma, foi desenvolvido um método para geração de estruturas de suporte que se assemelham a uma árvore, inspirado no sistema de *Lindemayer*, que permite descrever o crescimento de estruturas

complexas por meio de regras matemáticas. Esses suportes são de fácil remoção e requerem menos tempo de produção. A Figura 18 apresenta um exemplo prático obtido com este estudo.

Figura 18 – Exemplo da geração de suporte em modelos vazados.



Fonte: (ZHOU et al., 2019).

Os exemplos de pesquisas supracitados demonstram que a integração de ambas as áreas discutidas, otimização topológica e manufatura aditiva, resultam em processos mais eficientes, abordando simultaneamente os desafios de concepção e fabricação (GÖKDAG e ACAR, 2023). Isso permite que exigências de fabricação sejam consideradas desde as fases iniciais do projeto, garantindo a produção de projetos executáveis e otimizados.

3.2 Técnica de extrusão de material

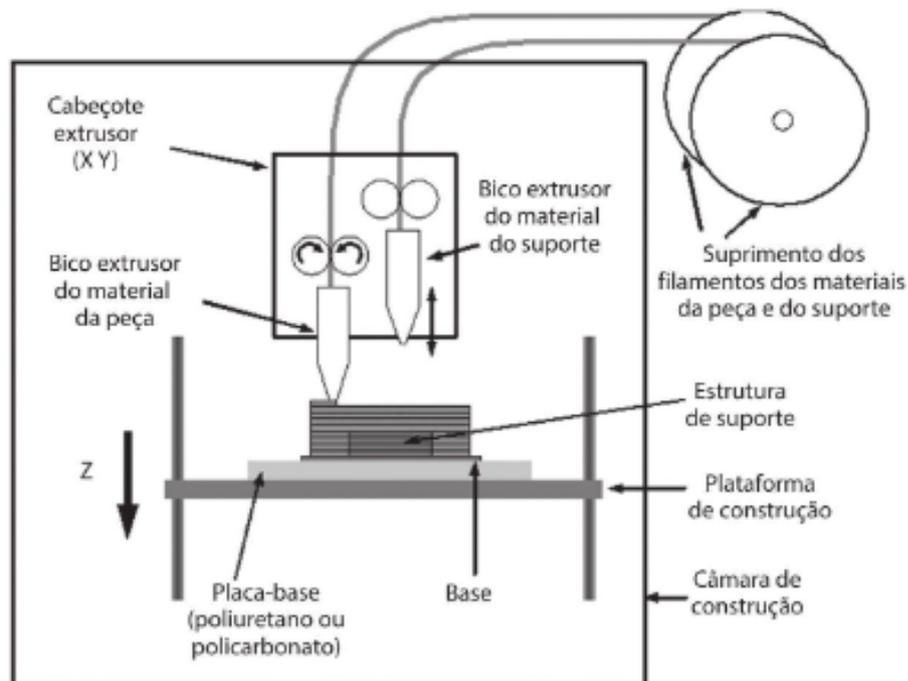
A fabricação de peças pelo princípio de extrusão de material em grande parte deriva da tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), desenvolvida pela empresa Stratasys em 1991. Esta tecnologia é uma das mais populares do mercado de impressão 3D, em razão do seu processo de fabricação simples e seguro, baixo custo de equipamento e uma grande disponibilidade de matéria-prima (filamentos) (GODEC et al., 2022).

No FDM os filamentos são produzidos em material termoplástico, como o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o ácido polilático (PLA), os quais possuem a capacidade de serem derretidos e moldados quando expostos a altas temperaturas e pressão. Quando em contato com temperatura amena, estes materiais se solidificam rapidamente, mantendo a forma e a estrutura desejada. É possível moldar e reprocessar mais de uma vez os termoplásticos. No entanto, isso requer cuidado, pois esses materiais perdem parte de suas propriedades, como resistência e durabilidade (CANEVAROLO JR e SEBASTIÃO, 2013; CARNEIRO; SILVA; GOMES, 2015).

No processo de impressão pela tecnologia FDM, o aquecimento do material supracitado é realizado na câmara de extrusão da impressora 3D, até atingir a temperatura de fusão. Posteriormente, esse material é expelido em estado pastoso pelo bico extrusor e depositado na plataforma de impressão ou na camada previamente depositada (Figura 19). A velocidade de impressão e temperatura são controladas de forma a permitir a solidificação do material, garantindo a aderência entre as camadas e a plataforma, fatores essenciais para a qualidade do produto (KUMAR e SATHIYA, 2020; VOLPATO, 2017).

O movimento do cabeçote do bico extrusor ao longo dos eixos X e Y, permite a obtenção da geometria de cada camada. À medida que as camadas vão sendo depositadas, a plataforma de impressão se desloca no eixo Z para baixo na altura do filamento (espessura da camada), permitindo a construção de novas camadas até a finalização do produto. Há casos em que a plataforma de impressão é fixa e, nessa situação, o bico extrusor se movimenta para cima e assim continua o processo (VOLPATO, 2017).

Figura 19 – Processo de impressão por FDM.

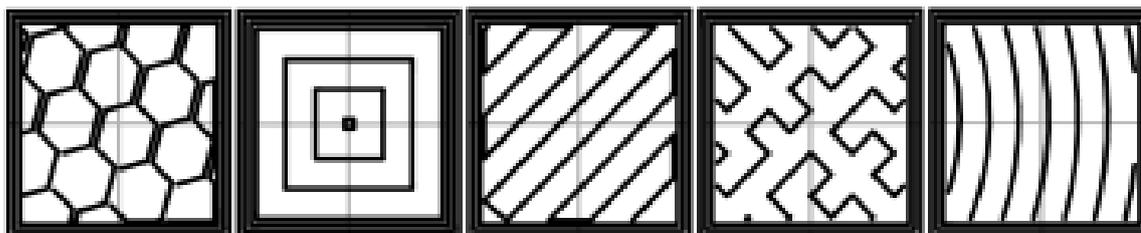


Fonte: (VOLPATO, 2017).

Inicialmente, as camadas são depositadas contornando a parte externa do perímetro da peça, no qual um número maior de camadas influencia positivamente na rigidez da mesma. Em seguida, são criadas estruturas de preenchimento das áreas vazadas em formatos geométricos (retângulos, triângulos, hexágonos, retas, curvas de Hilbert e concêntricas), conforme ilustra a

Figura 20. O processo de preenchimento é uma etapa realizada durante a configuração de impressão, onde são definidos parâmetros como espessura da camada, largura da extrusão, velocidade de plotagem, padrão de preenchimento, orientação e percentual de densidade do mesmo (VELOSO, 2020).

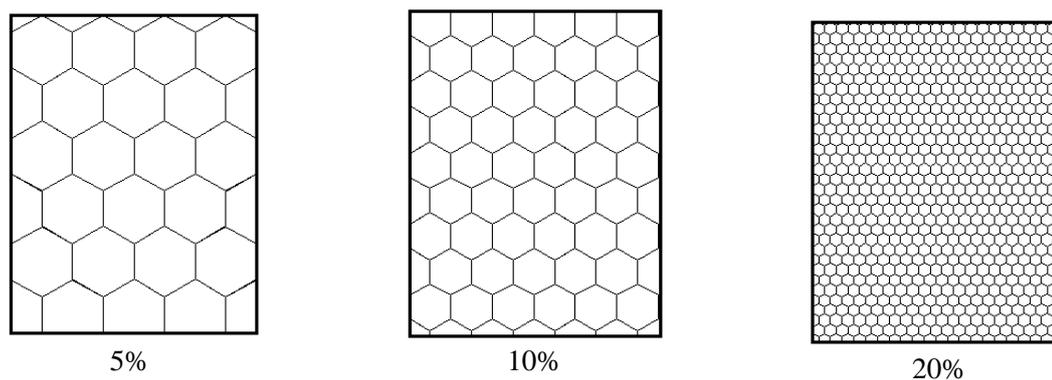
Figura 20 – Preenchimento interno hexagonal, concêntrico, retilíneo, curvas de Hilbert e cordas arquimedianas, respectivamente da esquerda para a direita.



Fonte: (VELOSO, 2020).

Veloso (2020) ainda ressalta a importância do padrão geométrico do preenchimento interno das camadas, uma vez que isso pode provocar um impacto significativo no desempenho mecânico da peça. Com o intuito de investigar essa relação, foram projetados modelos cúbicos de arestas de 50 mm e diferentes geometrias de preenchimento como, triangular, quadrado, colmeia e reentrante em sua pesquisa. Em seguida, aplicou-se uma carga de compressão distribuída de maneira uniforme na superfície superior dos modelos e realizaram-se simulações para análise estrutural. Os resultados mostraram que os modelos com padrão de preenchimento quadrado e triangular obtiveram melhores resultados em relação à estabilidade dimensional, rigidez e resistência mecânica. Isso sugere que, para peças com requisitos operacionais específicos, deve-se analisar melhor as opções de preenchimento.

Outro fator que acomete o comportamento mecânico das peças fabricadas pela tecnologia FDM é o percentual de preenchimento. Segundo uma pesquisa realizada por Dudescu e Racz (2017), as peças podem ter uma densidade de preenchimento interno que varia de 0 a 100%, sendo que uma peça com 100% de preenchimento é considerada sólida. Estruturas mais densas resultam no aumento do módulo de elasticidade e resistência mecânica. No entanto, imprimir peças totalmente sólidas consomem mais tempo e material, tornando-se necessário encontrar um equilíbrio entre as proporções ideais para atender os requisitos de eficiência. A Figura 21 apresenta diferentes percentuais de preenchimento.

Figura 21 – Percentual de preenchimento.

Fonte: Adaptada de (VELOSO, 2020).

3.3 Formatos de arquivos para manufatura aditiva

Como mencionado no texto acima, o processo de MA é iniciado com o desenvolvimento do projeto base para a fabricação do produto. Esses projetos normalmente podem ser criados usando a modelagem em *software* CAD, no qual são capazes de representar a estrutura tridimensional com riqueza nos detalhes. Entretanto, esses modelos CAD podem conter uma quantidade expressiva de dados, envolvendo informações internas e outras complexidades referentes ao objeto que não são usuais para o processo de fabricação.

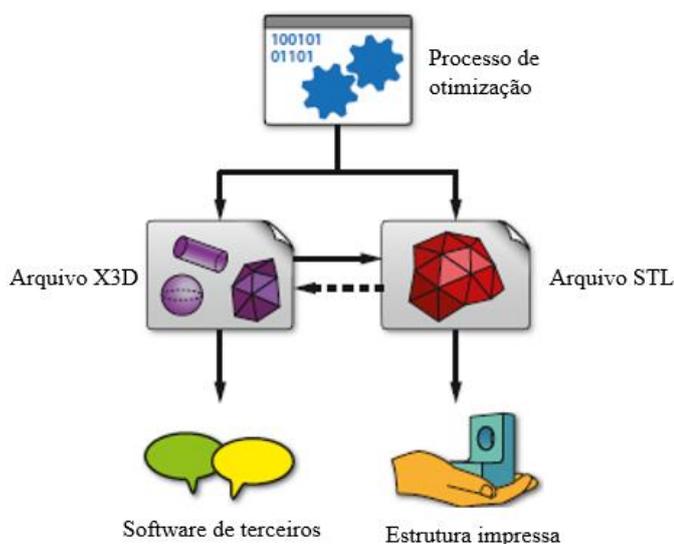
Com o intuito de possibilitar o processo de produção, é necessário que o modelo CAD seja modificado para uma extensão de arquivo do tipo STL. Esse formato de arquivo possui apenas dados referentes à superfície externa do objeto, descrevendo a geometria do modelo tridimensional utilizando um processo de discretização do domínio com formas geométricas primitivas (geralmente triângulos e quadriláteros) (GODEC et al., 2022).

Uma informação importante a ser considerar a respeito do formato STL é que nem todo arquivo é passível de fabricação, uma vez que esse formato contém apenas dados da geometria. Caso um modelo seja criado apenas em 2D, ou seja, sem espessura, a conversão para o STL é possível, mas a fabricação da peça correspondente não.

Além da modelagem tradicional no CAD, os projetos podem ser desenvolvidos diretamente por algoritmos de otimização estrutural. Esse método permite que a otimização determine a distribuição ideal do material na peça, resultando em geometrias mais eficientes. Entretanto, a solução deve abranger o espaço tridimensional possibilitando a conversão direta para o formato STL.

Nesse contexto, Zegard e Paulino (2015) desenvolveram uma ferramenta no ambiente do MATLAB®, denominada *TOPslicer*. Essa ferramenta utiliza uma matriz tridimensional com os valores de densidade variando em 0 e 1 (vazio e sólido, respectivamente), e fornece uma saída compatível para a MA ou para uma posterior manipulação no software de modelagem 3D, como o formato X3D. A Figura 22, apresenta um fluxograma com a finalidade pretendida pela ferramenta.

Figura 22 – Fluxograma com as possíveis saídas usando o *TOPslicer*.



Fonte: Adaptada de (ZEGARD e PAULINO, 2015).

Com o avanço da tecnologia e o surgimento de novas técnicas de impressão, que permitem produzir peças com texturas e cores diversas, o formato STL se tornou relativamente desfasado na quantidade de dados necessários para serem enviados para o *software* de fatiamento.

Dessa forma, outros formatos de arquivos surgiram, como a *Extensible Markup Language* (XML), que foi reconhecida como a maneira mais eficiente de organizar todos os dados supracitados e encaminhar ao *software* de fatiamento para impressão. Ainda, existem mais dois tipos de extensão similares ao mencionado, o AMF e o *3D Manufacturing Format* (3MF) (GODEC et al., 2022).

A extensão AMF é desenvolvida pelos subcomitês da ISO/ASTM, e muitas das falhas encontradas no formato STL foram sanadas. Uma das principais melhorias atingidas pelo o AMF está relacionado à geometria, permitindo a tesselação da superfície com triângulos curvos. Dessa forma, há uma melhoria na precisão da peça após conversão do modelo CAD. No entanto,

apesar de suas vantagens, o uso do formato ainda enfrenta certa resistência pelo mercado de MA.

Nesse mesmo viés, o formato 3MF é uma novidade no mercado e tem como desenvolvedor o 3MF Consortium. Esse formato é baseado nas principais propriedades do AMF e uma de suas vantagens é o fato de estar sendo desenvolvido em parceria com os maiores interessados da área da fabricação aditiva. O arquivo 3MF foi criado para atender as versões mais atuais de impressoras 3D, fornecendo informações sobre o modelo, propriedades e material constituinte (GODEC et al., 2022; PTC, 2023).

3.4 AMfilter

O AMfilter, desenvolvido por Langelaar (2016), é um filtro que incorpora implicitamente o ângulo limite de projeção de 45° como restrição geométrica para a manufatura aditiva durante o processo de otimização topológica. Em resumo, o filtro simula de forma simplificada a técnica de impressão camada por camada no decorrer da otimização, removendo parte do projeto que excedem o ângulo limite de projeção definido. Com isso, apenas soluções que sejam geometricamente compatíveis com a MA podem ser elaboradas, propondo a eliminação da necessidade de estruturas de suportes e, conseqüentemente, reduzindo custos operacionais.

A proposta do AMfilter é direcionada a garantir que projetos atendam a essência do processo de fabricação aditiva por meio da tecnologia SLM/EBM. Esse tipo de tecnologia baseia-se na fusão em leito de pó, em que a energia térmica direcionada por um laser funde seletivamente regiões do leito de pó até formar a peça sólida (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2015). Comparando essa tecnologia com a FDM abordada nesta pesquisa, a principal diferença encontra-se na técnica de deposição de material e no tipo de material utilizado para fabricação das peças. No entanto, o princípio de fabricação é o mesmo.

O filtro em questão foi projetado para ser utilizado na otimização topológica baseada no método de densidade, sendo facilmente integrado a essa metodologia. Nesse método, o domínio é discretizado em uma malha regular de elementos finitos, em que cada elemento está associado a uma densidade. Durante o processo de otimização, o AMfilter é o último filtro empregado. Ele recebe o campo de densidade de projeto ρ como entrada e o converte em um novo campo de densidade a ser impresso, denotado por $\bar{\rho}$. Logo, a geometria descrita por $\bar{\rho}$ é diretamente impressa sem a necessidade de estruturas de suporte.

3.4.1 Formulação do AMfilter

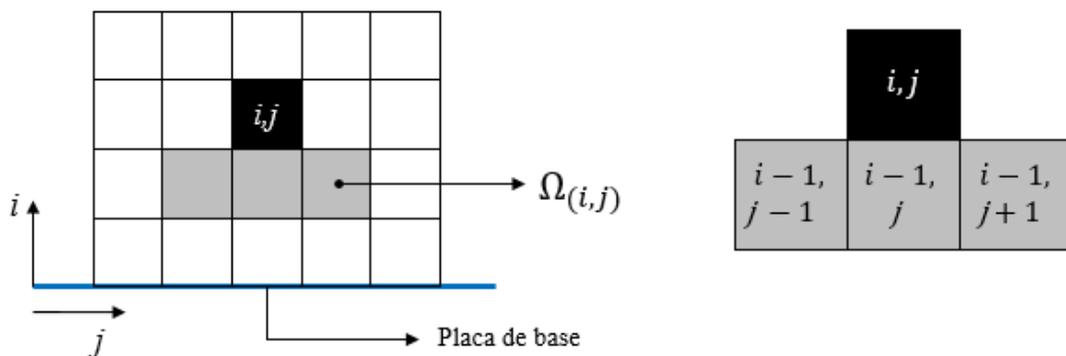
O modelo de fabricação aditiva é definido por uma malha estruturada regular, análoga à de elementos finitos utilizada na otimização topológica. Nesse estudo, é considerada a abordagem 2D para simplificar a análise, entretanto, é importante destacar que existe a possibilidade de expansão para o 3D, como explorado por Langelaar (2018). Em tal estrutura de malha, cada elemento é representado por $e(i, j)$, em que i e j definem sua localização vertical e horizontal no domínio, respectivamente.

Por definição, o AMfilter considera que elemento posicionado na primeira camada ($i = 1$) é suportado pela placa de base, podendo ser impresso com sucesso. Para as camadas subsequentes, cada elemento $e(i, j)$ deve ser sustentado pelo elemento diretamente abaixo dele e pelos seus vizinhos imediatos, como representado na Figura 23. Esses elementos formam uma região de apoio a partir da própria estrutura, desenvolvendo uma topologia autoportante. Além disso, a densidade impressa $\bar{\rho}(i, j)$ não deve exceder a densidade máxima de impressão $\Xi(i, j)$ dos elementos da região de apoio $\Omega_{(i,j)}$. Este princípio leva à seguinte relação matemática:

$$\bar{\rho}(i, j) = \min (\rho(i, j), \Xi(i, j)) \quad \text{com} \quad (13)$$

$$\Xi(i, j) = \max (\bar{\rho}(i - 1, j - 1), \bar{\rho}(i - 1, j), \bar{\rho}(i - 1, j + 1)) \quad (14)$$

Figura 23 – Elemento $e(i, j)$ devidamente suportado pela região de apoio ($\Omega_{(i,j)}$)



Fonte: Elaborada pela autora.

Nesse contexto, a operação (13) é efetuada em camadas, varrendo todo o domínio na mesma direção do próprio processo de impressão, da linha inferior para a superior. No entanto, o modelo de fabricação não é diferenciável devido à presença dos operadores “min” e “max” não suaves nas expressões (13) e (14). Isso cria um desafio para a aplicação de técnicas de

otimização topológica, pois essas técnicas normalmente exigem que a função a ser otimizada seja diferenciável, permitindo o cálculo do gradiente.

Assim, para contornar essa limitação, os operadores “min” e “max” são substituídos por aproximações suaves “smin” e “smax”, com base nos conceitos da *Smooth Maximum Unit* (SMU) e da P-Norm, de modo que a função resultante seja diferenciável e adequada para as técnicas de otimização. Logo, as aproximações suaves são dadas por:

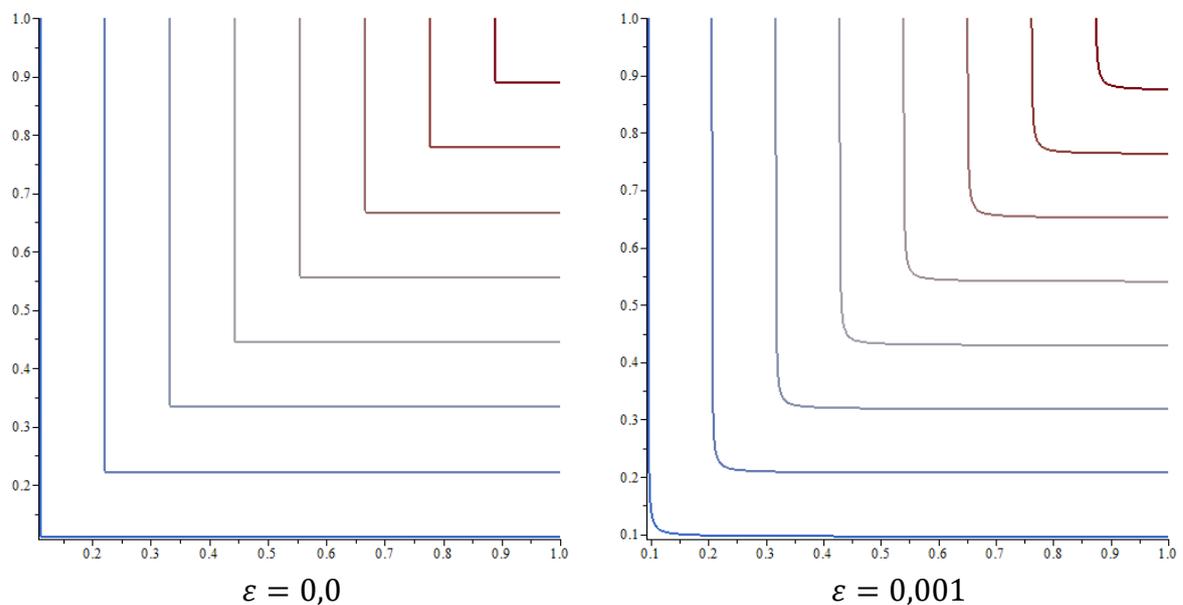
$$\text{smin}(\rho, \varepsilon) = \frac{1}{2} \left(\rho + \varepsilon - \sqrt{(\rho - \varepsilon)^2 + \varepsilon} + \sqrt{\varepsilon} \right) \quad (15)$$

$$\text{smax}(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \bar{\rho}_3) = \left(\sum_{k=1}^{n_s} \bar{\rho}_k^P \right)^{1/P} \quad (16)$$

nas quais, ε e P são parâmetros que controlam a precisão e a suavidade das aproximações da solução. Quando ε se aproxima de 0 ($\varepsilon \rightarrow 0$) e P tende ao infinito ($P \rightarrow \infty$), encontram-se os operadores “min” e “max” exatos. No entanto, isso resulta na perda da suavidade da função, não correspondendo a funcionalidade das expressões (15) e (16).

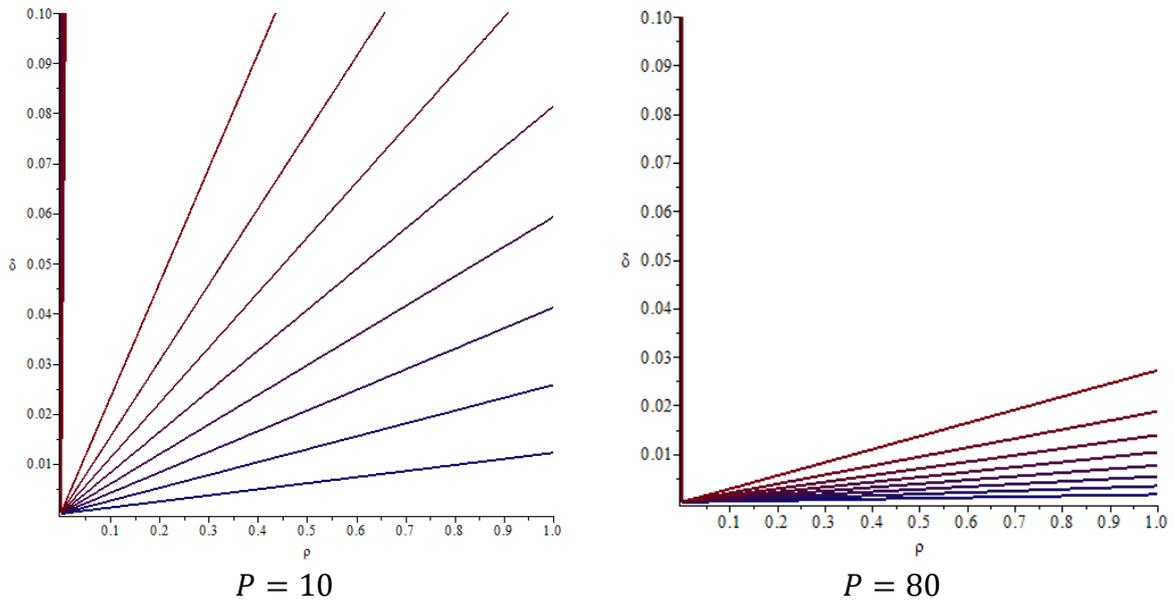
Nas Figuras 24 e 25, são apresentados gráficos com aproximações suaves da função, variando os valores de ε e P . Isso facilita a compreensão sobre a influência desses parâmetros na função.

Figura 24 – Aproximação suave com operador smin (ρ, ε)



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 25 – Aproximação suave com operador smax ($\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \bar{\rho}_3$)



Fonte: Elaborada pela autora.

Durante o processo de otimização, pode ocorrer o acúmulo sucessivo de camadas com densidades intermediárias devido à introdução de erros numéricos causados pela aproximação da função. Esse comportamento não corresponde ao esperado para o modelo de fabricação. Assim, é necessário adotar valores extremos para o parâmetro P . Uma solução é aplicar uma penalização suave na saída de “smax”, reduzindo assim a superestimação do máximo nas regiões de densidade intermediária. Com isso, a expressão (16) passa a ser reescrita como:

$$\text{smax}(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \bar{\rho}_3) = \left(\sum_{k=1}^{n_s} \bar{\rho}_k^P \right)^{1/Q} \quad (17)$$

na qual Q pode ser calculado de acordo com a seguinte formulação:

$$Q = P + \frac{\log n_s}{\log \xi_0} \quad (18)$$

em que, n_s representa o número de elementos contido na região de suporte e ξ_0 define a penalização dos elementos com baixa densidade.

Logo, o modelo de fabricação é reformulado e passa a ser expresso da seguinte forma:

$$\bar{\rho}(i,j) = \text{smin}(\rho(i,j), \Xi(i,j)) \quad \text{com} \quad (19)$$

$$\mathcal{E}(i, j) = \text{smax} (\bar{\rho}(i - 1, j - 1), \bar{\rho}(i - 1, j), \bar{\rho}(i - 1, j + 1)) \quad (20)$$

3.4.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade visa determinar os gradientes da função objetivo e das restrições em função das variáveis de projeto. De forma equivalente, a sensibilidade do AMfilter é calculada a partir da diferenciação do critério de desempenho (f_p) em função da variável de projeto ($\boldsymbol{\rho}$). A discussão detalhada sobre a obtenção das sensibilidades descritas a seguir, necessárias para solução do problema apresentado, pode ser consultada em Langelaar (2016).

$$\frac{\partial f_p}{\partial \boldsymbol{\rho}_j} = \lambda_j^T \frac{\partial \text{smin}_j}{\partial \boldsymbol{\rho}_j} \quad \text{com} \quad (21)$$

$$\lambda_j^T = \frac{\partial f_p}{\partial \boldsymbol{\rho}_j} + \lambda_{j+1}^T \frac{\partial \text{smin}_j}{\partial \boldsymbol{\rho}_j} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \boldsymbol{\rho}_j} \quad \text{para } 1 < j < n_i \quad (22)$$

$$\lambda_{n_i}^T = \frac{\partial f_p}{\partial \boldsymbol{\rho}_{n_i}}$$

em que λ_j representa o multiplicador de Lagrange, enquanto n_i denota o número de camadas. É importante notar que o multiplicador λ_j^T depende não apenas da sensibilidade da resposta em relação à densidade da camada j , mas também do multiplicador associado à camada imediatamente acima, representado por λ_{j+1}^T . Essa interdependência dos multiplicadores de Lagrange implica em uma sequência de avaliação das sensibilidades que retrocede o domínio, indo da camada superior para a inferior.

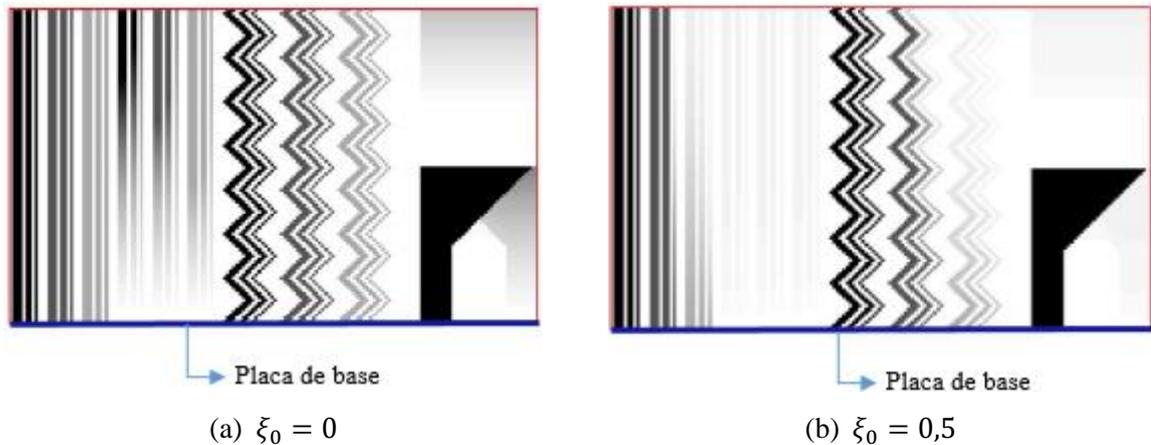
3.4.3 Exemplos numéricos

Os exemplos aqui abordados foram desenvolvidos por Langelaar (2016) para demonstrar a funcionalidade e as características do AMfilter. São adotados como parâmetros dos operadores smin e smax , $\varepsilon = 10^{-4}$ e $P = 40$, os quais são passíveis de ajuste de acordo com a situação específica do problema, podendo ser menores ou maiores que os utilizados para os exemplos.

A Figura 26 apresenta um padrão de teste para destacar as características da penalização das densidades intermediárias na saída do smax . O padrão de teste possui linhas retas e em

zigzagues com diferentes densidades (indicadas pela escala de cinza). Além disso, há também uma estrutura de um portal conectada a placa de base.

Figura 26 – Comparação de resultado, usando a norma P regular e a penalizada.

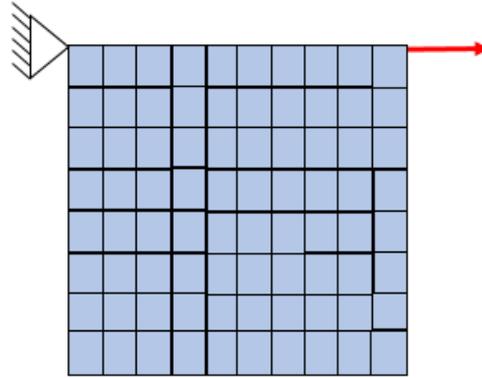


Fonte: Adaptada de (LANGELAAR, 2016).

Na Figura 26a, com $\xi_0 = 0$, indicando que não há penalização ($Q = P$), é possível observar que, à medida que o processo de otimização avança, há um acúmulo de densidades intermediárias, o que não é desejável. No entanto, na situação da Figura 26b, com uma penalização mais equilibrada ($Q < P$), esse problema se mostra em um grau bem menor, sendo o melhor cenário para aplicação do filtro. É importante destacar que valores mais baixos de Q resultam em uma penalização maior das densidades intermediárias, o que pode ser alcançado reduzindo o valor de P .

Ainda nesse contexto, é discutido um caso de teste de tração, conforme apresentado na Figura 27. Para o processo de otimização topológica, o domínio é discretizado em uma malha de elementos finitos de 70×70 , a fração volumétrica de 30%, filtro de densidade com r_{min} de 3,0. Além disso, o fator de penalização utilizado no SIMP é fixado em 3,0, módulo de elasticidade em 1 e o coeficiente de Poisson em 0,3. Com essas informações, são realizadas quatro análises, variando o otimizador (MMA e OC) e o valor de ξ_0 .

Figura 27 – Representação do domínio discretizado



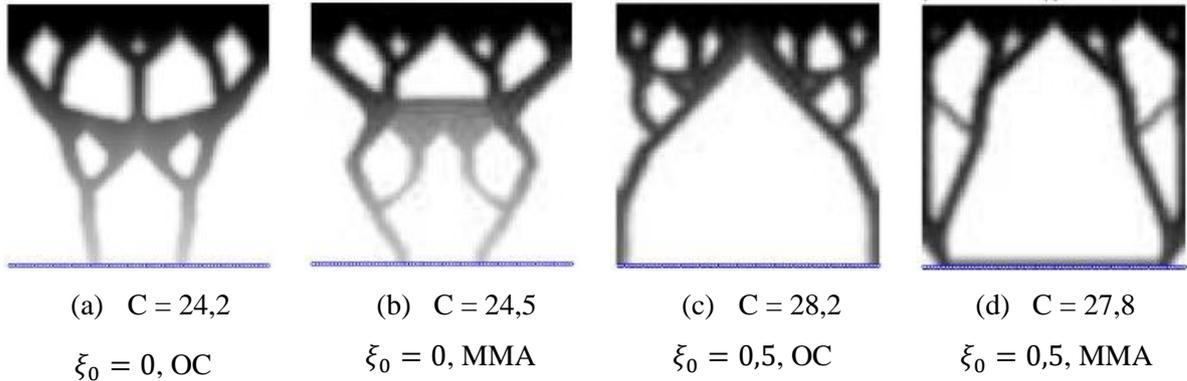
Fonte: Elaborada pela autora.

O MMA é um método de otimização robusto, baseado na aproximação estritamente convexa das funções objetivo e restrições. Em cada iteração, é gerado e resolvido um subproblema controlado pelas “assíntotas móveis”, que estabilizam e agilizam a convergência do processo geral. Deste modo, o MMA é capaz de lidar com problemas gerais complexos e de programação não linear (SVANBERG, 1987).

Por outro lado, OC é geralmente mais rápido e de simples implementação computacional. O método consiste em dois passos básicos: primeiro, é realizada uma análise do sistema real e conjunto; segundo, as variáveis de projeto são atualizadas de forma iterativa. O método OC é especialmente eficiente para problemas simples com grandes números de variáveis de projeto, com funções objetivo e restrições suaves e diferenciáveis (HASSANI e HINTON, 1998).

As soluções otimizadas do exemplo de tração são apresentadas na Figura 28. Todos os exemplos são executados em 250 iterações. Entretanto, no caso específico da Figura 28c, que utiliza o algoritmo de otimização OC, é necessário reduzir o parâmetro *move* (*m*) para 0,01 a fim de alcançar a convergência do problema. Esse valor representa o tamanho máximo do passo que o algoritmo pode dar em direção a uma solução potencialmente melhor. Essa adaptação é importante para garantir que a busca pela solução ótima seja realizada de forma controlada e eficiente.

Figura 28 – Solução da otimização topológica.



Fonte: (LANGELAAR, 2016).

Assim como no exemplo anterior, os melhores resultados são obtidos quando se aplica a norma P penalizada, embora isso adicione uma complexidade ao problema de otimização (LANGELAAR, 2016). Ainda, comparando a eficiência entre os otimizadores, o autor constatou que o MMA se comporta melhor diante da não linearidade imposta pela implementação do AMfilter, optando por utilizar o MMA nos demais exemplos explorados em seu artigo. Para a utilização do OC, alguns ajustes nos parâmetros de entrada podem ser necessários, assim como pode variar o número de iterações para alcançar a solução do problema.

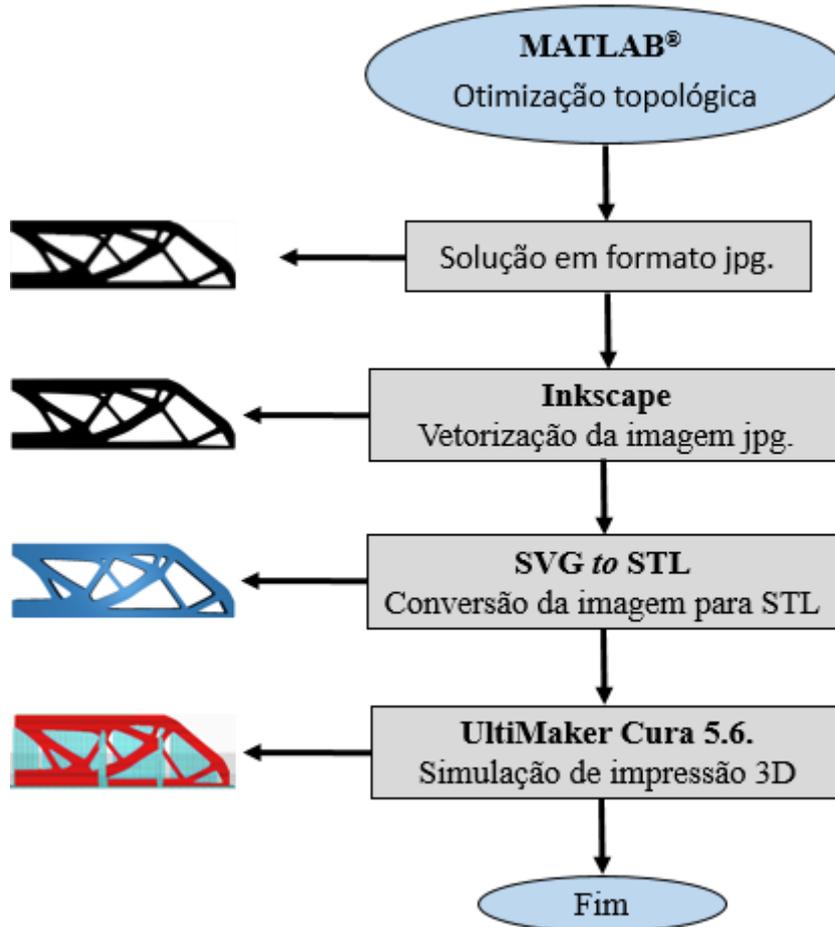
Por fim, é possível observar seções com ângulo de inclinação limite de 45° , confirmando a funcionalidade do filtro.

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para o desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente, é explorado, de forma resumida, o código de otimização topológica utilizado como base para implementação do AMfilter. Em seguida, detalha-se o procedimento de implementação do filtro, destacando as principais modificações realizadas no código base. Por fim, aprofunda-se no procedimento de simulação de impressão dos modelos otimizados, utilizando o software de fatiamento UltiMaker Cura 5.6.

Na Figura 29, apresenta-se um fluxograma que resume os procedimentos metodológicos adotado nesta pesquisa, incluindo todos os *softwares* e plataformas utilizadas como base.

Figura 29 – Fluxograma do procedimento metodológico da pesquisa.



Fonte: Elaborada pela autora

4.1 Código de otimização topológica

Para conduzir esta pesquisa, é utilizado um código de otimização topológica composto por 88 linhas, desenvolvido por Andreassen et al. (2010) e implementado no ambiente MATLAB®. Esse código oferece uma visão didática acessível para iniciantes no campo da otimização topológica, enfatizando problemas que têm por objetivo encontrar a distribuição ótima de material em termos da minimização da flexibilidade. O problema matemático pode ser consultado na equação (5) do capítulo 2. Para resolver o problema de otimização, o código emprega o algoritmo de otimização OC. Esse método de atualização iterativo das variáveis de projeto pode ser escrito como:

$$\rho_e^{new} = \begin{cases} \max(0, \rho_e - m) & \text{se } \rho_e B_e^\eta \leq \max(0, \rho_e - m) \\ \min(1, \rho_e + m) & \text{se } \rho_e B_e^\eta \geq \max(0, \rho_e - m) \\ \rho_e B_e^\eta & \text{de outra forma} \end{cases} \quad (23)$$

na qual ρ_e representa a densidade de projeto do elemento. O parâmetro m (*move*) é adotado em 0,2 no código de 88 linhas. O coeficiente η , estabelecido como 0,5, funciona como um fator de amortecimento numérico, controlando a rapidez com que as soluções são atualizadas ou movidas em direção a uma possível solução ótima. Por fim, B_e é obtido por meio da condição de otimização abaixo:

$$B_e = \frac{-\frac{\partial c}{\partial \rho_e}}{\lambda \frac{\partial V}{\partial \rho_e}} \quad (24)$$

Neste caso, o multiplicador de Lagrange (λ) deve ser definido de forma a atender a restrição de volume. Para obter mais detalhes, recomenda-se a leitura de Christensen e Klarbring (2009).

A sensibilidade da resposta da função objetivo “ c ” e do volume do material “ V ” em relação ρ_e são dadas por:

$$\frac{\partial c}{\partial \rho_e} = -p\rho_e^{p-1}(E_0 - E_{min})\mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \quad (25)$$

em que \mathbf{u}_e é o vetor de deslocamento do elemento e \mathbf{k}_0 é a matriz de rigidez do elemento.

$$\frac{\partial V}{\partial \rho_e} = 1 \quad (26)$$

A equação (26) é embasada na suposição de que cada elemento de malha possui volume unitário. O código 88 linhas foi projetado para oferecer flexibilidade na utilização de filtros tradicionais durante o processo de otimização. Ele permite ao usuário definir o tipo de filtro desejado, seja ele de sensibilidade ou de densidade. Essa configuração poder ser facilmente realizada por meio dos parâmetros de entrada no prompt de comando do MATLAB®.

```
top88 (nelx, nely, volfrac, penal, rmin, ft)
```

Em que:

`nelx` – Elementos na direção horizontal;

`nely` – Elementos na direção vertical;

`volfrac` – Fração de volume prescrita;

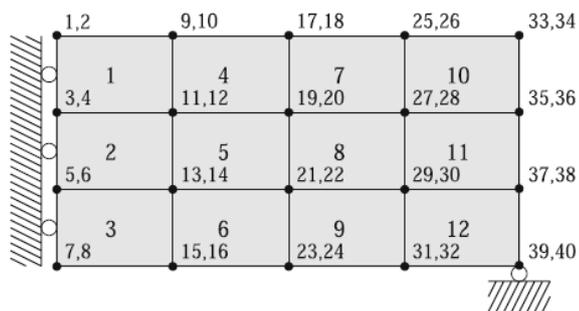
`penal` – Fator de penalização “p”;

`rmin` – Raio mínimo do filtro;

`ft` – Especifica o tipo de filtro utilizado (filtro de sensibilidade, `ft = 1`) ou (filtro de densidade, `ft = 2`).

Para a análise de elementos finitos, o domínio de projeto é considerado retangular e discretizado em uma malha de elementos quadrados (Figura 30). Os nós e elementos são numerados em colunas da esquerda para a direita. Além disso, os graus de liberdade são atribuídos de acordo com a seguinte convenção: os graus de liberdade horizontal são definidos por $2n - 1$ e os verticais por $2n$, em que n representa o número do nó.

Figura 30 – Modelo discretizado.



Fonte: (ANDREASSEN et al., 2010).

No código de 88 linhas, são explorados diferentes tipos de condições de contorno de carga e suporte, casos envolvendo mais de uma carga e exemplo com elemento passivo. Este último, refere-se a região do domínio de projeto com densidade fixada como nula, que são removidas durante o processo de otimização. Essas alterações podem ser realizadas pontualmente no código, alterando parâmetros dos vetores de força e grau de liberdade (deslocamento). Dessa forma, é possível explorar cada modelo individualmente, como destacado nos exemplos a seguir.

4.1.1 Exemplo 1

O primeiro exemplo abordado trata-se de um problema clássico de otimização topológica: uma viga MBB, como ilustrado na Figura 31. O código é inicialmente desenvolvido considerando as condições de contorno e a carga externa específica da viga. Para implementar este problema em MATLAB®, é possível baixar o arquivo correspondente por meio do site: <http://www.topopt.dtu.dk>.

Figura 31 – Exemplo 1: Modelo da viga MBB.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.1.2 Exemplo 2

Para resolver o problema da viga em balanço, apresentado na Figura 32, a linha 19 do código, referente ao vetor de força, é alterada para a seguinte forma:

PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

19	<code>F = sparse(2*(nely+1)*(nelx+1),1,-1,2*(nely+1)*(nelx+1),1);</code>
----	--

Essa linha de código cria uma matriz de tamanho $(2*(nely+1)*(nelx+1)) \times 1$, no qual apenas um único valor não nulo “-1”, representa a carga aplicada à estrutura na coordenada $2*(nely+1)*(nelx+1)$. Além disso, a linha 21 também deve ser ajustada para:

PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

21	<code>fixeddofs = [1:2*nely+1];</code>
----	--

na qual `fixeddofs` representa o vetor que contém os graus de liberdade fixados ou presos em uma direção específica da malha de elementos finitos.

Figura 32 – Exemplo 2: Modelo de viga em balanço



Fonte: Elaborada pela autora.

4.1.3 Exemplo 3

No caso de lidar com mais de uma carga, como exemplificado na Figura 33, é possível resolvê-lo alterando a representação dos vetores de força e deslocamento para incorporar mais de uma dimensão. Ambos devem ser definidos como vetores de duas colunas. Portanto, as linhas 19 e 20 do código, respectivamente, são adaptadas para a seguinte forma:

PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

19	<code>F = sparse([2*(nely+1)*nelx+2, 2*(nely+1)*(nelx+1)], [1 2], ...</code>
	<code>[1 -1], 2*(nely+1)*(nelx+1), 2);</code>
20	<code>U = zeros(2*(nely+1)*(nelx+1), 2);</code>

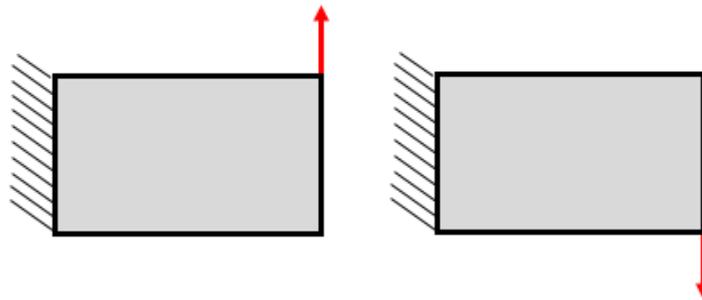
Na linha 19, a função `sparse(i, j, s, m, n)` cria uma matriz esparsa ‘F’. Os parâmetros de entrada “i” e “j” representam os vetores de linha e coluna que indicam as coordenadas de entradas não nulas, nessa ordem. O vetor “s” contém os valores das entradas não nulas, correspondente à carga aplicada à estrutura. “m” e “n” são as dimensões da matriz esparsa resultante.

A linha 20 inicializa uma matriz “U” com zeros, que é utilizada para armazenar os deslocamentos nodais resultantes do problema de otimização. Em seguida a esse processo de ajustes dos vetores de força e deslocamento, é importante garantir que as equações de equilíbrio

sejam resolvidas para ambas as cargas, para isso é alterada a linha 56 do código, como expresso abaixo:

ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS	
56	<code>U(freedofs,:) = K(freedofs,freedofs)\F(freedofs,:);</code>

Figura 33 – Exemplo 3: Modelo com mais de uma carga



Fonte: Elaborada pela autora.

A função objetivo também é ajustada, de modo que agora é definida como a soma de duas *compliance*:

$$c(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{i=1}^2 \mathbf{u}_i^T \mathbf{K} \mathbf{u}_i \quad (27)$$

Por conseguinte, as linhas 58 – 60 são substituídas pelo seguinte código:

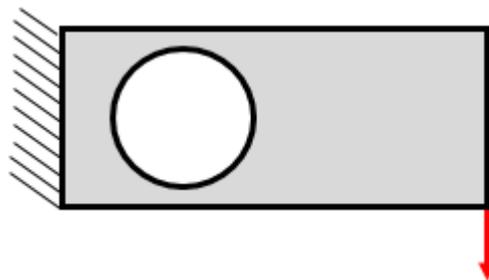
FUNÇÃO OBJETIVO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	
58	<code>c=0;</code> <code>dc=0;</code> <code>for i = 1:size(F,2)</code> <code>Ui = U(:,i);</code> <code>% Cálculo da função objetivo</code> <code>ce = reshape(sum((Ui(edofMat)*KE).*Ui(edofMat)),2),nely,nelx);</code> <code>c = c + sum(sum((Emin+xPhys.^penal*(E0-Emin)).*ce));</code> <code>% Cálculo da sensibilidade</code>
60	<code>dc = dc - penal*(E0-Emin)* xPhys.^(penal-1).*ce;</code> <code>end</code>

em que a matriz `edofMat` apresenta os graus de liberdade dos elementos. A variável `xPhys` denota a densidade física e `KE` é a matriz de rigidez do elemento, matriz idêntica para todos os elementos, devido à regularidade da malha.

4.1.4 Exemplo 4

No problema de otimização definido na Figura 34, uma região circular dentro do domínio é fixada como nula, com raio de $nely/3$ e centro $(nely/2, nelx/3)$. As informações do vetor de força (linha 19) e as condições de suporte (linha 21) são definidas da mesma forma que no exemplo 2.

Figura 34 – Exemplo 4: Modelo com elemento passivo



Fonte: Elaborada pela autora.

De modo a distinguir entre elementos ativos e passivos, uma matriz chamada ‘passive’ de dimensões ‘ $nely \times nelx$ ’ deve ser inserida no código antes do início do *loop* de otimização, entre as linhas 68 e 69. Isso é exemplificado da seguinte forma:

DISTINÇÃO ENTRE ELEMENTOS ATIVOS E PASSIVOS

```

passive = zeros(nely,nelx);
  for i = 1:nelx
    for j = 1:nely
      % Condição para definir elementos passivos
      if sqrt((j-nely/2)^2+(i-nelx/3)^2) < nely/3
        passive(j,i) = 1; % Elemento passivo
      end
    end
  end
end

```

O código usa dois *loops for* para percorrer todos os elementos da matriz ‘passive’. Em cada iteração, ele calcula a distância até um ponto específico $(nely/2, nelx/3)$ no domínio. Se

a distância for menor que $ne_{ly}/3$, então o elemento correspondente na matriz é definido como 1, indicando que ele é um elemento passivo e deve ser mantido vazio. Os elementos não marcados permanecem como 0, indicando que são ativos. Dentro do *loop* do algoritmo de otimização OC deve-se inserir o seguinte código entre as linhas 78 e 79:

ATUALIZAÇÃO DO OC DAS VARIÁVEIS DE PROJETO E DENSIDADES FÍSICAS

xPhys(passive==1) = 0;

4.2 Implementação do AMfilter

O AMfilter é integrado ao processo de otimização topológica do código 88 linhas, permitindo assim verificar sua funcionalidade e desempenho por meio da simulação dos exemplos supracitados explorados pelo algoritmo de otimização base. Portanto, a formulação matemática do problema, que busca minimizar a flexibilidade é reformulada para incluir o procedimento de filtragem. Nessa reformulação, as variáveis de projeto são atualizadas utilizando o mapeamento realizado pelo AMfilter. Assim, a nova formulação matemática do problema passa a ser expressa da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \min_{\rho} \quad & c(\rho) = \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} = \sum_{e=1}^N E_e(\bar{\rho}_e) \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \\ \text{Sujeito a:} \quad & \mathbf{V}(\bar{\rho}) = \text{fr}V_0 \\ & 0 \leq \rho_{min} \leq \rho_e \leq 1, \quad e = 1, \dots, N \\ & \bar{\rho} = \text{AMfilter}(\rho, \mathcal{E}) \\ \text{Com:} \quad & \mathbf{K}(\bar{\rho}) \mathbf{u}(\bar{\rho}) = \mathbf{F} \end{aligned} \tag{28}$$

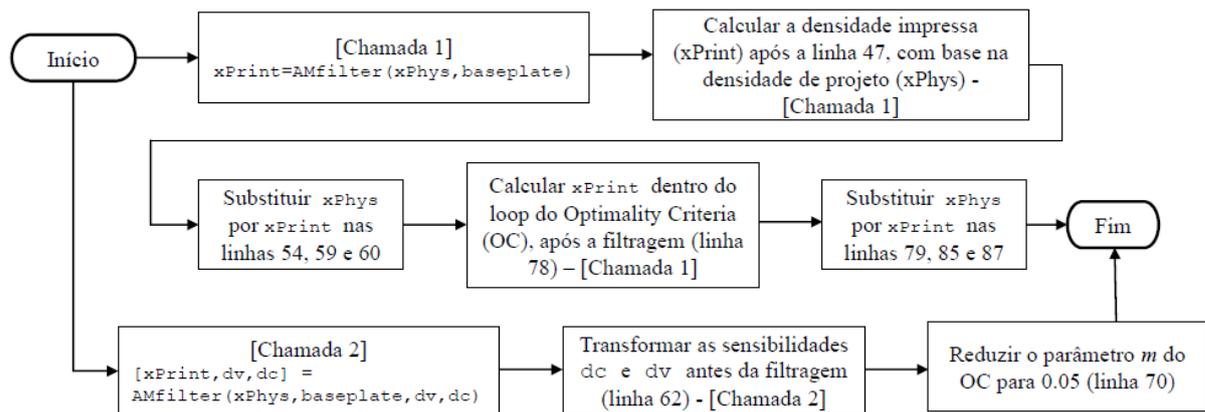
em que $\bar{\rho}_e$ é a densidade impressa do elemento e $\bar{\rho}$ é o vetor de densidade impressa resultante do processo de filtragem do AMfilter.

Com a implementação do AMfilter, o processo de atualização das variáveis de projeto torna-se computacionalmente mais custoso. Isso acontece porque o AMfilter é chamado várias vezes durante as iterações de avaliação das restrições que envolvem as variáveis de projeto a serem impressas ($\bar{\rho}$). Desse modo, Langelaar (2016) ressalta que, dependendo da natureza do

problema, pode ser necessário aplicar uma redução adicional do parâmetro m a fim de lidar melhor com a não linearidade do AMfilter e facilitar a convergência do problema.

O fluxograma apresentado na Figura 35 detalha as modificações necessárias nas linhas específicas do código original para a implementação do filtro.

Figura 35 – Representação da implementação do AMfilter no código 88 linhas



Fonte: Elaborada pela autora.

Ademais, é incluído um novo parâmetro denominado “*baseplate*” à chamada do código original. Com essa atualização, é possível executar o código fornecendo os seguintes parâmetros de entrada diretamente no *prompt* de comando do MATLAB®.

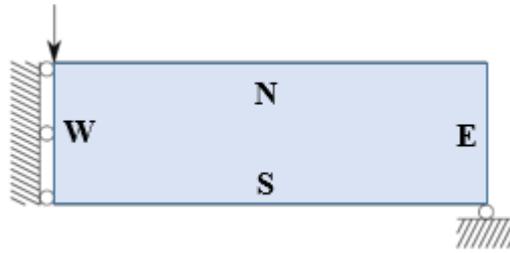
```
top88_AMfilter(nelx,nely,volfrac,penal,rmin,ft,baseplate)
```

O parâmetro *baseplate* refere-se à orientação da placa base, podendo ser especificada como Norte (N), Leste (E), Sul (S), Oeste (W) ou “X”, para indicar a opção de não usar o AMfilter. Essa inclusão permite maior flexibilidade ao usuário na definição da orientação de construção, considerando o posicionamento da placa de base para simular a impressão da estrutura. Ainda, oferece a opção de não aplicar o filtro, caso seja necessário.

4.2.1 Análise da orientação de construção e dos parâmetros P e ϵ

Antes de iniciar o estudo da eficiência do AMfilter em diferentes modelos, é realizada uma análise da influência da orientação de construção e dos parâmetros dos operadores “*smin*” e “*smax*” (P e ϵ). Este estudo é desenvolvido considerando um modelo de viga MBB, conforme ilustrado na Figura 36, na qual são destacadas as direções cardeais (N, E, S e W), indicando as possíveis orientação para o processo de impressão, as condições de contorno e a carga externa.

Figura 36– Viga MBB.



Fonte: Adaptada de (ANDREASSEN et al., 2010)

Como dados de entrada para o processo de otimização seguem os mesmos definidos por Langelaar (2016): um filtro de densidade com raio de largura de 2,0, uma fração volumétrica de 0,5 e um fator de penalização (p) igual a 3,0. Essas informações são replicadas para as quatro orientações da peça (N, E, S e W), além do modelo de referência que não utiliza o AMfilter (opção “X” do *baseplate*).

Para a definição dos parâmetros de entrada do AMfilter, considera-se $\xi_0 = 0,5$ para obtenção de $Q < P$ e conseqüentemente a redução das densidades intermediárias. Os valores de P e ε são definidos inicialmente em $P = 40$, $\varepsilon = 10^{-4}$ de acordo com estudo de Langelaar (2016). No entanto, esses valores não resultaram em uma convergência dos resultados.

De forma a resolver esse problema, são realizados testes utilizando diferentes valores, variando o valor de P entre 20, 40, 60 e 80, enquanto ε é ajustado na faixa de 10^{-6} a 10^{-3} . Após explorar esses valores, a solução ótima é alcançada com $P = 80$, $\varepsilon = 10^{-3}$ e $\xi_0 = 0,5$. Logo, esses parâmetros são adotados para o desenvolvimento de todos os exemplos a serem otimizados com a aplicação do AMfilter.

Para investigar a influência dos parâmetros (P e ε), é explorado o pior caso encontrado para a orientação construção, ou seja, aquele que apresenta o menor desempenho em relação ao modelo de referência. Assim, são exploradas as diferentes topologias geradas a partir da variação dos valores dos parâmetros mencionados acima.

4.3 Simulação de impressão 3D

Para avaliar a funcionalidade e eficiência da integração entre as técnicas de otimização topológica e do AMfilter, são realizadas simulações de impressão 3D dos modelos otimizados. Inicialmente, realiza-se um estudo para avaliar as possibilidades de conversão dos modelos 2D, gerados como resultado da otimização. Dessa forma, são testadas algumas plataformas gratuitas, sendo a plataforma *online* SVG to STL (<https://svg2stl.com/>) identificada como a mais adequada, devido à melhor qualidade dos resultados.

Antes de iniciar o processo de conversão do formato de imagem para STL, teve-se o cuidado de avaliar a necessidade de realizar medidas de simplificação ou suavização da geometria da solução. Isso visa tornar possível a simulação de impressão da peça, uma vez que a solução obtida pela otimização topológica apresenta superfícies irregulares e densidades intermediárias, o que dificulta a análise da geometria e do processo de simulação. Com o intuito de suavizar as irregularidades da superfície, é realizado um refinamento da malha, aumentando o número de elementos que a compõe, conforme indicado na Tabela 1. Essa técnica geralmente produz soluções com maior qualidade e precisão (NORDIN et al., 2022). Nesse contexto, a Figura 37 apresenta a solução após o refinamento da malha, na qual é observada uma maior uniformidade nas bordas da estrutura, apesar da presença das densidades intermediárias.

Tabela 1 - Elementos de malha.

Exemplos	Malha original (código 88 linhas)	Malha refinada
Exemplo 1: Modelo da viga MBB	180 x 60 elementos	720 x 240 elementos
Exemplo 2: Modelo de viga em balanço	160 x 100 elementos	320 x 200 elementos
Exemplo 3: Modelo com mais de uma carga	150 x 150 elementos	390 x 390 elementos
Exemplo 4: Modelo com elemento passivo	150 x 100 elementos	450 x 300 elementos

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 37 – Solução de otimização após o refinamento da malha (720 x 240)



Fonte: Elaborada pela autora

A presença de densidades intermediárias é uma característica comum em métodos que utilizam filtros de sensibilidade e densidade, devido às regiões suaves de transição entre os elementos sólidos e vazios. Para lidar com essa questão, é comum utilizar filtros adicionais ao processo de otimização como o método de penalização. Um exemplo é o filtro Heaviside, que gradualmente força as densidades intermediárias a se aproximarem de 1 (XU et al., 2010). No entanto, neste estudo, ao tentar implementar essa metodologia em conjunto com o AMfilter,

não se obteve sucesso devido à incapacidade de alcançar soluções para o problema de otimização.

Desse modo, as densidades intermediárias são penalizadas durante a fase de plotagem da solução, adotando um valor limite de 0,5 para as densidades. A definição desse valor baseia nos estudos de Xu et al. (2010) e Langelaar (2016). Ademais, são realizados testes com valores abaixo de 0,5, nos quais ainda se observa a presença de regiões cinzas. Assim, as densidades impressas ($\bar{\rho} \leq 0,5$) foram consideradas como zero, indicando a ausência de material, enquanto $\bar{\rho} > 0,5$ foram tratadas como 1, representando a presença de material completamente sólido. Isso é exemplificado da seguinte forma:

PLOTAGEM DAS DENSIDADES

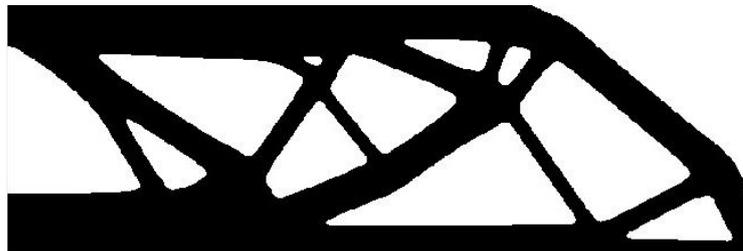
```

90 imagem = xPrint(:,:);
91 idx = find(imagem>0.5);
92 imagem(idx)=1;
93 idx2 = find(imagem<=0.5);
94 imagem(idx2)=0;
95 colormap(gray); imagesc(1- imagem); caxis([0 1]); axis equal; axis off;
   drawnow;

```

A Figura 38 apresenta o resultado após os ajustes supracitados, em que é possível observar uma melhoria na qualidade da solução em comparação com a Figura 37.

Figura 38 – Solução após a penalização das densidades intermediárias.

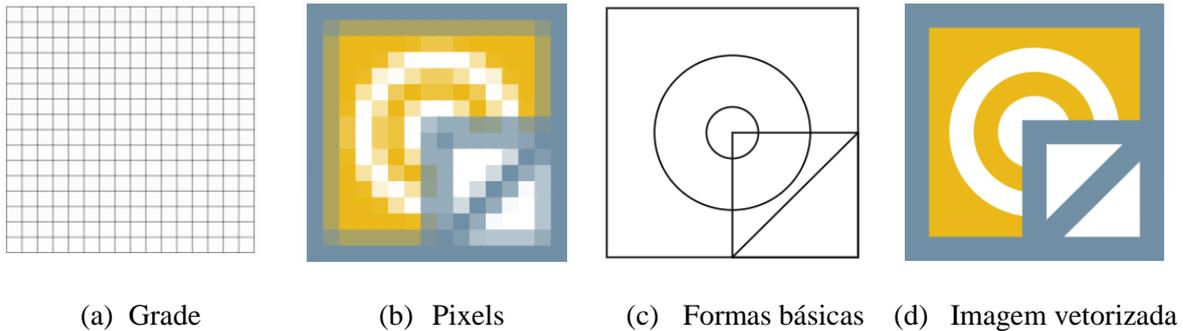


Fonte: Elaborada pela autora

Contudo, ainda é perceptível irregularidades no limite do domínio, o que não é interessante para simulação do modelo 3D. Dessa forma, é realizado um estudo sobre o tratamento de imagem. A imagem resultante da solução otimizada é uma imagem *raster*, ou seja, uma imagem representada por uma grade de *pixels*, na qual cada *pixel* representa uma densidade impressa $\bar{\rho}$, variando em preto e branco. Dessa forma, umas das soluções para

melhorar a qualidade de imagem é sua vetorização, processo que converte um arquivo *rasterizado* em uma imagem vetorial (composta por elementos gráficos como linhas, curvas e forma geométricas definidos matematicamente) (VECTOR MAGIC, 2024). A Figura 39 ilustra a diferença entre os dois tipos de imagens.

Figura 39 – Imagem *raster* versus imagem vetorizada.

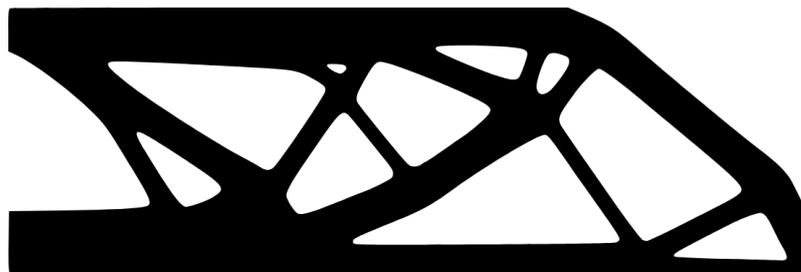


Fonte: (VECTOR MAGIC, 2024).

Esse procedimento de tratamento de imagem para uma representação de maior qualidade pode ser realizado por diversos *softwares* de modelagem, como o Corel Draw, Photoshop, Vector Magic e Inkscape, entre outros. Neste estudo, opta pelo uso do Inkscape, uma ferramenta gratuita e disponível para diversos sistemas operacionais.

O processo de vetorização no Inkscape pode ser realizado por dois métodos: manualmente, via o contorno de toda geometria, ou de forma automática e simplificada. No método automático, a imagem *raster* é carregada na área de trabalho da ferramenta e configurada para a vetorização. O Inkscape detecta as bordas da forma básica da imagem e fornece informações sobre as curvas da forma geométrica, resultando na vetorização da imagem, como apresentado na Figura 40.

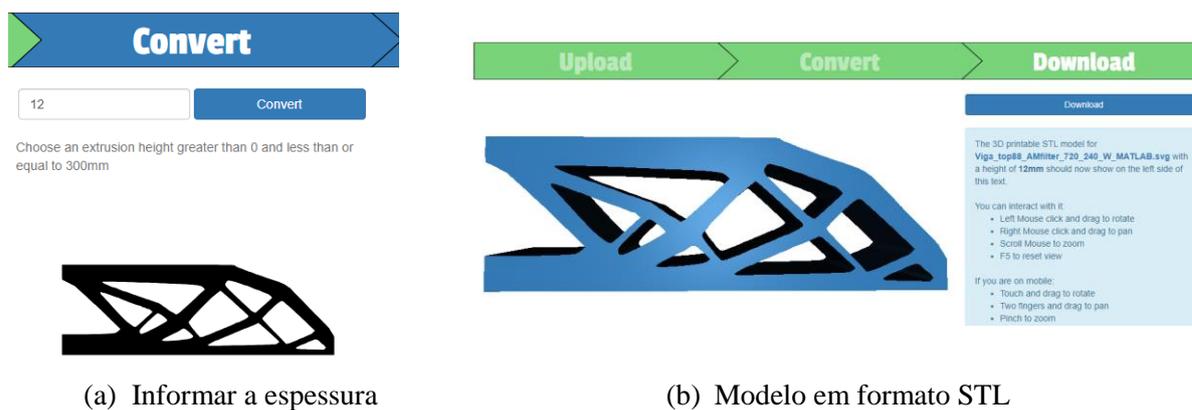
Figura 40 – Imagem vetorizada.



Fonte: Elaborada pela autora (Inkscape).

Após a vetorização da imagem, o próximo passo é converter para o formato STL. Esse processo inclui o *upload* da imagem na plataforma, a definição da espessura desejada para o modelo e, por fim, o download do modelo em formato STL. Os detalhes desses passos estão explicados na Figura 41 para uma melhor compreensão do procedimento na plataforma.

Figura 41 – Etapas do processo de conversão para o formato STL.



(a) Informar a espessura

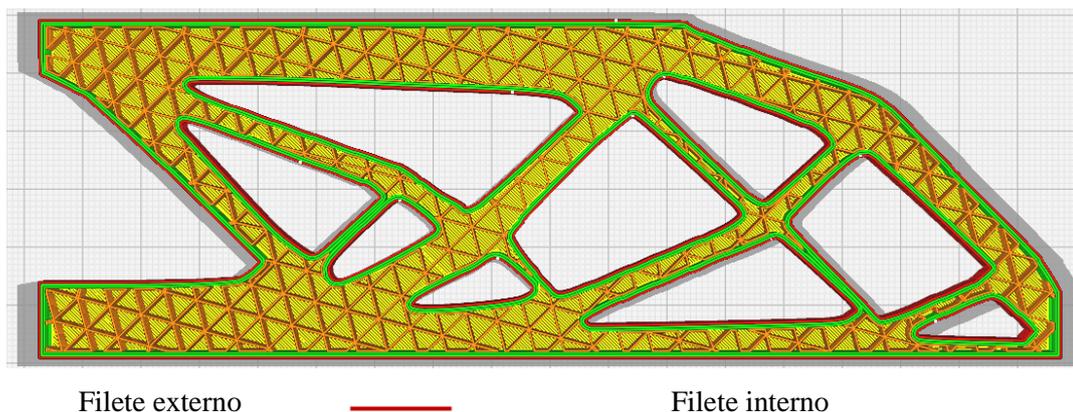
(b) Modelo em formato STL

Fonte: Elaborada pela autora (<https://svg2stl.com/>).

Para a simulação de impressão 3D, é utilizado como recurso o *software* de fatiamento UltiMaker Cura 5.6., desenvolvido pela UltiMaker, umas das principais fabricantes de impressoras 3D. Este *software* de fatiamento foi escolhido nesta pesquisa por ser uma ferramenta gratuita de código aberto, com interface intuitiva e de fácil configuração. Ele permite aos usuários determinar parâmetros específicos para suas impressoras, sendo compatível com vários modelos disponíveis no mercado.

Durante o processo de preparação, o software oferece uma pré-visualização da impressão, camada a camada, mostrando como o objeto será impresso, conforme apresentado na Figura 42. Essa visualização detalhada assegura a identificação de potenciais problemas de impressão antes mesmo de iniciar a impressão física do objeto, permitindo sua correção e reduzindo os custos operacionais envolvidos na fabricação (3DCRIAR, 2023). Ao finalizar a configuração do modelo STL, é gerado um arquivo em formato *G-code*. O código G é uma linguagem de programação amplamente utilizada para controlar máquinas e ferramentas automatizadas, tais como impressoras 3D. Esse arquivo pode ser diretamente interpretado pela impressora para imprimir o modelo (CANO-VICENT et al., 2021).

Figura 42 – Pré-visualização de impressão camada por camada.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

No estudo em questão, todos os modelos são simulados considerando a configuração de impressão para tecnologia FDM, no qual é utilizado o modelo de impressora a UltiMaker S5 e material de filamento ABS de 0,4 mm. O processo de configuração para impressão de uma peça pode variar bastante, dependendo da geometria da peça, sua finalidade e os padrões de qualidade exigidos. Para avaliar a eficiência dos modelos otimizados com o AMfilter, opta-se pela configuração pré-estabelecida do software de fatiamento (Cura), fazendo alguns ajustes em parâmetros específicos (Tabela 2), para agilizar o processo de simulação.

Tabela 2 - Parâmetros de configuração de impressão.

Parâmetros	Valor definido	Recomendações (3DLAB, 2023)
Altura da camada	0,2 mm	Inferior a 75% do diâmetro do bico
Largura de extrusão	0,4 mm	De acordo com bico extrusor
Espessura da parede	1,2 mm (equivalente a 3 filetes)	-
Preenchimento	15% (triângulos)	Quanto mais denso, maior a resistência da peça.
Velocidade de impressão	45 mm/s	40 – 60 mm/s
Temperatura de impressão	230°C	Relativo ao material de filamento

Fonte: Elaborada pela autora.

Para a configuração da estrutura de suporte, determina-se que o suporte seja gerado em qualquer área que exceda o ângulo limite de 45°. Embora seja aconselhável e comum a impressão de modelos 2D horizontalmente à plataforma de construção para evitar a necessidade de suporte, essa abordagem não é adotada neste estudo devido ao objetivo proposto de avaliar o funcionamento do AMfilter incluso no processo de otimização topológica. Portanto, são analisadas as quatro orientações de impressão (Norte, Sul, Leste e Oeste) dos modelos

otimizados, com ângulos limites para a geração de suporte de 45°, conforme a restrição imposta pelo filtro.

Além disso, para obter maiores referências de desempenho em relação ao uso do AMfilter, são avaliadas a geração de suporte para ângulos de 53° e 60°. A escolha desses ângulos seguiu um critério de similaridades entre os incrementos de valor e a possibilidade de impressão. Esses ângulos superiores a 45° podem variar dependendo da geometria e da qualidade desejada, sendo recomendável realização de testes preliminares com a impressora e o material do filamento para avaliar as limitações do ângulo de impressão.

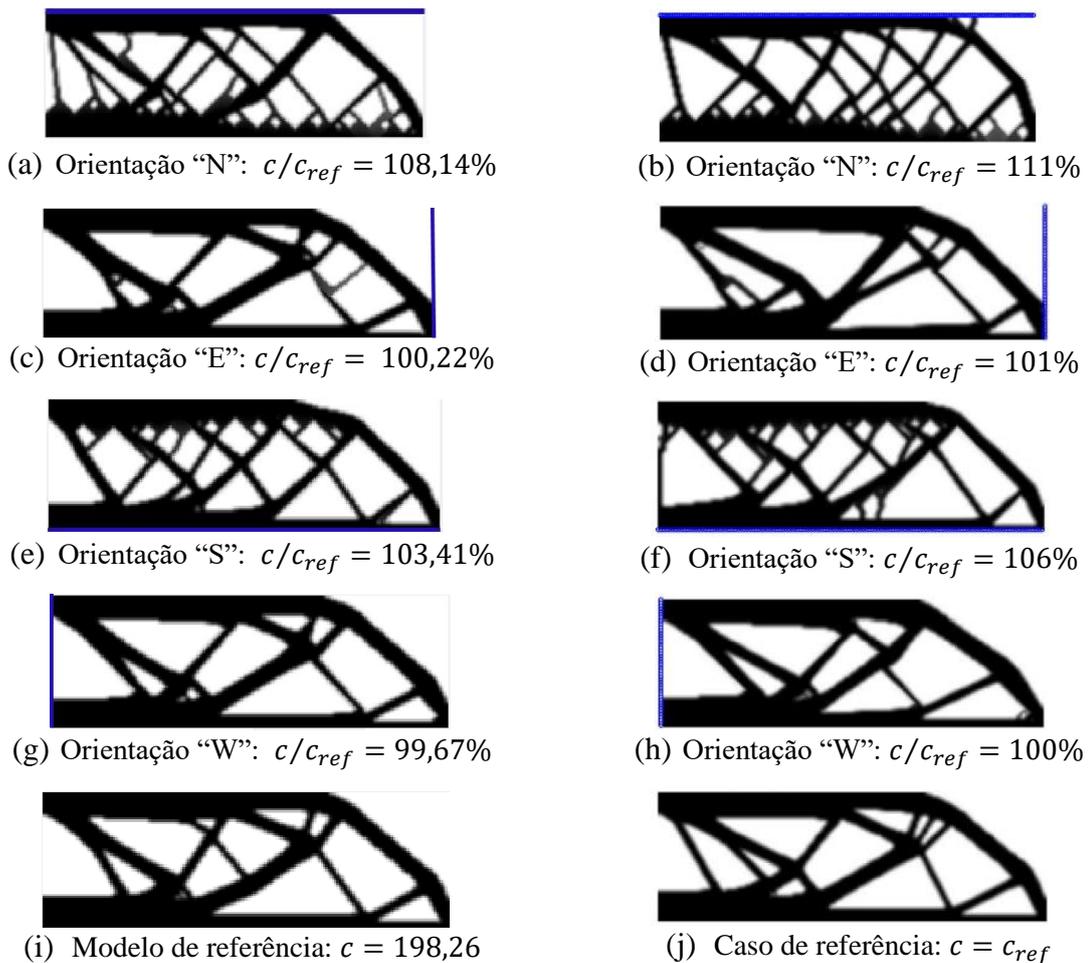
5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados inicialmente os resultados da análise da orientação de impressão, bem como da influência dos parâmetros P e ε , em comparação com o estudo desenvolvido por Langelaar (2016). Logo após, são exploradas as simulações de impressão 3D dos exemplos destacados no capítulo da metodologia, seção 4.1.1 a 4.1.4, como forma de avaliar a eficiência e o desempenho da otimização topológica com a implementação do AMfilter.

5.1 Análise da orientação de impressão

Para a análise, utiliza-se o modelo de viga MBB (Figura 36), cujo domínio é discretizado em uma malha de 180 x 60 elementos. Na Figura 43, são ilustradas as soluções da otimização topológica, juntamente com as previamente encontradas por Langelaar (2016), permitindo a comparação entre ambos os resultados.

Figura 43 – Solução otimizada do modelo de viga.



Fonte: Elaborada pela autora (a), (c), (e), (g) e (i); LANGELAAR, 2016 (b), (d), (f), (h) e (j)

Observando as soluções obtidas é possível notar semelhanças topológicas de projeto em relação às encontradas por Langelaar (2016), bem como nos valores da relação c/c_{ref} . Essa relação representa o quão eficiente é o modelo em comparação com o de referência (que não faz uso do AMfilter durante o processo de otimização), considerando a razão entre o valor ótimo da função objetivo (minimização da flexibilidade).

Ao variar a orientação da placa de base nas direções N, E, S e W, verificam-se diferentes topologias para as soluções. Entretanto, independentemente das mudanças, é perceptível que vários elementos atendem ao limite do ângulo de 45° , restrição imposta pelo AMfilter. Essa restrição limita o ângulo de projeção em 45° com referência à direção processo de impressão. Nas próximas seções deste capítulo, será explorado mais detalhadamente esse aspecto.

Os projetos nas direções “N” e “S” demonstraram ser menos eficientes, apresentando um aumento no valor da função objetivo em comparação com o projeto de referência, visto que uma quantidade relativamente maior de material deve ser dedicada para suportar toda extensão horizontal da estrutura. Além disso, ambos os modelos exibem maior nível de detalhe em sua estrutura. Essa complexidade adicional pode ter impacto direto na fabricação aditiva da peça, resultando em maior consumo de material e tempo de impressão.

Nesse contexto, o estudo de Nordin et al. (2022) enfatiza a importância de reduzir ao máximo o nível de complexidade do projeto (geometria), removendo detalhes pequenos como fios, círculos, elementos decorativos e furos sempre que possível, de maneira a contribuir para uma fabricação mais eficiente e econômica. Essa simplificação de projeto pode ser observada nos modelos das direções “E” e “W”. Ambos possuem apenas pequenas mudanças em sua topologia em relação ao modelo de referência, resultando em uma melhor performance com base na relação c/c_{ref} . Contudo, a orientação “W” se destacou como a mais eficiente, mantendo o desempenho desejado sem perder rigidez, tornando-se uma opção válida para impressão sem a necessidade de estruturas de suporte.

Essa mesma conclusão é discutida por Langelaar (2016) em sua pesquisa, no qual foram utilizados parâmetros $P=40$, $\varepsilon=10^{-4}$ e $\xi_0=0,5$ para os operadores s_{min} e s_{max} e algoritmo de otimização MMA para resolução do problema. Entretanto, no presente estudo, observa-se que, ao utilizar o OC, não houve convergência dos resultados para os valores mencionados. Uma hipótese sugerida é que o tipo de otimizador influencie na configuração dos parâmetros aplicados ao AMfilter.

5.2 Influência dos parâmetros P e ε

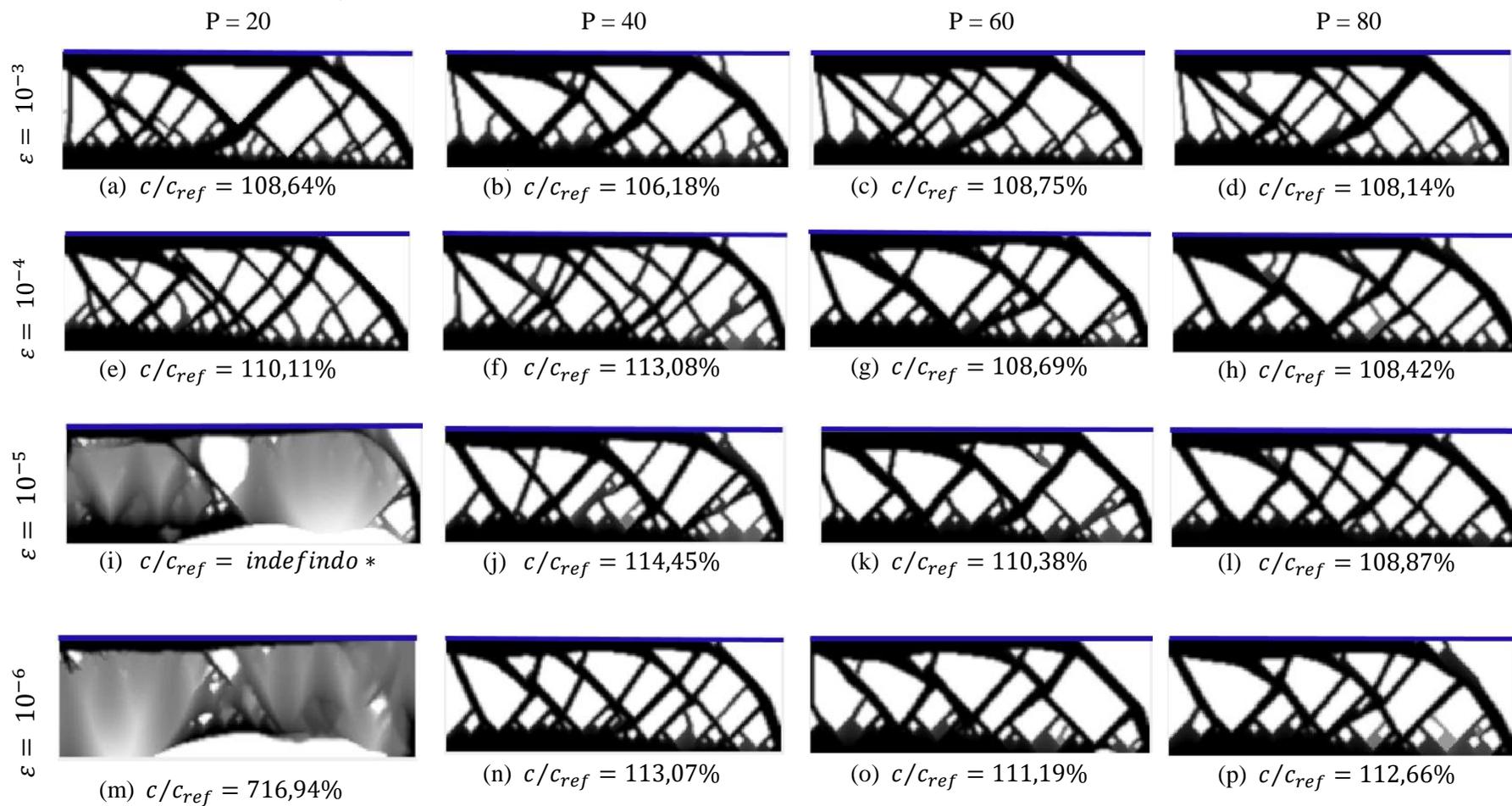
O propósito desse estudo é analisar o quão sensível é o resultado da otimização com base nas alterações dos parâmetros de suavização e precisão P e ε . Os resultados podem ser evidenciados na Figura 44, onde são apresentadas as soluções para os diferentes valores de ambos os parâmetros, juntamente com os valores da relação c/c_{ref} para fins de comparação de desempenho.

A investigação dos parâmetros P e ε foi sucedida considerando a orientação de impressão mais desafiadora, a direção “N”, que demanda uma quantidade maior de material e não demonstra tanta eficiência quanto as outras orientações, como indicado pela relação c/c_{ref} e discutido na seção anterior. Entre os 16 modelos otimizados, apenas o modelo da Figura 44d, com $P = 80$ e $\varepsilon = 10^{-3}$, alcançou a solução ótima com base no critério de parada do otimizador. Este estipula que a mudança na solução entre as interações sucessivas seja menor que a tolerância estabelecida em 0,01.

Esse resultado sugere um desempenho superior do otimizador OC quando são utilizados valores mais altos para os parâmetros. Em outras palavras, uma maior aproximação do problema original é necessária para alcançar a convergência. Isso é reforçado ao comparar o modelo da Figura 44d com os demais modelos, uma vez que utilizaram parâmetros com valores menores e enfrentaram problemas de instabilidade e convergência.

A variação dos parâmetros do AMfilter também interfere na diversificação das topologias alcançadas, evidenciando a sensibilidade do projeto em função dos dados de entrada. Os piores resultados são exemplificados nas Figuras 44i e 44m, os quais demonstraram instabilidade na busca da solução ótima, indicando alta sensibilidade na redução dos parâmetros de suavização P e ε .

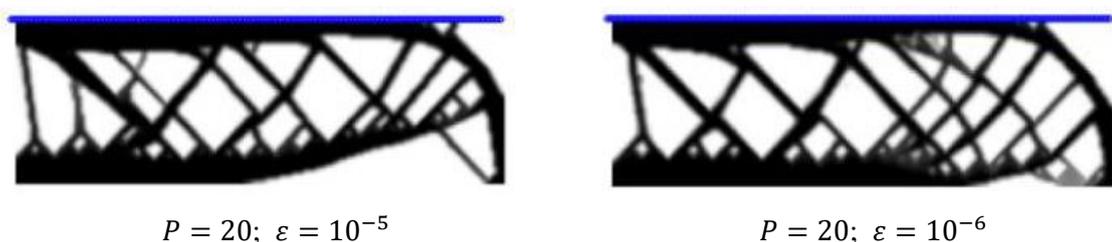
Figura 44 – Exemplos da variação dos parâmetros P e ε para o caso da viga MBB.



Fonte: Elaborada pela autora.

No estudo desenvolvido por Langelaar (2016), modelo “N” também foi analisado, revelando resultados menos satisfatório ao empregar parâmetros menores, como também observado nesta pesquisa. No entanto, ao comparar os resultados com os obtidos Langelaar (2016), é perceptível que autor encontrou soluções topologicamente mais adequadas, como pode ser verificado ao contrastar as Figuras 44i e 44m com a Figura 45. Isso sugere que o algoritmo de otimização MMA, utilizado por Langelaar (2016) em sua pesquisa, apresenta melhor desempenho mesmo ao admitir valores menores para os parâmetros, se comparado com o OC utilizado neste estudo.

Figura 45 – Soluções desfavoráveis da variação dos parâmetros P e ε obtido por Langelaar (2016).



Fonte: (LANGELAAR, 2016).

É importante frisar que, de acordo com Langelaar (2016), embora a redução do valor de ε possa aprimorar a precisão de resposta, isso pode aumentar a não linearidade e a não convexidade do problema, tornando-o mais desafiador para o otimizador encontrar uma solução ótima, o que possivelmente explica os resultados ilustrados nas Figuras 44i e 44m.

Em relação ao parâmetro P , os resultados mostram uma tendência positiva para valores maiores, ou seja, quanto maior o valor de P , mais eficiente é o desempenho do otimizador para encontrar a solução. Portanto, é fundamental reconhecer que a escolha dos valores dos parâmetros (P e ε) pode ter efeitos variados, influenciados não apenas pelo algoritmo empregado para resolução do problema de otimização, mas também pelas características específicas de cada problema.

Diante disso, os valores avaliados neste estudo não devem ser considerados como absolutos, visto que outros fatores também desempenham um papel significativo para as soluções da otimização, a exemplo, das condições de contorno aplicadas, das propriedades do material e das restrições do espaço de busca do otimizador (limite movimento).

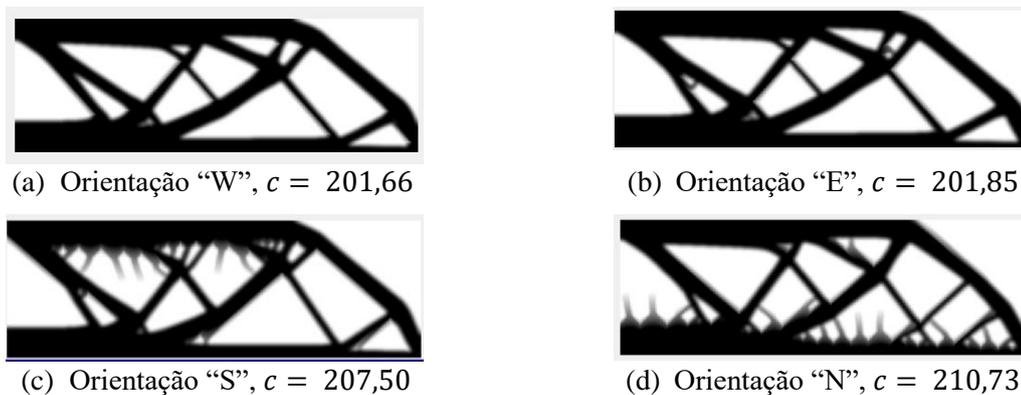
5.3 Exemplo 1

No exemplo 1, ainda é abordado o modelo de viga MBB explorado na seção anterior. No entanto, agora com foco na verificação da eficiência do AMfilter por meio da simulação de impressão 3D dos modelos otimizados. Para isso, o domínio de projeto é discretizado em uma malha de 720 x 240 elementos, buscando melhorar a qualidade da imagem, conforme discutido na seção 4.3 da metodologia. No refinamento da malha, teve-se o cuidado de ajustar proporcionalmente a largura do filtro de densidade, para que o tamanho do filtro permanecesse inalterado, a fim de evitar detalhes finos na topologia.

Como dados de entrada para o problema de otimização, são utilizados os seguintes: um filtro de densidade com raio de largura, $r_{min} = 8$; uma fração volumétrica de 0.5 e um fator de penalização, $p = 3$. As propriedades do material permaneceram as mesmas definidas no código 88 linhas: módulo de elasticidade ($E = 1$), coeficiente de Poisson ($\nu = 0,3$) e uma rigidez mínima ($E_{min} = 10^{-9}$). Além disso, são especificados os parâmetros de entrada do AMfilter ($\xi_0 = 0,5$; $P = 80$; $\varepsilon = 10^{-3}$), mantendo-os constante para os outros exemplos.

Na Figura 46, são apresentadas as soluções obtidas a partir do processo de otimização. Observa-se uma diferença significativa nas topologias em comparação com as apresentadas na Figura 43, as quais são alcançadas com uma malha mais grossa, indicando que há dependência de malha. Corroborando com isso, Langelaar (2016) observou soluções que também indicam dependência de malha e argumenta que, isso ocorre devido a característica de dependência da malha do próprio AMfilter, que define as relações entre as densidades dos elementos vizinhos. Com isso, à medida que a malha é refinada, as condições de fabricação aditiva são aplicadas em uma escala de comprimento mais fina do que em malhas mais grossas.

Figura 46 – Solução da otimização topológica da viga MBB.



Fonte: Elaborada pela autora.

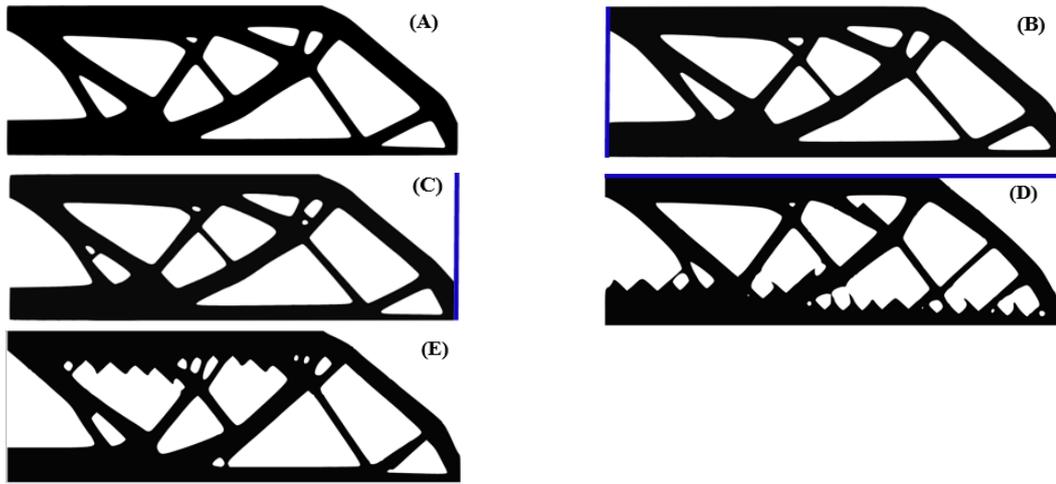
Além da dependência de malha, observa-se também o surgimento de densidades intermediárias, principalmente nos modelos de orientações “S” e “N”. Nestes modelos, os valores das densidades aumentam de forma gradual na direção de construção, o que não é o ideal. Isso pode estar ocorrendo devido ao refinamento da malha, em que o aumento do tamanho do filtro (r_{min}) acontece de forma proporcional, impondo uma região maior de transição cinza entre áreas sólidas e vazias (SIGMUND, 2007). Outro fator que também pode ter contribuído para o acúmulo de densidades intermediárias é o aumento do número de camadas simuladas a partir do refinamento da malha, juntamente com a introdução de erros numéricos devido ao uso dos operadores s_{min} e s_{max} , como destacado por Langelaar (2016).

Nos modelos em questão, devido à inclusão do AMfilter no processo de otimização, o otimizador tenta obter um projeto viável para fabricação. Desse modo, ele procura criar um elemento com o mínimo de material necessário para dar suporte a viga na região superior horizontal. Nesse contexto, Langelaar (2016) recomenda a adoção de valores mais rígidos para os parâmetros P e ε , além de sugerir o uso do método da continuação para ajustar o parâmetro ξ_0 , que controla a penalização de densidades baixas na saída do s_{max} .

Contudo, este estudo abordou de forma diferente o surgimento das densidades intermediárias, aplicando uma penalização durante a etapa de plotagem das densidades. Na Figura 47 são apresentadas as soluções, na qual é perceptível que a eliminação dessas densidades provocou uma interrupção abrupta da topologia nos modelos de orientação “N” e “S” acentuando irregularidades nesses modelos. Por outro lado, os modelos das orientações “W” e “E” apresentaram resultados satisfatório quanto a penalização, não trazendo prejuízos à topologia resultante.

Embora tenha sido realizada a penalização das densidades na fase final da otimização topológica, verifica-se que não houve alteração do valor da flexibilidade mínima alcançada para cada modelo, sugerindo uma preservação do volume estrutural. Além disso, é perceptível que, com o refinamento da malha, o otimizador tende a encontrar soluções topológicas similares ao modelo de referência, mesmo com variação nos valores obtidos para a flexibilidade mínima, conforme demonstrado na Tabela 3. Esse resultado pode não ser interessante em relação à proposta do AMfilter de eliminar estruturas de suporte, uma vez que o modelo de referência pode tender a uma solução que exige o uso de material de suporte durante sua fabricação.

Figura 47 – Solução da otimização do modelo de viga MBB, sem a presença de densidade intermediária.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 3 - Dados da otimização do modelo de viga MBB.

Modelos otimizados	Flexibilidade mínima	Iterações	c/c_{ref}
(A) Modelo de referência	203,90	3196	-
(B) Orientação “W”	201,66	3726	98,90 %
(C) Orientação “E”	201,85	4018	98,99%
(D) Orientação “N”	210,73	3534	103,35%
(E) Orientação “S”	207,15	4943	101,59%

Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme discutido na seção 5.1, os modelos de orientações “W” e “E” continuam a demonstrar um desempenho superior em comparação com o modelo de referência, exibindo as menores flexibilidades mínimas, conforme os dados da Tabela 3. Destes, o modelo “W” mostra-se minimamente como a escolha mais adequada para a fabricação aditiva.

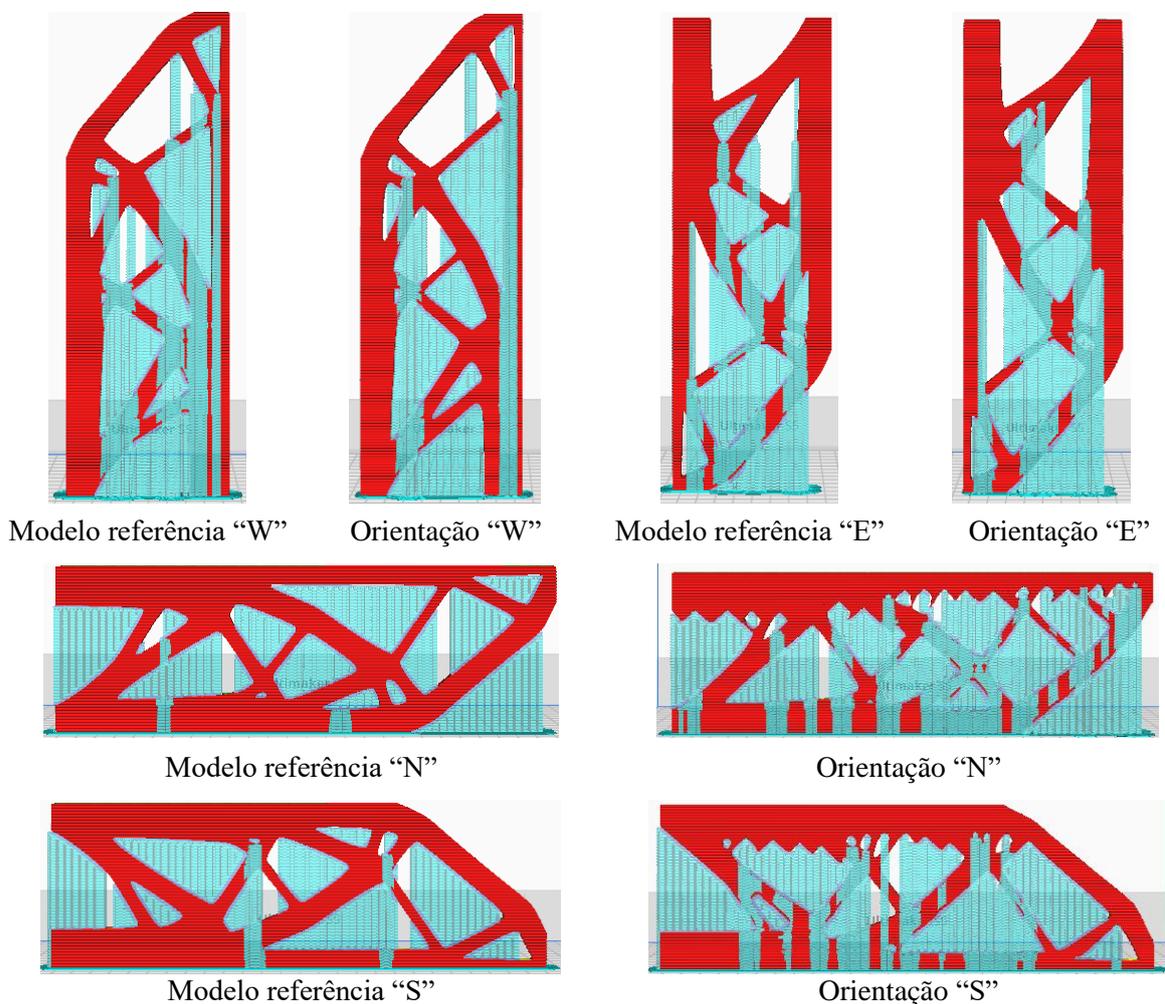
Para uma comparação mais detalhada, o modelo de referência é comparado com cada modelo em suas respectivas orientações de construção (como ilustrado na Figura 48), levando em consideração a formação de material de suporte para ângulos superiores a 45°, conforme limitação imposta pelo AMfilter.

Ao analisar as simulações de impressão ilustradas na Figura 48, é perceptível que o AMfilter não alcançou as expectativas de eliminar completamente a estrutura de suporte, considerando a tecnologia FDM, visto que, o material de suporte está presente em todas as orientações de construção, visível na cor ciano. Todavia, com base nos dados da Tabela 4, é

comprovado uma redução mínima no uso de material de suporte pelo modelo de orientação “W”, em comparação o modelo de referência posicionado na mesma orientação. Apesar da semelhança entre as duas topologias, há uma sutil diferença na angulação dos elementos internos, resultando em uma região de saliência menor, segundo a análise do software de fatiamento.

Ademais, mesmo que os modelos nas orientações “N” e “S” não sejam ideias para a fabricação aditiva devido à topologia irregular, ainda assim é possível produzi-los. Porém, há uma maior demanda de material e tempo de impressão, como pode ser verificado na Tabela 4.

Figura 48 – Simulação de impressão 3D da viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Nesse primeiro caso de simulação, o modelo de referência na orientação “S” mostra-se mais vantajoso para impressão na prática, devido à menor estimativa de consumo de material e

tempo de impressão (Tabela 4). Logo, a utilização do AMfilter no processo de otimização resultou em soluções não eficientes para esse primeiro exemplo.

Tabela 4 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.

Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa total de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	21 horas 11 min.	96 g	5 horas 48 min.
Modelo orientação “W”	19 horas 21 min.	91 g	5 horas 11 min.
Modelo referência “E”	20 horas 20 min.	91 g	4 horas 44 min.
Modelo orientação “E”	20 horas 30 min.	91 g	5 horas 03 min.
Modelo referência “N”	19 horas 13 min.	95 g	5 horas 23 min.
Modelo orientação “N”	25 horas 30 min.	112 g	8 horas 05 min.
Modelo referência “S”	18 horas 14 min.	90 g	4 horas 40 min.
Modelo orientação “S”	21 horas 58 min.	100 g	6 horas 21 min.

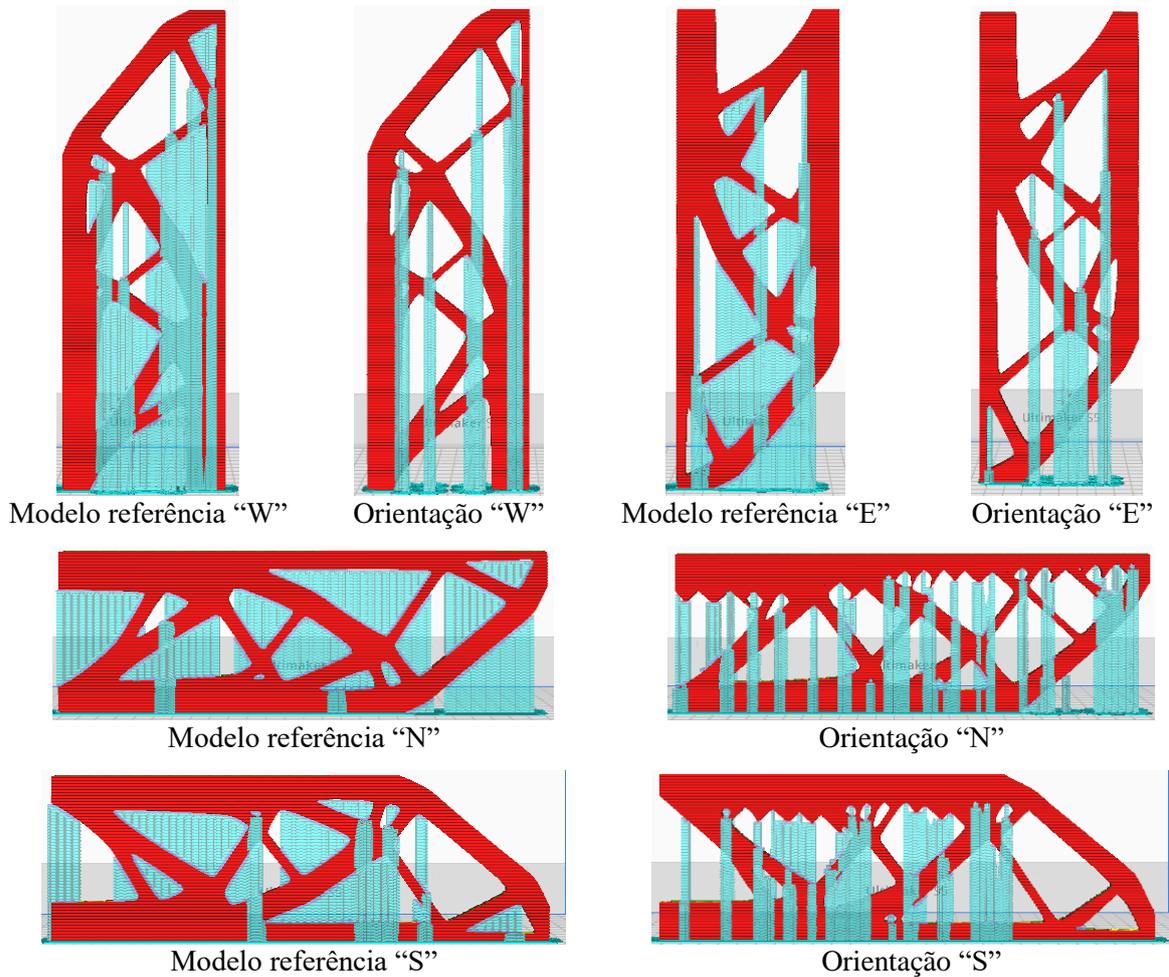
Fonte: Elaborada pela autora.

Com o aumento do ângulo limite para a geração de estruturas de suporte, é comprovada a funcionalidade do AMfilter na redução do uso de estrutura de suporte, como ilustrado na Figura 49. Todos os modelos, exceto o modelo de orientação “N”, demonstram redução na estimativa do uso de material e tempo de impressão de suporte, em comparação com seus respectivos modelos de referência. Neste cenário, o modelo mais favorável para impressão é o modelo na orientação de construção “E”, em que o material de suporte é impresso em um tempo estimado de 3 horas, conforme pode ser verificado na Tabela 5.

É interessante observar que, embora o modelo “W” tenha sido classificado como uma opção para MA na situação anterior, nesse caso, com ângulo limite de 53°, o mesmo obteve um resultado menos satisfatório que o modelo “S”, ainda que com irregularidades em sua topologia. Uma possível explicação para isso é que os suportes gerados no modelo “S” são menores verticalmente em contraste com o modelo “W”, reduzindo assim o volume material de suporte.

Ademais, os modelos de referência também apresentaram redução no tempo de impressão. Contudo, verifica-se que a quantidade de suporte ainda é maior em comparação com os modelos que utilizaram o AMfilter, nos quais o suporte é aplicado apenas nos pontos de inflexão dos elementos internos da estrutura. Essa metodologia oferece uma vantagem significativa ao utilizar a técnica de otimização topológica com restrições para fabricação aditiva, pois resulta em processos mais econômicos.

Figura 49 – Simulação de impressão 3D da viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Tabela 5 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.

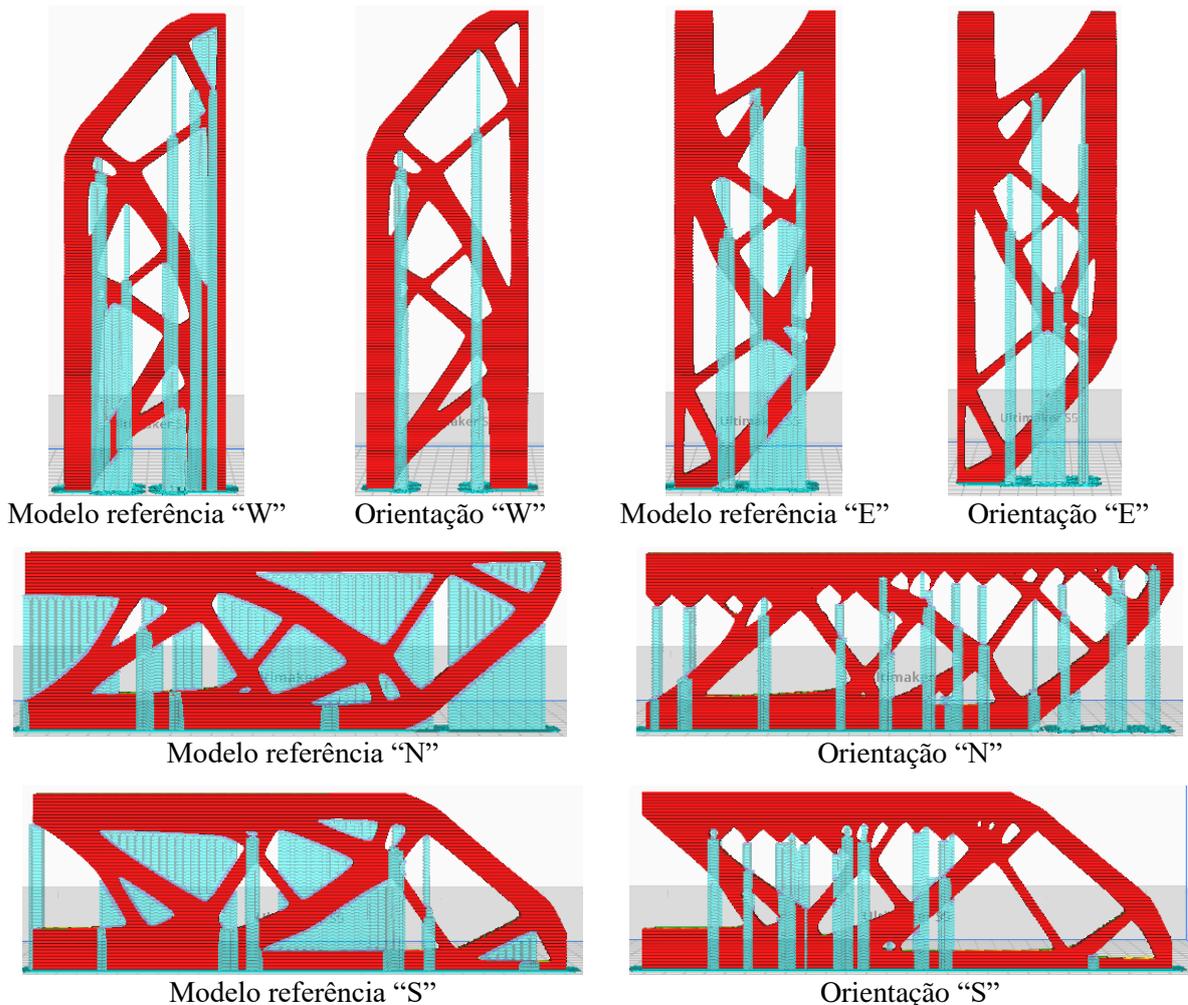
Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa total de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	19 horas 58 min.	93 g	5 horas 30 min.
Modelo orientação “W”	16 horas 10 min.	78 g	3 horas 39 min.
Modelo referência “E”	18 horas 30 min.	85 g	3 horas 57 min.
Modelo orientação “E”	15 horas 27 min.	74 g	3 horas
Modelo referência “N”	18 horas 26 min.	91 g	4 horas 41 min.
Modelo orientação “N”	19 horas 16 min.	86 g	4 horas 43 min.
Modelo referência “S”	17 horas 03 min.	85 g	4 horas 03 min.
Modelo orientação “S”	15 horas 36 min.	77 g	3 horas 19 min.

Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando a última simulação para o exemplo da viga MBB, com um ângulo limite de 60° para geração de suporte (Figura 50), os resultados seguem o mesmo padrão da simulação anterior, com ângulo de 53° , visto que há uma tendência crescente na redução do uso de estruturas de suporte. Entretanto, há uma diferença entre ambas as simulações: o modelo de orientação “W” torna-se novamente o mais eficiente para impressão, tendo a menor estimativa de tempo de impressão, conforme dados da Tabela 6.

O modelo “S” também registra uma redução significativa em relação ao tempo de impressão de material de suporte. Porém, devido à sua topologia irregular, o modelo de orientação “E” mostra-se como o segundo mais viável para a fabricação aditiva, com base nas informações do critério de desempenho estrutural e na topologia mais uniforme.

Figura 50 – Simulação de impressão 3D da viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 60° .



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Tabela 6 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga MBB, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.

Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	17 horas 19 min.	83 g	4 horas 16 min.
Modelo orientação “W”	12 horas 20 min.	66 g	1 hora 37 min.
Modelo referência “E”	15 horas 43 min.	77 g	2 horas 59 min.
Modelo orientação “E”	14 horas 37 min.	72 g	2 horas 42 min.
Modelo referência “N”	17 horas 59 min.	88 g	4 horas 27 min.
Modelo orientação “N”	15 horas 11 min.	74 g	2 horas 49 min.
Modelo referência “S”	16 horas 01 min.	80 g	3 horas 21 min.
Modelo orientação “S”	13 horas 06 min.	68 g	1 hora 54 min.

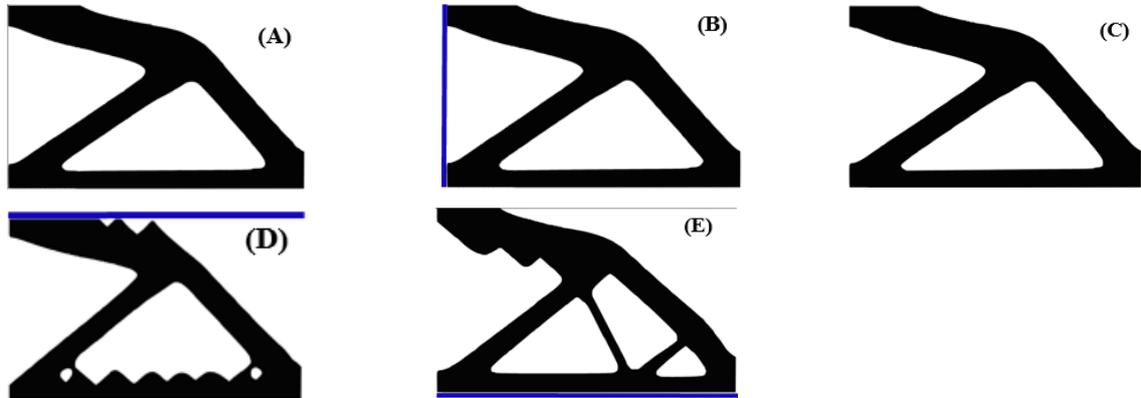
Fonte: Elaborada pela autora.

Portanto, ao considerar a proposta do AMfilter em obter soluções autoportantes, observa-se que esse resultado não é atingido mesmo estimando ângulos limites de 60°. É pertinente destacar que a utilização do AMfilter acarreta algumas instabilidades na obtenção das soluções ótimas, como discutido anteriormente. Diante disso, é válido a realização de outros estudos para determinar se isso é a causa da falta de alcance do resultado desejado ou se está relacionado ao otimizador OC utilizado no processo de otimização, uma vez que Langelaar (2016) ressalta que o OC pode não ser a melhor escolha para ser utilizado em conjunto com o filtro.

5.4 Exemplo 2

No problema de otimização topológica do modelo de viga em balanço, além dos dados de entrada comum aos demais exemplos, é utilizado um filtro de densidade de $r_{min} = 12$ e uma fração volumétrica de 0,4. Neste exemplo, assim como no exemplo 1, é possível observar a semelhança entre as soluções dos modelos na orientação de construção “W” e “E”, mostradas nas Figuras 51B e 51C, respectivamente, com o modelo de referência (Figura 51A), distinguindo-se apenas nos valores da flexibilidade mínima, conforme os dados apresentados na Tabela 7.

Figura 51 – Solução da otimização topológica do modelo de viga em balanço.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 7 - Dados da otimização do modelo de viga em balanço.

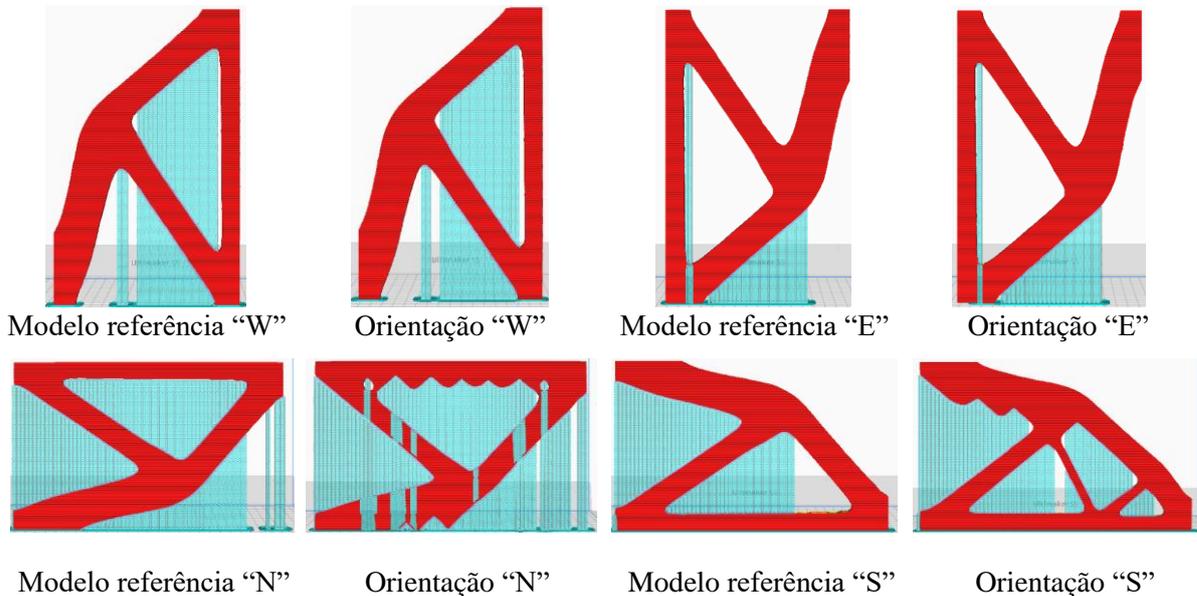
Modelos otimizados	Flexibilidade mínima	Iterações	c/c_{ref}
(A) Modelo de referência	66,14	1894	-
(B) Orientação “W”	65,34	1165	98,79 %
(C) Orientação “E”	65,45	1473	98,96 %
(D) Orientação “N”	71,49	1953	108,10%
(E) Orientação “S”	69,95	2262	105,80%

Fonte: Elaborada pela autora.

Neste exemplo, a otimização topológica em conjunto com o AMfilter também não alcança sucesso na proposta de eliminação do uso de estrutura de suporte, e a topologia resultante não permite uma redução significativa em comparação com o modelo de referência, como pode ser verificado na Figura 52.

Na simulação de impressão, a orientação de construção “E” apresenta melhor desempenho tanto para o modelo de referência quando o para modelo resultante da otimização em conjunto com AMfilter. Ambos os modelos têm a mesma estimava de tempo total de impressão, de 16 horas e 12 minutos, diferenciando-se apenas por minutos no tempo de impressão da estrutura de suporte (conforme Tabela 8). Por outro lado, os modelos na posição horizontal de impressão (“N” e “S”) mostram-se menos eficientes, independentemente do uso do AMfilter.

Figura 52 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Tabela 8 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.

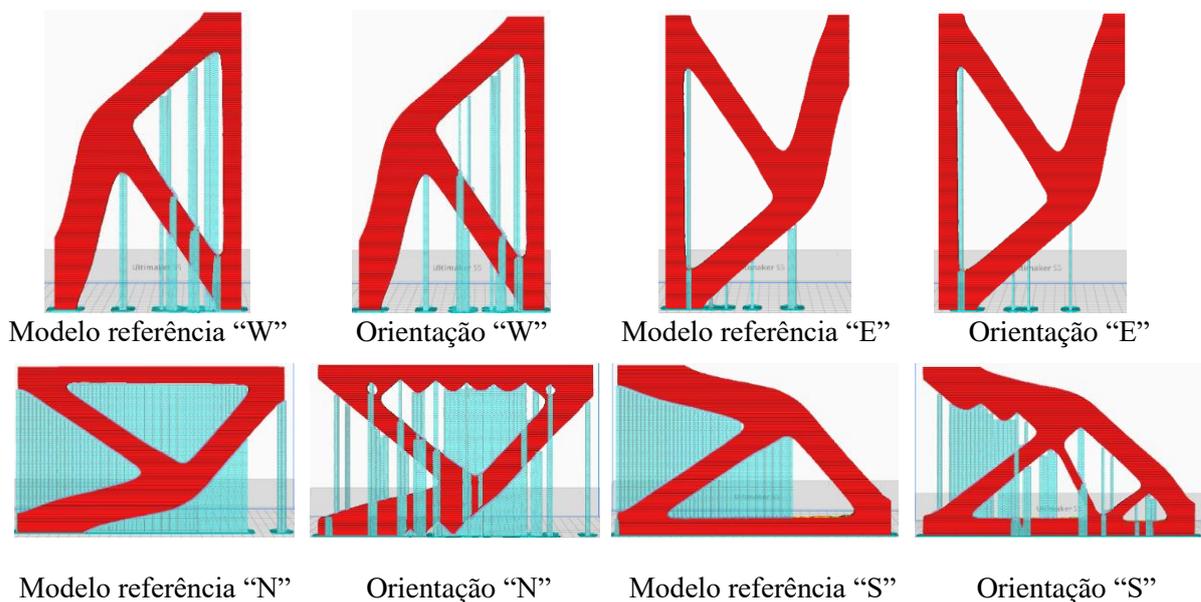
Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	19 horas 54 min.	109 g	5 horas 27 min.
Modelo orientação “W”	19 horas 43 min.	108 g	5 horas 22 min.
Modelo referência “E”	16 horas 12 min.	94 g	3 horas 01 min.
Modelo orientação “E”	16 horas 12 min.	94 g	3 horas 07 min.
Modelo referência “N”	26 horas 50 min.	143 g	11 horas 14 min.
Modelo orientação “N”	32 horas 24 min.	161 g	14 horas 07 min.
Modelo referência “S”	20 horas 43 min.	120 g	7 horas 16 min.
Modelo orientação “S”	23 horas 06 min.	126 g	7 horas 51 min.

Fonte: Elaborada pela autora.

Todavia, é notável que o modelo “S” é o único que apresenta topologia diferente ao utilizar o AMfilter. Isso sugere que, apesar do refinamento da malha, o uso do filtro buscou gerar uma solução distinta do modelo de referência, visando atender a restrição implícita do ângulo limite de 45°. No entanto, nesse cenário de simulação de impressão 3D, o modelo “S” ainda obtém baixo desempenho no uso de estrutura de suporte. Desse modo, o uso do AMfilter pode oferecer configurações alternativas na busca pela solução ótima, porém sua eficácia pode variar dependendo das características exploradas em cada problema.

Na simulação de impressão com ângulo limite de 53° (Figura 53), os modelos na orientação de construção “W” e “E” alcançaram uma redução mínima no uso de estrutura de suporte em relação aos seus modelos de referência. Em contrapartida, os modelos de orientação “S” e “N” conseguem reduzir em até duas horas da estimativa de tempo de impressão de suporte (dados apresentados na Tabela 9). Nesse caso, a topologia pouco uniforme favorece a eliminação de regiões que exigem suporte, em comparação com os respectivos modelos de referência.

Figura 53 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

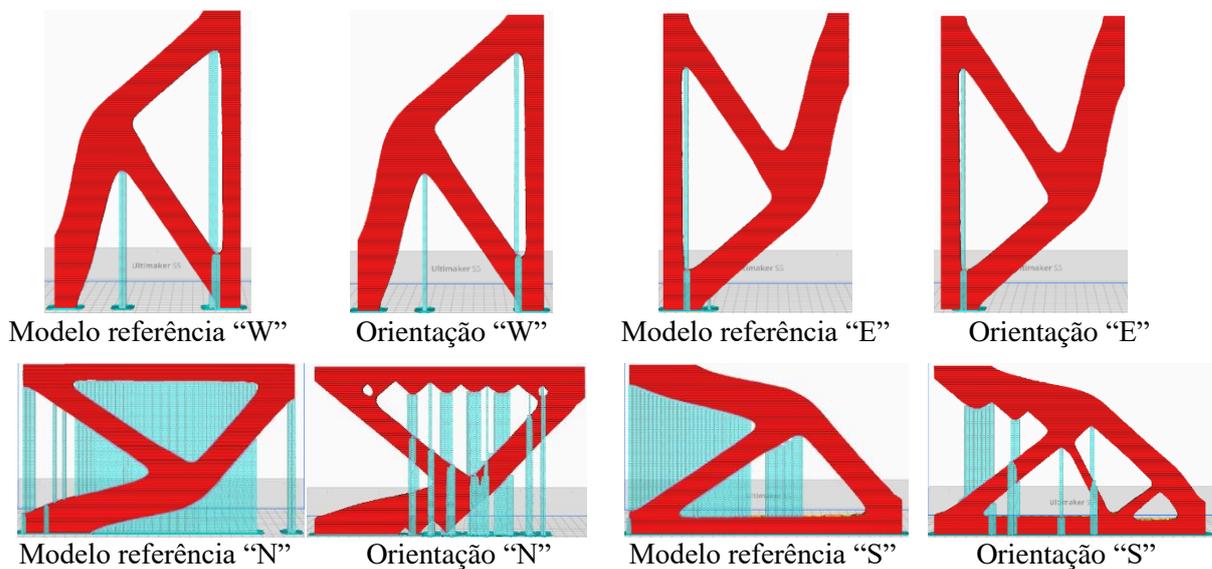
Tabela 9 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.

Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	17 horas 51 min.	97 g	3 horas 46 min.
Modelo orientação “W”	17 horas 02 min.	93 g	3 horas 08 min.
Modelo referência “E”	13 horas 53 min.	83 g	1 hora 17 min.
Modelo orientação “E”	13 horas 28 min.	81 g	1 hora 02 min.
Modelo referência “N”	26 horas 03 min.	140 g	10 horas 40 min.
Modelo orientação “N”	26 horas 18 min.	128 g	8 horas 59 min.
Modelo referência “S”	20 horas 30 min.	119 g	7 horas 05 min.
Modelo orientação “S”	19 horas 27 min.	107 g	5 horas 06 min.

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao analisar a última simulação de impressão para o exemplo da viga em balanço, considerando o ângulo limite para geração de suporte de 60° (Figura 54), verifica-se que os modelos de orientação de construção na vertical (modelos “W” e “E”) alcançam uma redução de aproximadamente 80% do tempo estimado para impressão de suporte, em relação à primeira simulação de impressão com ângulo de 45°. Porém, para ambos os modelos a otimização topológica com restrição do AMfilter, não é eficiente, visto que os respectivos modelos de referência (sem uso do filtro) alcançaram o mesmo desempenho.

Figura 54 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Tabela 10 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.

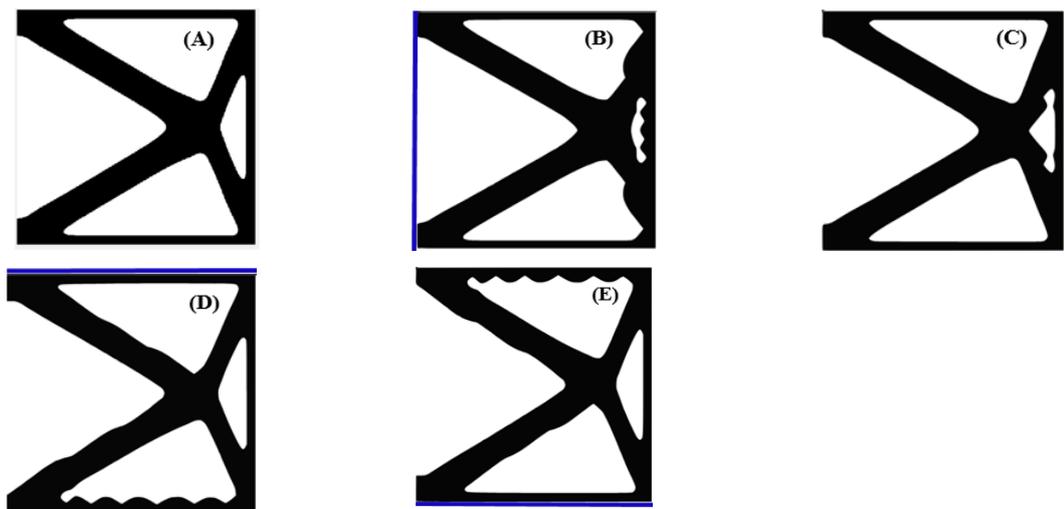
Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	14 horas 17 min.	85 g	1 hora 37 min.
Modelo “W”	13 horas 33 min.	81 g	1 hora 04 min.
Modelo referência “E”	12 horas 54 min.	79 g	37 min.
Modelo “E”	12 horas 44 min.	78 g	34 min.
Modelo referência “N”	24 horas 27 min.	129 g	9 horas 03 min.
Modelo “N”	19 horas 43 min.	104 g	4 horas 41 min.
Modelo referência “S”	19 horas 41 min.	113 g	6 horas 13 min.
Modelo “S”	15 horas 26 min.	91 g	2 horas 26 min.

Fonte: Elaborada pela autora.

5.5 Exemplo 3

Nesse exemplo, é utilizado um filtro de densidade de $r_{min} = 15,6$, uma fração volumétrica de 0,4 e um fator de penalização, $p = 3$. Na Figura 55, são apresentadas as soluções da otimização topológica, onde visualmente, neste exemplo, pode identificar particularidades em cada topologia, distinguindo-se do modelo de referência (Figura 55A). Além disso, observa-se que os modelos de orientação de construção “N” e “S” alcançaram soluções semelhantes, não apenas em termos de topologia, mas também na flexibilidade mínima, conforme verificado na Tabela 11. A principal diferença entre esses modelos situa-se no fato de que, com o refinamento da malha, ocorreu um acúmulo gradual de densidade intermediária a partir da direção do processo de impressão, formando irregularidades em lados opostos da topologia.

Figura 55 – Solução da otimização topológica do modelo de viga em balanço com mais de uma carga.



Fonte: Elaborada pela autora.

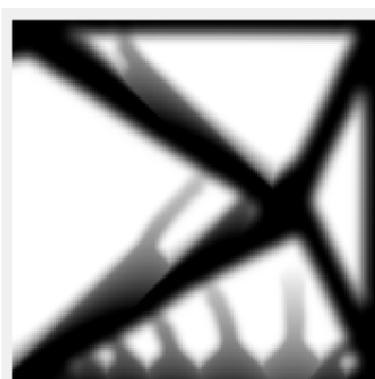
Tabela 11 - Dados da otimização do modelo de viga em balanço com mais de uma carga.

Modelos otimizados	Flexibilidade mínima	Iterações	c/c_{ref}
(A) Modelo de referência	77,30	472	-
(B) Orientação “W”	78,26	2682	101,25 %
(C) Orientação “E”	77,02	2179	99,64 %
(D) Orientação “N”	80,76	819	104,47%
(E) Orientação “S”	80,75	822	104,47%

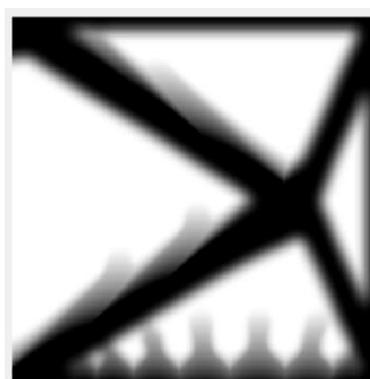
Fonte: Elaborada pela autora.

Comparando o exemplo 3 com os exemplos 1 e 2, nota-se um impacto menor das densidades intermediárias nos modelos “N” e “S”, resultando em uma topologia mais regular após a penalização das densidades na fase de plotagem do modelo. Além disso, diferente do que foi observado no exemplo 1 para estes modelos, o refinamento da malha leva a uma solução mais uniforme e aparentemente com menor quantidade de densidade intermediária, conforme evidenciado na Figura 56. Isso pode ocorrer devido à particularidade de cada problema, em outras palavras, o nível de complexidade, a sensibilidade do problema à malha e os requisitos específicos de desempenho.

Figura 56 – Solução da otimização topológica do modelo de orientação “N”



(a) Malha 150 x 150; $c = 85,31$

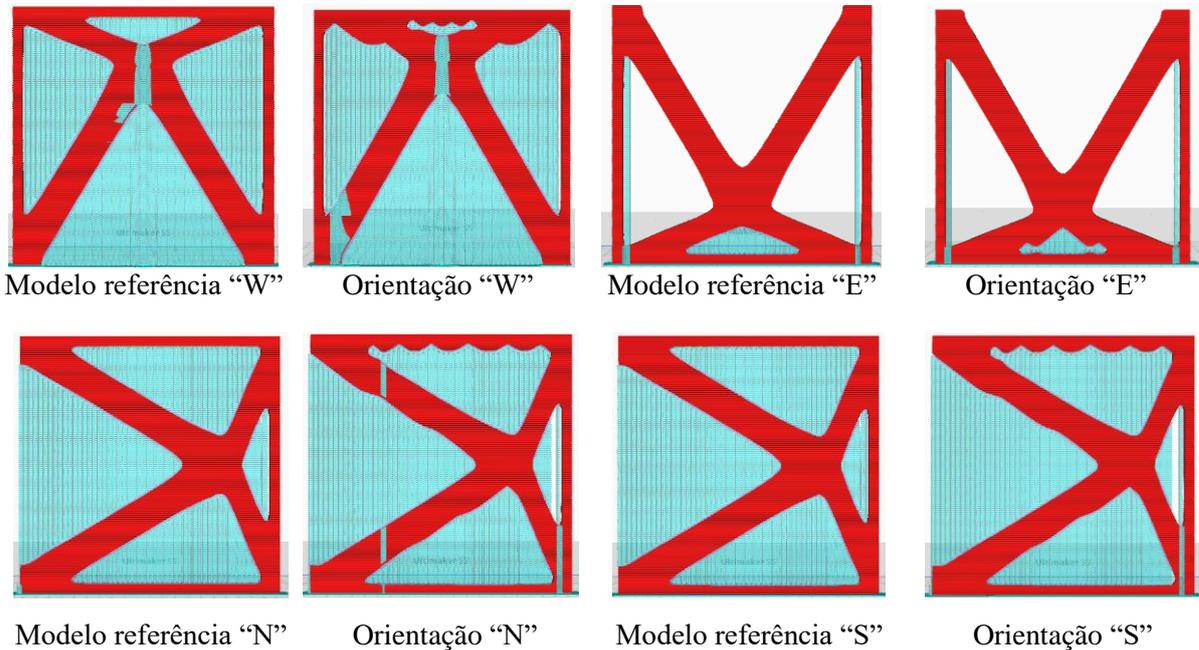


(b) Malha 300 x 300; $c = 81,82$

Fonte: Elaborada pela autora.

No problema em questão, a orientação de construção “E” é considerada o modelo de maior desempenho em relação ao de referência (conforme dados na Tabela 11), o que também é confirmado pela simulação de impressão 3D (Figura 57). No entanto, como a diferença entre esse modelo e o de referência está concentrado em um único ponto, sendo a redução no tempo estimado para impressão da estrutura de suporte mínima, chegando a apenas 19 minutos, como indicado pelos dados da Tabela 12. Essa redução é ainda menor no modelo de orientação “W” em comparação com seu respectivo modelo de referência. Ainda, observa-se que os modelos de orientação de construção (“N” e “S”) são os de menos eficiência, com uma estimativa de tempo de impressão maior, e conseqüentemente, um maior consumo de material. Essa situação não está restrita apenas aos modelos otimizados com o uso do AMfilter, mas também aos modelos de referência nas respectivas posições.

Figura 57 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

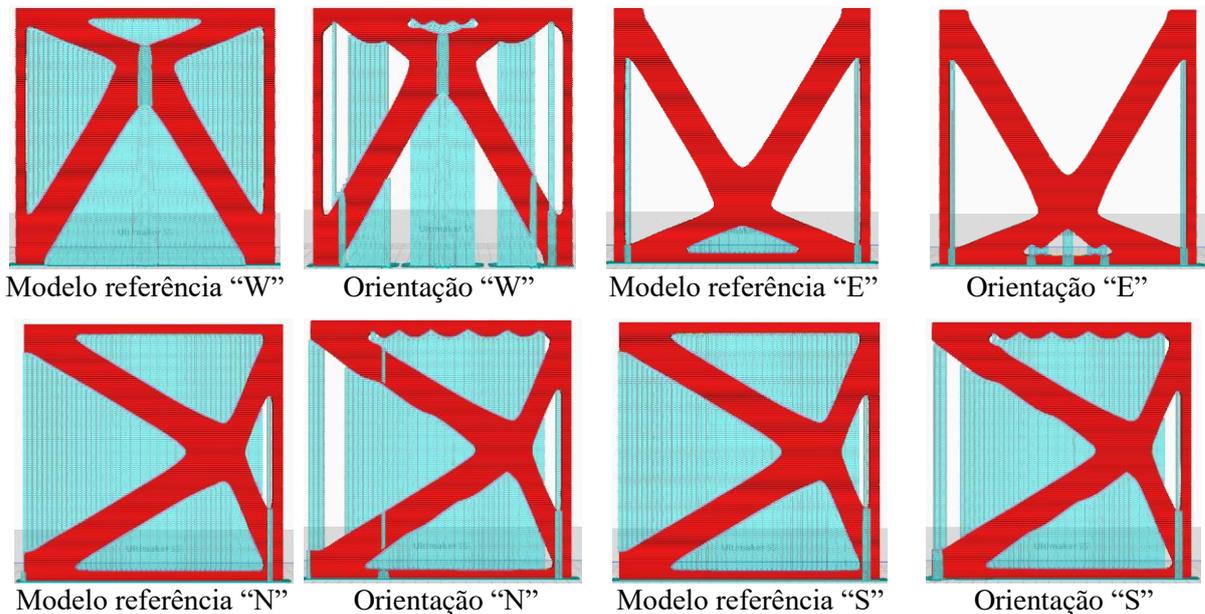
Tabela 12 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.

Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	29 horas 55 min.	145 g	10 horas 48 min.
Modelo orientação “W”	29 horas 41 min.	144 g	10 horas 33 min.
Modelo referência “E”	15 horas 59 min.	92 g	1 hora 55 min.
Modelo orientação “E”	15 horas 39 min.	91 g	1 hora 36 min.
Modelo referência “N”	29 horas 31 min.	154 g	12 horas 10 min.
Modelo orientação “N”	30 horas 44 min.	156 g	12 horas 39 min.
Modelo referência “S”	29 horas 27 min.	154 g	12 horas 14 min.
Modelo orientação “S”	30 horas 21 min.	155 g	12 horas 27 min.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na simulação de impressão, considerando o ângulo limite de 53° para geração de suporte (como ilustra a Figura 58), observa-se que o modelo de orientação “W” obtém a maior redução do tempo estimado para impressão do suporte, aproximadamente 3 horas a menos que o modelo de referência, com base nos dados da Tabela 13. Ademais, o modelo “E” permanece com a maior eficiência em consumo de material e tempo de impressão.

Figura 58 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Tabela 13 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.

Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência "W"	29 horas 16 min.	143 g	10 horas 33 min.
Modelo orientação "W"	25 horas 32 min.	125 g	07 horas 37 min.
Modelo referência "E"	16 horas 11 min.	92 g	1 hora 50 min.
Modelo orientação "E"	15 horas 32 min.	88 g	1 hora 15 min.
Modelo referência "N"	29 horas 18 min	153 g	12 horas 20 min.
Modelo orientação "N"	29 horas 4 min.	147 g	11 horas 30 min.
Modelo referência "S"	29 horas 12 min.	153 g	12 horas 24 min.
Modelo orientação "S"	28 horas 55 min.	147 g	11 horas 25 min.

Fonte: Elaborada pela autora.

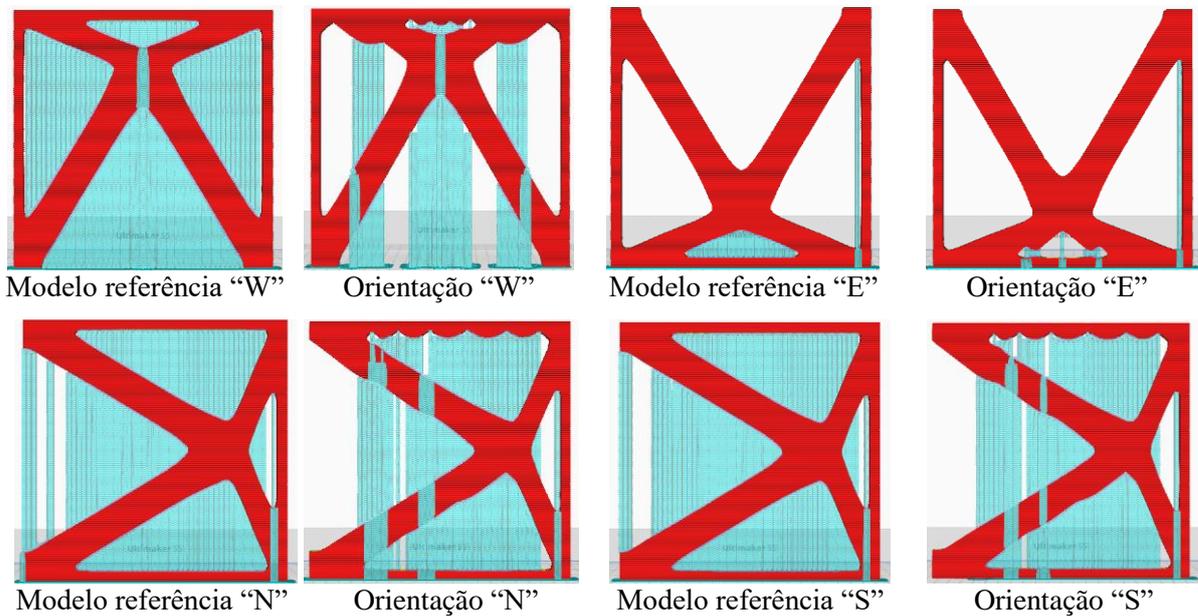
Os resultados da simulação de impressão com um ângulo limite 60° são ilustrados na Figura 59. Neste cenário, o modelo de orientação "W" continua gradativamente a diminuir o tempo de impressão de suporte, enquanto o modelo de referência não apresenta redução significativa em comparação com as duas simulações anteriores.

De acordo com as características geométricas da estrutura otimizada, o modelo de maior eficiência continua sendo o de orientação de construção "E", com o menor tempo dedicado para

impressão de estrutura de suporte (Tabela 14), representando uma redução de 52% em comparação com a simulação de impressão com ângulo de 45°. Além disso, os modelos “N” e “S” também indicam redução no consumo de material de suporte.

Esses resultados sugerem que o uso do AMfilter durante o processo de otimização pode resultar em topologias mais econômicas e apropriada para fabricação aditiva, especialmente ao considerar ângulos superiores a 45°.

Figura 59 – Simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.)

Tabela 14 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo de viga em balanço com mais de uma carga, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.

Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	28 horas 42 min.	142 g	10 horas 28 min.
Modelo orientação “W”	22 horas 36 min.	116 g	6 horas 09 min.
Modelo referência “E”	15 horas 13 min.	88 g	1 hora 12 min.
Modelo orientação “E”	14 horas 28 min.	85 g	46 min.
Modelo referência “N”	27 horas 15 min.	139 g	10 horas 06 min.
Modelo orientação “N”	26 horas 39 min.	132 g	9 horas 19 min.
Modelo referência “S”	26 horas 53 min.	138 g	10 horas
Modelo orientação “S”	25 horas 53 min.	130 g	8 horas 51 min.

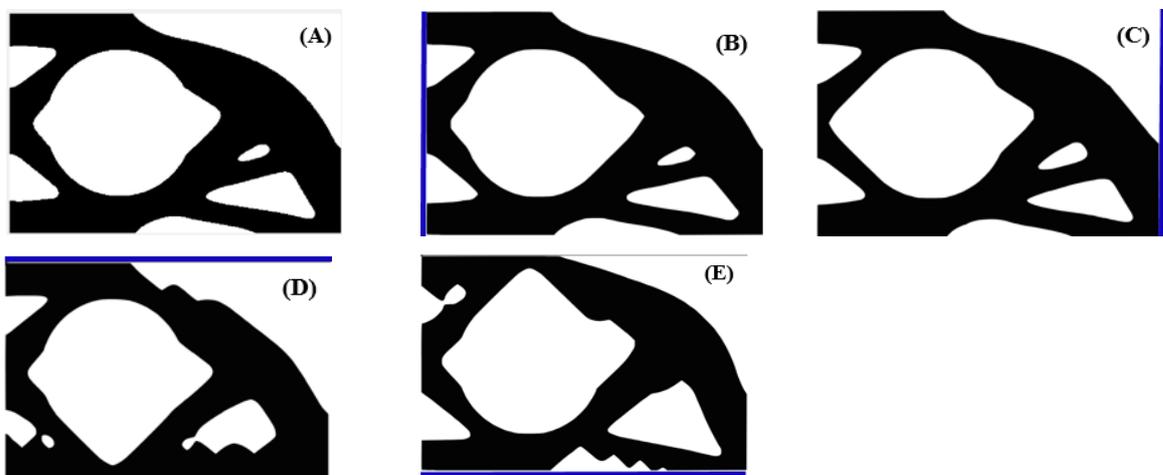
Fonte: Elaborada pela autora.

5.6 Exemplo 4

No problema de otimização topológica do modelo de viga em balanço com elemento passivo, são utilizados os seguintes parâmetros: um filtro de densidade de $r_{min} = 15$, uma fração volumétrica de 0,5 e um fator de penalização $p = 3$. As propriedades do material permaneceram as mesmas exploradas no exemplo 1, bem como os parâmetros de entrada do AMfilter.

Na Figura 60 são ilustradas as soluções resultantes da otimização do modelo. Como nos exemplos anteriores abordados neste estudo, as soluções obtidas com uso do AMfilter mostram-se semelhantes ao modelo de referência (Figura 60A), embora haja uma distinção de topologia mais acentuada nos modelos de orientação “S” e “N”. Ademais, é observado que, independentemente das particularidades dos problemas aqui analisados, os modelos “N” e “S” tendem a acumular densidades intermediárias em maior intensidade, resultando em uma falta de uniformidade nas bordas do domínio quando se aplica a penalização das densidades durante a plotagem.

Figura 60 – Solução da otimização topológica do modelo com elemento passivo.



Fonte: Elaborada pela autora.

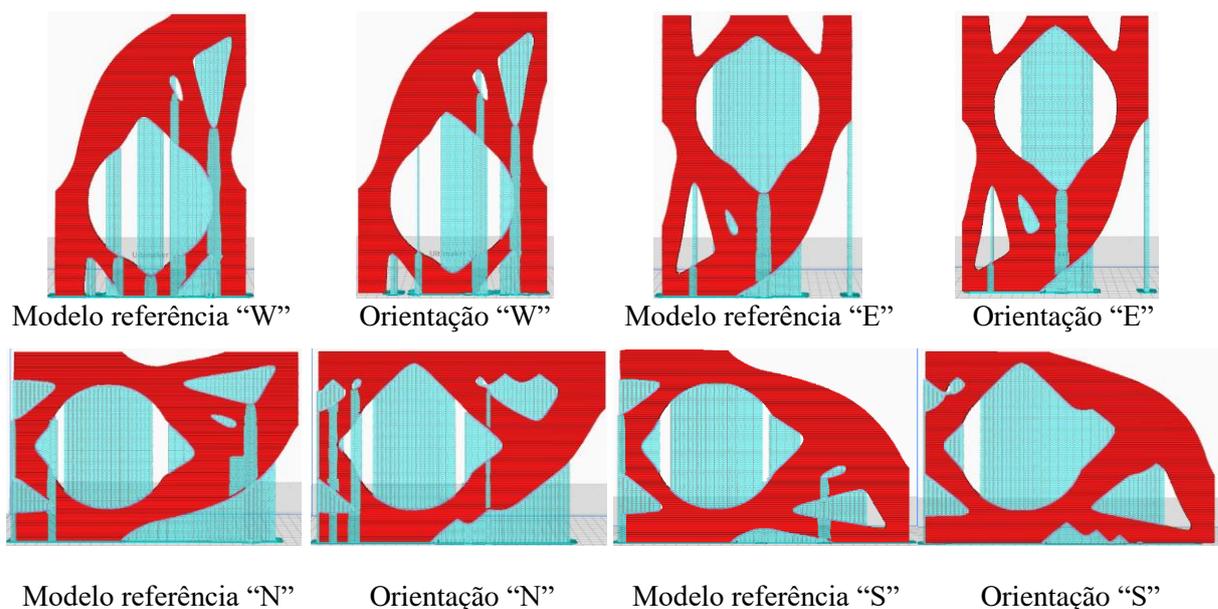
Analisando os dados da Tabela 15, verifica-se que o modelo de orientação “W” se destaca como o mais eficiente, sem comprometer a rigidez. O modelo “E” também é considerado uma opção viável para fabricação aditiva. Por outro lado, o modelo de orientação “S” é identificado como o de menor desempenho para manufatura aditiva.

Tabela 15 - Dados da otimização do modelo com elemento passivo.

Modelos otimizados	Flexibilidade mínima	Iterações	c/c_{ref}
(A) Modelo de referência	57,04	3342	-
(B) Orientação “W”	56,04	1872	98,25 %
(C) Orientação “E”	56,34	2586	98,76 %
(D) Orientação “N”	65,27	1321	114,41%
(E) Orientação “S”	68,74	1946	120,49%

Fonte: Elaborada pela autora.

A simulação de impressão do modelo de viga demonstra que a otimização topológica em conjunto com o AMfilter não conseguiu eliminar completamente as estruturas de suportes (Figura 61). No entanto, os dados da Tabela 16 mostram uma redução no tempo de impressão dessas estruturas nos modelos de orientação “W” e “E” em comparação com seus respectivos modelos de referência. É importante destacar que, a falta de eficiência na proposta do filtro pode estar relacionada as condições específicas do problema (condições de contorno, aplicação de carga e restrição de volume) dos exemplos analisados, não permitindo grandes modificações na solução final ou até mesmo no tipo de tecnologia de impressão analisada neste estudo. Contudo, o uso do AMfilter consegue, dentro das restrições, limitar as regiões que exigiriam estruturas de suporte, promovendo pequenas alterações na topologia resultante.

Figura 61 – Simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.

Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Tabela 16 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 45°.

Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	26 horas 14 min.	144 g	7 horas 02 min.
Modelo orientação “W”	24 horas 03 min.	134 g	5 horas 52 min.
Modelo referência “E”	25 horas 21 min.	142 g	6 horas 44 min.
Modelo orientação “E”	24 horas 28 min.	137 g	6 horas 17 min.
Modelo referência “N”	30 horas 45 min.	165 g	10 hora 22 min.
Modelo orientação “N”	30 horas 40 min.	163 g	10 horas 21 min.
Modelo referência “S”	27 horas 19 min.	153 g	8 horas 09 min.
Modelo orientação “S”	27 horas 57 min.	154 g	8 horas 37 min.

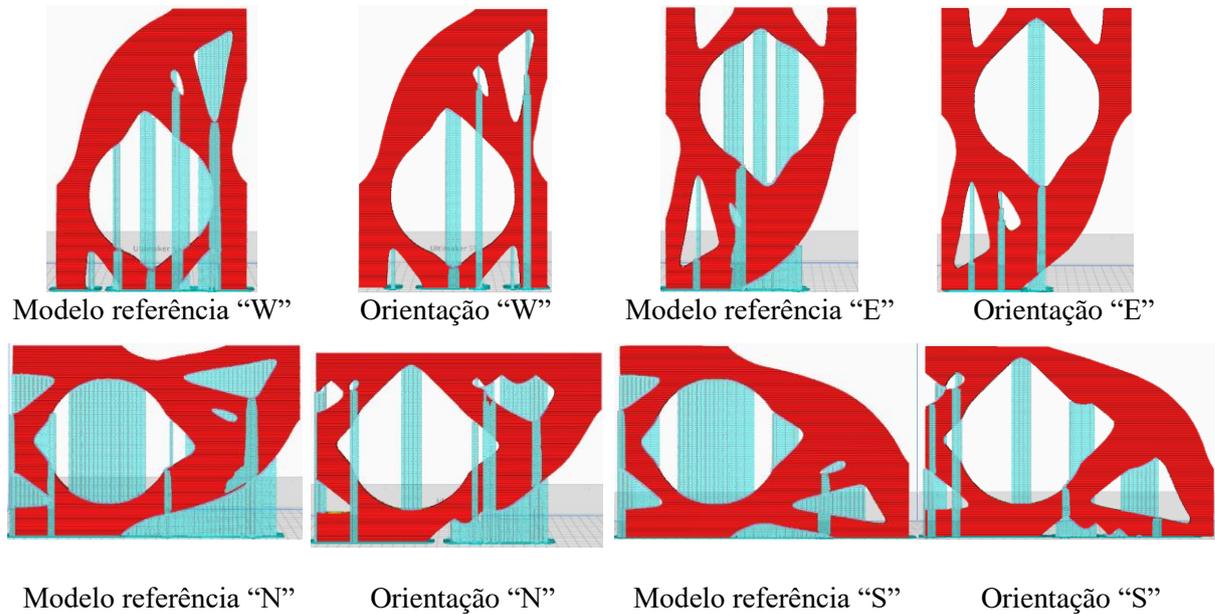
Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados apresentados na Figura 62, referentes à simulação de impressão com ângulo de 53°, demonstram uma redução expressiva na necessidade de estrutura de suporte em todas as soluções obtidas com o uso do AMfilter, representando uma média de redução de 49% em comparação com a simulação anterior.

O elemento passivo, definido como uma região circular dentro do domínio, é modificado para limitar as regiões de saliência (*overhang*). Essa modificação é mais evidente nos modelos de orientação “S” e “N”, nos quais a região circular é afunilada na direção de impressão, reduzindo espaço de exigência de suporte, ao contrário do modelo de referência que, mantém as características circulares.

Nos modelos “W” e “E” essas mudanças na geometria ocorrem de forma mais suave, mas ainda assim produzem resultados positivos. Notavelmente, o modelo de orientação “E” destaca-se como mais eficiente para a manufatura aditiva em termos econômico, segundo os dados da Tabela 17, com uma redução do tempo de impressão em 02 horas e 39 m em relação ao modelo de referência.

Figura 62 – Simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Tabela 17 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 53°.

Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência "W"	24 horas 02 min.	134 g	5 horas 29 min.
Modelo orientação "W"	20 horas 05 min.	117 g	2 horas 58 min.
Modelo referência "E"	23 horas 06 min.	132 g	5 horas 01 min.
Modelo orientação "E"	18 horas 57 min.	113 g	2 horas 22 min.
Modelo referência "N"	29 horas 28 min.	159 g	9 horas 21 min.
Modelo orientação "N"	24 horas 39 min.	134 g	5 horas 58 min.
Modelo referência "S"	26 horas 04 min.	147 g	7 horas 15 min.
Modelo orientação "S"	22 horas 51 min.	128 g	4 horas 42 min.

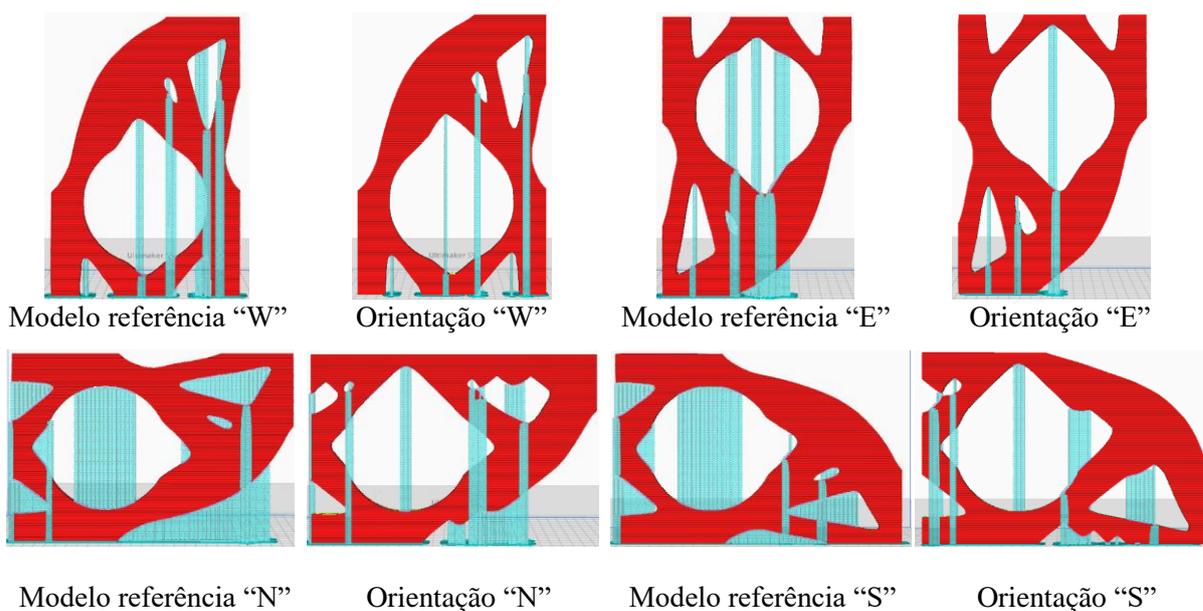
Fonte: Elaborada pela autora.

Na simulação da impressão considerando o ângulo de 60°, a estimativa do tempo de impressão para suporte não alcança redução expressiva em comparação com a simulação de ângulo de 53°, registrando uma média de 24%. No entanto, quando essa comparação é realizada com os modelos de referência da simulação, essa média aumenta para 48%.

Observando a Figura 63, é possível identificar que os modelos de referência das orientações "N" e "S" são os modelos de maior consumo de material e tempo de impressão.

Porém, com o uso do AMfilter, os modelos de mesma orientação podem ser impressos de maneira mais eficiente, reduzindo aproximadamente 03:00 horas do tempo total de fabricação, conforme os dados da Tabela 18. Deste modo, é aconselhado a impressão dos modelos na orientação de construção vertical (“W” e “E”), onde o uso de estrutura de suporte é mínimo, principalmente para os modelos resultantes da otimização com o AMfilter.

Figura 63 – Simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.



Fonte: Elaborada pela autora (Software UltiMaker Cura 5.6.).

Tabela 18 - Dados da simulação de impressão 3D do modelo com elemento passivo, com geração de suporte para ângulo superior a 60°.

Modelos	Estimativa total de tempo de impressão	Estimativa de material	Estimativa de tempo de impressão do suporte
Modelo referência “W”	22 horas 21 min.	126 g	4 horas 09 min.
Modelo orientação “W”	19 horas 30 min.	113 g	2 horas 17 min.
Modelo referência “E”	22 horas 14 min.	127 g	4 horas 16 min.
Modelo orientação “E”	18 horas 13 min.	110 g	1 hora 48 min.
Modelo referência “N”	27 horas 35 min.	151 g	7 horas 59 min.
Modelo orientação “N”	21 horas 42 min.	123 g	4 horas 16 min.
Modelo referência “S”	24 horas 46 min.	141 g	6 horas 21 min.
Modelo orientação “S”	21 horas 04 min.	121 g	3 horas 35 min.

Fonte: Elaborada pela autora.

No geral, as soluções obtidas pela otimização topológica para os exemplos aqui discutidos atendem aos fundamentos do processo de otimização. Os resultados apresentam uma distribuição ideal de material, com base nas particularidades de cada problema. O algoritmo de otimização foi eficaz em identificar as regiões de alta e baixa densidade, em que as regiões de maior densidade, onde há presença de material, representam áreas de maior solicitação mecânica. Com a otimização, as regiões de baixa densidade são eliminadas, reduzindo o peso próprio da estrutura sem comprometer sua integridade e desempenho estrutural.

Além disso, é perceptível que a topologia resultante de cada exemplo apresenta um certo nível de complexidade em comparação com as topologias de estruturas já conhecidas. Isso dificulta a fabricação dessas peças por métodos tradicionais. Nesse sentido, a utilização do AMfilter durante o processo de otimização, apesar de revelar algumas limitações, como discutido anteriormente, evidencia a importância de considerar restrições da MA para alcançar soluções mais eficientes e econômicas do ponto de vista de fabricação. Embora o AMfilter não tenha alcançado as expectativas da eliminação completa da estrutura de suporte para os problemas de otimização abordados, permitiu a redução do seu uso, o que representa um resultado promissor para pesquisas futuras.

6 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo principal avaliar a técnica de otimização topológica em conjunto com o filtro de estrutura de suporte para manufatura aditiva, visando destacar os potenciais benefícios em termos de economia de material e tempo de produção. Neste sentido, foi utilizado um filtro pré-existente, conhecido como AMfilter. Esse filtro tem como proposta gerar soluções geometricamente compatíveis para a manufatura aditiva, removendo superfícies que excedem um ângulo máximo 45° , permitindo a impressão diretamente sem estruturas de suporte.

Nessa perspectiva, o método de otimização topológica baseado em densidade resultou em soluções condizentes com o esperado para esse tipo de abordagem, em que as topologias configuram a distribuição ideal de material com base no conjunto de restrições pré-definidas para o problema. Com a implementação do AMfilter, percebe-se que há pequenas alterações em suas topologias, de modo a favorecer não só a performance estrutural, mas também a viabilidade de fabricação sem a necessidade de estruturas de suporte.

No entanto, estas soluções não atenderam às expectativas da eliminação das estruturas de suporte adicionais, utilizadas durante o processo de fabricação da peça. Isso significa que, mesmo com as modificações das topologias em relação ao modelo de referência, estas não foram suficientes para alcançar o resultado esperado. Um dos pontos considerado para explicar esse resultado é a utilização do algoritmo de otimização OC para o desenvolvimento das soluções, o qual demonstrou ter desempenho inferior em comparação com alguns resultados obtidos por Langelaar (2016) com o algoritmo MMA, observação que o próprio autor também destacou em sua pesquisa.

A implementação do AMfilter torna o problema de otimização mais complexo e ainda mais custoso computacionalmente. Como resultado, o algoritmo de otimização OC necessita de uma redução do limite de movimento (parâmetro *move*) e de um número maior de iterações para encontrar a solução. Além disso, o OC exige valores mais altos para os parâmetros P e ε dos operadores s_{min} e s_{max} , o que pode introduzir erros numéricos devido à aproximação, principalmente para o parâmetro de precisão ε . Ademais, o uso do AMfilter resultou em soluções com dependência de malha e a presença em maior quantidade de densidades intermediárias, apesar das penalizações SIMP e do próprio AMfilter na saída do operador s_{max} .

Portanto, é prudente a realização de outros estudos com a avaliação da sensibilidade dos demais parâmetros envolvido no problema de otimização e o desenvolvimento de exemplos com diferentes restrições para compreender melhor a falta de alcance do resultado, investigando a influência do algoritmo OC na solução.

Contudo, a utilização do AMfilter resultou em uma redução no tempo estimando para a impressão de suporte, e conseqüentemente no consumo de material em comparação com modelo de referência. Essa redução é menos significativa nas simulações com ângulo um de 45° para a geração de suporte. Já nas simulações com ângulos superiores de 53° e 60° , o Exemplo 4 destacou-se, registrando uma média de redução de 42% e 48%, respectivamente. Por outro lado, o Exemplo 3 obteve a menor média de redução na geração de suporte, de 18% e 24%, para os respectivos ângulos de 53° e 60° .

Diante disso, é perceptível o quanto a topologia final impacta no consumo de material e na possibilidade de uso de estrutura de suporte. Além disso, ficou claro que as orientações de construção “N” e “S” foram as de menor eficiência econômica, independentemente do uso do AMfilter no processo de otimização para os exemplos estudados.

É importante destacar que, o AMfilter em sua proposta considera a aplicação para a tecnologia SLM, apesar de entender que a formulação matemática do problema de otimização não sofra alterações se for aplicado para outros tipos de tecnologia. Ainda assim, é interessante a simulação dos exemplos abordados em um *software* de fatiamento específico para a tecnologia SLM de modo a avaliar a possibilidade de mudanças nos resultados de simulação de impressão 3D.

Logo, este estudo destaca os benefícios potenciais da otimização topológica considerando restrições como a imposta pelo AMfilter, que apesar de não ter sido eficaz na eliminação das estruturas de suportes para os exemplos discutidos, conseguiu minimizar seu uso, resultando em uma economia significativa no tempo de impressão e no consumo de material. Além disso, essa abordagem favorece também na redução dos custos associados ao pós-processamento para remoção dos suportes, contribuindo para uma produção mais sustentável e econômica.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Explorar os exemplos discutidos utilizando o algoritmo de otimização MMA;
- Realizar novas simulações de impressão 3D, utilizando software de fatiamento para a tecnologia SLM, comparando os resultados com os encontrados nesta pesquisa;
- Explorar a possibilidade de usar o método da continuação com a penalização SIMP para limitar o surgimento de densidade intermediária;
- Analisar os exemplos discutidos utilizando o método da continuação para ajustar o parâmetro ξ_0 , que controla a penalização de densidades baixas na saída do smax;
- Realizar um estudo sobre a dependência de malha provocada pelo AMfilter.

REFERÊNCIAS

- ANDREASSEN, E.; CLAUSEN, A.; SCHEVENELS, M.; LAZAROV, B. S.; SIGMUND, O. Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code. **Struct Multidisc Optim**, vol. 43, p.1-16, 2010.
- ARORA, J. S. **Introduction to optimum design**. 4 ed., Elsevier, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO/ASTM 52900: Manufatura aditiva – Princípios gerais – Terminologias**. Rio de Janeiro, 2018.
- BENDSØE, M. P. Optimal shape design as a material distribution problem. **Structural Optimization**, vol. 1, p. 193-202, 1989.
- BENDSØE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 71, p. 197-224, 1988.
- BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. Material interpolation schemes in topology optimization. **Archive of Applied Mechanics**, vol. 69, p. 635-654, 1999.
- BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization: theory, methods and applications**. New York: Springer, 2003.
- BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P; CHRYSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. vol. 83. pg. 389–405. Springer, 2015.
- BOURDIN, B. Filters in topology optimization. *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*. vol. 50. pg. 2143-2158, 2001.
- BRUNS, T. E.; TORTORELLI, D. A. Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. vol. 190. pg. 3443-3459. Elsevier, 2001.
- CANEVAROLO JR; SEBASTIÃO, V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber editora, 2013.
- CANO-VICENT, A.; TAMB UWALA, M. M.; HASSAN, S. S.; BARH, D.; ALJABALI, A. A. A.; BIRKETT, M.; ARJUNAN, A.; SERRANO-AROCA, Á. Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. **Additive Manufacturing**, vol. 47, 2021.
- CARNEIRO, O. S.; SILVA, A. F.; GOMES, R. Fused deposition modeling with polypropylene. **Material & Design**, vol. 83, p. 768-776, 2015.
- CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. **An introduction to structural optimization**. 1 ed., vol. 153. New York: Springer, 2009.

DÍAZ, A.; SIGMUND, O. Checkerboard patterns in layout optimization. **Structural Optimization**, vol. 10, p. 40-45, 1995.

DIEGEL, O. Design for AM. *In*: GODEC, D.; GONZALES-GUTIERREZ, J.; NORDIN, A.; PEI, E.; ALCÁZAR, U. J. (Org.). **A guide to additive manufacturing**. p. 75-117. Cham: Springer, 2022.

DUDESCU, C.; RACZ, L. Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed materials. **Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series**, vol. 69, n. 1, p. 23-30, 2017.

EOS. **Antenna bracket for RUAG's Sentinel Satellite – Certified for Deployment in Outer Space**. 2023. Disponível em: <https://www.eos.info/en/innovations/all-3d-printing-applications/aerospace/aerospace-case-studies/ruag-aerospace-3d-printed-satellite-components>. Acesso em: 09 jul. 2023.

FABHEADS. **Additive manufacturing**: revolutionizing industries around the world. [Imagem]. 2019. JPEG. Disponível em: <https://fabheads.com/blogs/additive-manufacturing-revolutionizing-industries/>. Acesso em: 20 abr. 2023. JPGE. Disponível em: <https://formlabs.com/eu/blog/topology-optimization/>. Acesso em: 10 out. 2023.

FIGUEIREDO, M. Estrutura de suporte à manufatura aditiva: por que são importantes e como projetar para elas. Disponível em: <https://www.manufaturadigital.com/estruturas-de-suporte-manufatura-aditiva/>. Acesso em: 09 fev. 2024.

FORMLABS. Topology optimization 101: how to use algorithmic models to create lightweight design. [Imagem]. 2023

GARAIGORDOBIL, A.; ANSOLA, R.; VEGUERÍA, E.; FERNANDEZ, I. Overhang constraint for topology optimization of self-supported compliant mechanisms considering additive manufacturing. **Computer-Aided Design**, vol. 109. p. 33-48. Elsevier, 2019.

GARRIDO, N. **Centro Nacional de Convenções Qatar**. 2011. Fotografia. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-149285/centro-nacional-de-convencoes-qatar-slash-arata-isozaki>. Acesso em: 10 out. 2023.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies**: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2 ed. New York: Springer, 2015.

GODEC, D.; PILIPOVIĆ, A.; BRESKI, T.; URENA, J.; JORDÁ, O.; MARTÍNEZ, M.; GONZALES-GUTIERREZ, J.; SCHUSCHNIGG, J. R. B.; PORTOLÉS, L. Introduction to additive manufacturing. *In*: GODEC, D.; GONZALES-GUTIERREZ, J.; NORDIN, A.; PEI, E.; ALCÁZAR, U. J. (Org.). **A guide to additive manufacturing**. p. 1-43. Cham: Springer, 2022.

GÖKDAG, I.; ACAR, E. Simultaneous optimization of topology and process parameters for laser-powder bed fusion additive manufacturing. **Structural and Multidisciplinary Optimization**. Springer, 2023.

HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. **Elements of structural Optimization**. 3 ed. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992.

HASSANI, B.; HINTON, E. A review of homogenization and topology optimization III – topology optimization using optimality criteria. **Computers & Structures**. vol. 69, p.739-756, 1998.

IQBAL, T.; WANG, L. LI, D.; DONG, E.; FAN, H.; FU, J. A general multi-objective topology optimization methodology developed for customized design of pelvic prostheses. **Medical Engineering and Physics**, vol. 69, p. 8-16, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333885719_A_general_multi-objective_topology_optimization_methodology_developed_for_customized_design_of_pelvic_prostheses. Acesso em: 10 out. 2023. Figura 4: Topology-optimized extracted surfaces, Optimized implants and virtual assemblies with topology-optimized implants.

JIANG, J.; XU, X.; STRINGER, J. Support structures for additive manufacturing: A review. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**. vol. 2, p. 01-23, 2018.

JOG, C. S.; HABER, R.B. Stability of finite element models for distributed-parameter optimization and topology design. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 130, p.203-226, 1996.

KOTUCHA, G.; HACKL, K. Numerical instabilities in structural optimization – analogy between topology & shape design problems. **Proceeding in Applied Mathematics and Mechanics (PAMM)**, vol. 06, p. 229-230, 2007.

KUMAR, M. B.; SATHIYA, P. Methods and materials for additive manufacturing: a critical review on advancements and challenges. *In*: SILVESTE, N. (Org.). **Thin-Walled Structures**, vol. 187. Elsevier, 2020.

LANGELAAR, M. An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs. **Struct Multidisc Optim**, vol. 55. p. 871–883. Springer, 2016.

LANGELAAR, M. Combined optimization of part topology, support structure layout and build orientation for additive manufacturing. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, vol. 57. p. 1985–2004. Springer, 2018.

MORANDINI, M. M.; DEL VECHIO, G. H. Impressão 3D, tipos e possibilidades: uma revisão de suas características, processo, usos e tendências. **Interface Tecnológica**, vol. 17, p. 67-77, 2020.

MORGAN, H. D.; CHERRY, J. A.; JONNALAGADDA, S.; EWING, D.; SIENZ, J. Part orientation optimization for the additive layer manufacture of metal components. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 86. p. 1679-1687. Springer, 2016.

NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. **Numerical optimization**. 2 ed., New York: Springer, 2006

NORDIN, A.; KRISTAV, P.; ALCÁZAR, J. U.; BLASCO, J. R.; FERRANDO, O. J.; MARTÍNEZ, M.; PORTOLÉS, L.; MORELL, B. V. General process simulations. *In*:

GODEC, D.; GONZALES-GUTIERREZ, J.; NORDIN, A.; PEI, E.; ALCÁZAR, U. J. (Org.). **A guide to additive manufacturing**. p. 119-148. Cham: Springer, 2022.

PHATAK, A. M.; PANDE, S. S. Optimum part orientation in rapid prototyping using genetic algorithm. **Journal of Manufacturing Systems**, vol. 31, p. 395-402, 2012.

PRAKASH, K. S.; NANCHARAIH, T.; SUBBA RAO, V.V. Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. **Materials Today: Proceedings**, vol. 5, n. 2, p. 3873-3882, 2018.

PTC. Sobre o formato de manufatura 3D – 3MF. Disponível em: https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r9.0/portuguese_br/index.html#page/data_exchange/interface/About_the_3MF_format.html. Acesso em: 26 jul. 2023.

RANJAN, R.; CHEN, Z.; AYAS, C.; LANGELAAR, M.; VAN KEULEN, F. Overheating control in additive manufacturing using a 3D topology optimization method and experimental validation. **Additive Manufacturing**, vol 61. 2023.

REMOUCHAMPS, A.; BRUYNEEL, M.; FLEURY, C.; GRIHON, S. Application of a bi-level scheme including topology optimization to the design of an aircraft pylon. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, vol. 44. p. 739–750. Springer, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-011-0682-3>. Acesso em: 10 out. 2023.
Figura 1: The aircraft pylon to be designed with topology optimization e Figura 3b: Result for the constraints on the displacements ($vlc = 2$) with $p = 2$.

SAADLAOUI, Y.; MILAN, J. L.; ROSSI, J. M.; CHABRAND, P. Topology optimization and additive manufacturing: comparison of conception methods using industrial codes. **Journal of Manufacturing Systems**, vol. 43, p. 178-186, 2017.

SIGMUND, O. A 99 line topology optimization code written in Matlab. **Struct Multidisc Optim**, vol. 21, p. 120-127, 2001.

SIGMUND, O.; MAUTE, K. Topology optimization approaches. **Struct Multidisc Optim**, vol. 48, p. 1031-1055, 2013.

SIGMUND, O.; PERTERSSON, J. Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. **Structural Optimization**, vol. 16, p. 68-75, 1998.

SVANBERG, K. The method of moving asymptotes – a new method for structural optimization. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, vol. 24, p. 359-373, 1987.

VECTOR MAGIC. O que são imagens vetorizadas. Disponível em: https://pt.vectormagic.com/support/understanding_vector_images. Acesso em: 10 abr. 2024.

VELOSO, V. Análise da influência de diferentes padrões de preenchimento sobre o comportamento estrutural em diferentes corpos de prova fabricados a partir de técnicas de manufatura aditiva. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUFATURA ADITIVA – I CBMAdi, 2020. **Anais [...]**. 2020.

VOLPATO, N. Processos de AM por extrusão de material. *In: VOLPATO, N. (Org.). Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. p. 145-175. São Paulo: Blucher, 2017.

VOLPATO, N.; SILVA, J. V. L. da. Planejamento de processo para tecnologia de AM. *In: VOLPATO, N. (Org.). Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. p. 15-29. São Paulo: Blucher, 2017.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. de. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. *In: VOLPATO, N. (Org.). Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. p. 15-29. São Paulo: Blucher, 2017.

XU, S.; CAI, Y.; CHENG, G. Volume preserving nonlinear density filter based on heaviside functions. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, vol. 41. p. 495-505. Springer, 2010.

ZEGARD, T. PAULINO, G. H. Bridging topology optimization and additive manufacturing. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, vol. 53. p. 175-192. Verlag Berlin Heidelberg, Springer, 2015.

ZHOU, Y.; LU, H.; REN, Q.; LI, Y. Generation of a tree-like support structure for fused deposition modelling based on the L-system and an octree. **Graphical Models**, vol. 101. p. 8- 16. Elsevier, 2019.

ZHOU, M.; ROZVANY, G. I. N. The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 89, n. 1-3, p. 309-336, 1991.

ZHU, J.; ZHOU, H.; WANG, C.; ZHOU, L.; YUAN, S.; ZHANG, W. A review of topology optimization for additive manufacturing: status and challenges. **Chinese Journal of Aeronautics**. vol. 34. n. 1. p. 91–110. Elsevier, 2021.

3DCRIAR. UltiMaker Cura: a ferramenta essencial para a impressão 3D de sucesso. 2023. Disponível em: <https://3dcriar.com.br/ultimaker-cura-para-impressao-3d-de-sucesso/>. Acesso em: 03 abr. 2024.

3DLAB. 8 formas de aumentar a velocidade da impressão 3D sem perder qualidade. 2023. Disponível em: <https://3dlab.com.br/aumentar-a-velocidade-da-impressao-3d/>. Acesso em: 23 abr. 2024.

APÊNDICE A – PROTÓTIPO DA VIGA MBB

No decorrer desta pesquisa, um protótipo da viga MBB foi impresso inicialmente como uma avaliação da metodologia adotada, conforme Figura 64. O protótipo foi impresso na posição horizontal em relação à placa de base, eliminando a necessidade de usar material de suporte adicional para a fabricação do modelo. Suas dimensões são 16 cm de comprimento, 6 cm de largura e 0,9 mm de espessura, e levou aproximadamente 1 hora para ser impressa.

Durante o processo de preparação para impressão deste protótipo, foram identificados os desafios a serem sanados para alcançar o objetivo geral deste estudo, que é avaliar a utilização da otimização topológica em conjunto com o filtro de estrutura de suporte para manufatura aditiva, destacando os potenciais benefícios em termos de economia de material e tempo de produção. Foi observado que além do processo de conversão do arquivo de imagem para um formato STL, é necessário realizar um tratamento prévio na imagem (suavização) para eliminar a irregularidade no contorno da imagem, resultante do processo de otimização topológica.

Figura 64 – Modelo da viga impresso.



Fonte: Elaborada pela autora.

Além disso, proporcionou uma compreensão geral do processo de impressão, incluindo as configurações de impressão como: preenchimento interno, espessura da camada, altura da camada, velocidade de impressão, temperatura, material de filamento, angulação para geração de estrutura de suporte, e o tamanho final da peça. Esses fatores impactam tanto no tempo de impressão quanto no consumo de material, sendo essencial para uma comparação precisa entre os modelos simulados.