

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**BRENDA MELLO GOUVEIA
KAYKY CASSIANO MONTEIRO
MARIANA RICELLI VILELA DA SILVA**

**APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA EM
COMPONENTES ESTRUTURAIS AERONÁUTICOS E SEUS
IMPACTOS NO PROCESSO DE USINAGEM**

São José dos Campos
2026

**BRENDA MELLO GOUVEIA
KAYKY CASSIANO MONTEIRO
MARIANA RICELLI VILELA DA SILVA**

**APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA EM
COMPONENTES ESTRUTURAIS AERONÁUTICOS E SEUS
IMPACTOS NO PROCESSO DE USINAGEM**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.

**Orientador Interno: Me. Lucas Giovanetti
Orientador Externo: Raphael Martins de Oliveira**

São José dos Campos
2026

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal
Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação

Gouveia, Brenda Mello Gouveia

Aplicação da Otimização Topológica em Componentes Estruturais Aeronáuticos e seus Impactos no Processo de Usinagem. / Brenda Mello Gouveia, Kayky Cassiano Monteiro, Mariana Ricelli Vilela da Silva – São José dos Campos, 2026.

107 f. (Número total de folhas do TG)

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projeto de Estruturas Aeronáuticas. Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2026.

Orientador Interno ou Principal: Me. Lucas Giovanetti.

Orientador Externo ou Coorientador: Raphael Martins de Oliveira.

1. Otimização Topológica. 2. Usinagem. 3. Design for Manufacturing (DFM). I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GOUVEIA, B. M; MONTEIRO K. C; SILVA, M. R. V. **Aplicação da Otimização Topológica em Componentes Estruturais Aeronáuticos e seus Impactos no Processo de Usinagem**. 2026. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Projeto de Estruturas Aeronáuticas) - Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos “Professor Jessen Vidal”, São José dos Campos, 2026.

**BRENDA MELLO GOUVEIA
KAYKY CASSIANO MONTEIRO
MARIANA RICELLI VILELA DA SILVA**

**APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA EM
COMPONENTES ESTRUTURAIS AERONÁUTICOS E SEUS
IMPACTOS NO PROCESSO DE USINAGEM**

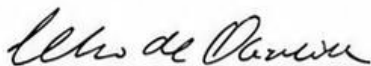
Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.



Me. Lucas Giovanetti – FATEC “Prof. Jessen Vidal”



Raphael Martins de Oliveira – SENAI “Santos Dumont”



Me. Celso de Oliveira - FATEC “Prof. Jessen Vidal”



Me. Fabiana Eloisa Passador - FATEC “Prof. Jessen Vidal”

15 / 06 / 26
DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao nosso orientador, Prof. Me. Lucas Giovanetti, e ao nosso coorientador, Prof. Raphael Martins de Oliveira, pela orientação e coorientação, paciência e pelos conhecimentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do curso de Projeto de Estruturas Aeronáuticas da Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos “Prof. Jessen Vidal”, pelos ensinamentos e contribuições para nossa formação acadêmica e profissional.

Aos colegas e amigos pelo apoio, companheirismo e pelas contribuições diretas e indiretas para a realização deste trabalho.

Aos nossos familiares, pelo apoio, compreensão e incentivo ao longo dos estudos acadêmicos, especialmente nos momentos de maior dificuldade.

Por fim, agradecemos a todos que, de alguma forma, colaboraram para o nosso crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

A otimização topológica é um método matemático e computacional que determina a distribuição ideal de material dentro de um domínio de projeto. Apesar de gerar soluções ótimas e contribuir para o desempenho das peças, o método fornece geometrias complexas não econômicas, práticas e adequadas para a manufatura subtrativa. Com o avanço da tecnologia, as técnicas de manufatura aditiva (MA) permitiram a produção de peças com geometrias complexas. No entanto, setores como o aeroespacial e o automotivo exigem alta precisão dimensional e acabamento superficial elevado, fatores que a MA não atende completamente. Por esse motivo, essas indústrias ainda preferem e utilizam processos de fabricação como a usinagem em muito maior grau. O objetivo geral e principal desse trabalho é analisar os impactos da otimização topológica no processo de usinagem de componentes estruturais aeronáuticos, buscando integrar o desempenho estrutural com a viabilidade produtiva. O trabalho parte da aplicação da otimização topológica (OT) em um componente do setor aeronáutico, submetendo a geometria resultante ao processo de usinagem. Após a identificação de dificuldades durante a usinagem desse componente otimizado, utilizou-se a metodologia *Design for Manufacturing* (DFM), com o objetivo de melhorar a geometria do componente e favorecer sua usinabilidade. Em seguida, submeteu-se o componente modificado novamente à usinagem, permitindo a comparação entre as duas geometrias (otimizadas e com DFM) e a avaliação da importância da aplicação do *design* para manufatura. Os resultados obtidos demonstraram que, embora a peça otimizada tenha apresentado aceitáveis desempenho mecânico dentro do foco central de análise, sua geometria não se mostrou adequada para os processos de manufatura subtrativa. Por outro lado, o modelo com aplicação do *Design for Manufacturing* (DFM) apresentou resultados estruturais bons, tendo em vista o contexto submetido e obteve relevante performance na manufatura do componente. Dessa forma, confirmou-se a importância da aplicação dos conceitos de DFM no desenvolvimento de peças otimizadas, visando maior viabilidade de fabricação.

Palavras-Chave: Otimização Topológica; Usinagem; *Design For Manufacturing* (DFM).

ABSTRACT

Topological optimization is a mathematical and computational method that determines the optimal distribution of material within a design domain. Although it generates optimal solutions and contributes to part performance, the method produces complex geometries that are neither cost-effective, practical, nor suitable for subtractive manufacturing. With advances in technology, additive manufacturing (AM) techniques have enabled the production of parts with complex geometries. However, sectors such as aerospace and automotive require high dimensional accuracy and superior surface finish, factors that AM does not fully achieve. For this reason, these industries still prefer and utilize manufacturing processes such as machining to a much greater extent. The overall and primary objective of this study is to analyze the impacts of topological optimization on the machining process of aerospace structural components, aiming to integrate structural performance with manufacturing feasibility. The study begins with the application of topological optimization (TO) to a component in the aerospace sector, subjecting the resulting geometry to the machining process. After identifying difficulties during the machining of the optimized component, the Design for Manufacturing (DFM) methodology was used to improve the component's geometry and enhance its machinability. The modified component was then subjected to machining again, allowing for a comparison between the two geometries (optimized and DFM-modified) and an assessment of the importance of applying Design for Manufacturing. The results showed that, although the optimized part exhibited acceptable mechanical performance within the central focus of the analysis, its geometry was not suitable for subtractive manufacturing processes. On the other hand, the model incorporating Design for Manufacturing (DFM) principles yielded good structural results given the specific context and demonstrated significant performance in the component's manufacturing. Thus, the importance of applying DFM concepts in the development of optimized parts was confirmed, with the aim of achieving greater manufacturability.

Keywords: Topological optimization; Machining; Design for Manufacturing (DFM).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes tipos de elementos finitos	21
Figura 2. Três categorias de otimização estrutural. a) Otimização paramétrica, b) Otimização da forma e c) Otimização da topologia. Os problemas iniciais são apresentados no lado esquerdo e as soluções ótimas são apresentadas no lado direito	22
Figura 3. Procedimento de projeto de otimização topológica	27
Figura 4. Classificação dos processos de fabricação	29
Figura 5. Operações de fresagem	31
Figura 6. Fresamento concordante e fresamento discordante	32
Figura 7. Classificação dos dois tipos de fresamento: (a) fresamento periférico e (b) fresamento frontal	33
Figura 8. Parâmetros de corte no fresamento (a) velocidade de corte; (b) velocidade de avanço; (c) profundidade de corte	33
Figura 9. Centro de usinagem de fuso vertical	35
Figura 10. Modelo 3D da peça e demonstração da sua localização	41
Figura 11. Preenchimento da peça indicado pela cor verde na figura	42
Figura 12. Força aplicadas na peça para análise	44
Figura 13. Configurações de entrada do software	45
Figura 14. Seleção do parâmetro de fidelidade no software	45
Figura 15. Fluxo de operações de reconstrução superficial	47
Figura 16. Fluxo otimizado das análises geométricas	49
Figura 17. Máquina CNC utilizada para programação CAM do modelo utilizado	50
Figura 18. Definição do Setup, matéria-prima e orelhas de fixação	51
Figura 19. Sistemas de fixação, sistemas de coordenadas e configuração final de setup	51
Figura 20. Elementos presentes no ambiente de usinagem após gerenciamento	52
Figura 21. Fluxo de programação do modelo otimizado	53
Figura 22. Menu otimizado do módulo de programação e operações utilizadas	53
Figura 23. Fluxo da criação do recurso “Frame como vista”	54

Figura 24. Limitação por curvas através da criação de sketch 2D	55
Figura 25. Limitação das regiões de usinagem	55
Figura 26. Janela de criação do recurso “Gerenciador de ferramentas” do software	56
Figura 27. Análise preliminar da projeção global do componente otimizado	57
Figura 28. Projeção das arestas e configuração final do sketch	58
Figura 29. Menu do software para construção do modelo DFM	59
Figura 30. Seleção das análises de normais, continuidade e tipos de faces	60
Figura 31. Operação de usinagem adicional após DFM	61
Figura 32. Criação de frame após DFM	61
Figura 33. Geometria obtida para cada modelo com níveis de fidelidade (Standard, Aggressive e Extreme)	63
Figura 34. Diferenças entre os modelos otimizados	64
Figura 35. Modelo Extreme	65
Figura 36. Região com maior concentração de tensão do modelo escolhido	67
Figura 37 – Diferença na trajetória programada	68
Figura 38 – Comportamento das normais em relação a uma direção	69
Figura 39 – Comportamento global das normais distribuídas na superfície da peça	69
Figura 40. Valores obtidos nas análises de continuidades	70
Figura 41. Faces predominantes no modelo otimizado	71
Figura 42. Estratégias de usinagem utilizadas	73
Figura 43. Configuração da ferramenta	74
Figura 44. <i>Frames</i> criados para indexações	75
Figura 45. Recursos utilizados	76
Figura 46. Caminhos de usinagem adaptados	77
Figura 47. Caminhos obtidos na programação e condições periféricas	78
Figura 48. Regiões críticas de difícil acesso	79
Figura 49. Quantidade de <i>frames</i> , <i>sketches</i> e superfícies auxiliares	80
Figura 50. Principais dificuldades encontradas no desenvolvimento da peça	81

Figura 51. Geometria do componente após a aplicação do DFM	82
Figura 52. Comparação entre o modelo otimizado e o modelo com a aplicação do DFM	83
Figura 53. Aplicação de raios nas regiões dos furos no modelo DFM	84
Figura 54. Comportamento das normais em relação a uma direção	86
Figura 55. Comportamento global de normais distribuídas na superfície da peça	86
Figura 56. Valores obtidos nas análises de continuidade de arestas e tangências	87
Figura 57. Tipos de faces do modelo DFM	88
Figura 58. Forma do material nas etapas de programação	89
Figura 59. Configuração ferramental em relação à peça	90
Figura 60. Nova perspectiva de <i>frames</i>	91
Figura 61. Região única e recursos auxiliares	92
Figura 62. Trajeto global de programação do modelo DFM	93
Figura 63. Aspecto encontrado durante o processo de fabricação	95
Figura 64. Evolução e comparação dos modelos estudados	96
Figura 65. Comparação pré-CAM	98
Figura 66. Comparação global CAM	99
Figura 67. Comparação das trajetórias	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros obtidos no modelo original	62
Tabela 2. Parâmetros obtidos em cada modelo de fidelidade	64
Tabela 3. Parâmetros obtidos em cada modelo de fidelidade após a reconstrução geométrica ..	65
Tabela 4. Parâmetros obtidos na análise estrutural no modelo DFM	83
Tabela 5. Resultados das análises estruturais do modelo original, otimizado e DFM	97
Tabela 6. Comparação quantitativa dos dados de programação entre OT e DFM	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Aluminum Association
BESO	Bidirectional Evolutionary Structural Optimization
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CFRPs	Carbon Fiber Reinforced Polymers
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DFM	Design for Manufacturing
ESO	Evolutionary Structural Optimization
FEA	Finite Element Analysis
FOS	Factor of Safety
GB	Gigabyte
MEF	Método dos Elementos Finitos
NURBS	Non-Uniform Rational Basis Splines
OT	Otimização Topológica
PDM	Product Data Management
RAM	Random Access Memory
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SUBD	Modelagem de Subdivisões
TSA	Topological Sensitivity Analysis
WCS	Work Coordinate System
2D	Bidimensional (duas dimensões)
3D	Tridimensional (três dimensões)

LISTAS DE SÍMBOLOS

A_p	Profundidade de corte
E_e	Módulo de elasticidade do elemento
E_o	Módulo de elasticidade do material
p	Fator de penalização
V_c	Velocidade de corte
V_f	Velocidade de avanço
X_e	Densidade do elemento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos Gerais	18
1.2. Objetivos Específicos	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. Componentes Aeronáuticos	19
2.1.1. Materiais	19
2.1.2. Integridade Estrutural	20
2.2. Métodos de Elementos Finitos	20
2.3. Otimização Estrutural	22
2.3.1. Métodos de Otimização Estrutural	22
2.3.1.1. Otimização Paramétrica	23
2.3.1.2. Otimização de Forma	23
2.3.1.3. Otimização Topológica	23
2.4. Otimização Topológica	24
2.4.1. Definição	24
2.4.2. Métodos	24
2.4.2.1. Método Utilizado	25
2.4.3. Processo Computacional	26
2.4.4. Geometrias e Limitações	27
2.5. Usinagem	28
2.5.1. Fresagem	30
2.5.1.1. Parâmetros de Corte	33
2.5.2. Centros de Usinagem	34
2.5.2.1. Usinagem 5 Eixos	35
2.6. Usinagem aplicada a potenciais efeitos da otimização topológica	36
2.6.1. Acessibilidade ferramental em superfícies complexas	36
2.6.2. Rigidez da peça e seu impacto em vibrações e forças de cortes	37
2.6.3. Pós-processamento e estratégias CAM avançadas para superfícies complexas	38
2.6.4. Variação da velocidade de corte e estratégias de gerenciamento de contato em fresas esféricas	39
2.7. Design for Manufacturing (DFM)	39
2.7.1. A Necessidade do DFM em Geometrias Otimizadas	40
3. MÉTODOS	41
3.1. Peça Utilizada	41
3.2. Otimização Topológica	42
3.2.1. Condições de contorno e preservação das regiões	42
3.2.2. Configurações de simulação	44
3.2.3. Processo de reconstrução de superfície	46
3.3. Usinagem do Modelo Otimizado	48
3.3.1. Análises Geométricas Preliminares para Programação CAM	48
3.3.2. Programação CAM do Modelo Utilizado	49
3.3.3. Contextualização da Máquina CNC Utilizada	49
3.3.4. Definição do <i>Setup</i> no Ambiente CAM e Método de Fixação da Peça	50
3.3.5. Estratégias de Usinagem e Programação CAM	52

3.3.6. Operações Seleccionadas para Programação do Modelo Otimizado	53
3.3.7. Métodos de Indexação, Orientação de Ferramenta e Limitação de Regiões	54
3.4. Aplicação da Metodologia Desing For Manufacturing ao Modelo Otimizado e Análise Estrutural Preliminar	57
3.5. Avaliações Geométricas Preliminares para Programação CAM após o DFM	59
3.6. Programação CAM do Componente Após DFM	60
3.6.1. Métodos de Indexação, Orientação de Ferramenta e Limitação Após DFM	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1. Análise Estrutural da Peça Original	62
4.2. Análise Estrutural e Reconstrução Geométrica (OT)	62
4.3. Análises Geométricas Pré-CAM do Modelo Otimizado	67
4.3.1. Análise da Fragmentação Superficial em Trajetórias de Programação CAM	67
4.3.2. Análises de Normais Superficiais	68
4.3.3. Análises de Continuidade de Arestas e Tangência Superficial	70
4.3.4. Análise do Tipo de Face	71
4.4. Resultados da Programação CAM do Modelo Otimizado	72
4.4.1. Operações de Usinagem Seleccionadas	72
4.4.2. Acessibilidade Ferramental	74
4.4.3. Controle de Orientação e Indexação Ferramental	75
4.4.4. Comportamento Global das Trajetórias de Usinagem	77
4.4.5. Limitações Operacionais Identificadas	79
4.5. Aplicação do DFM	82
4.6. Análises Geométricas Pré-CAM do Modelo DFM	85
4.6.1. Análise da Fragmentação Superficial em Trajetórias de Programação CAM	85
4.6.2. Análises de Normais Superficiais	85
4.6.3. Análises de Continuidade de Arestas e Tangência Superficial	87
4.6.4. Análise do Tipo de Face	88
4.7. Programação CAM Após Aplicação da Metodologia de DFM	88
4.7.1. Etapas da Programação CAM	89
4.7.2. Acessibilidade Ferramental Posterior a Aplicação de Critérios de DFM	90
4.7.3. Controle de Orientação e Indexação Ferramental Após DFM	91
4.7.4. Comportamento Global das Trajetórias Posteriormente ao DFM	93
4.7.5. Limitações Operacionais Identificadas	95
4.8. Comparação Final	96
4.8.1. Comparação Geométrica e Estrutural	96
4.8.2. Comparação Geométrica Pré-CAM	97
4.8.3. Comparação CAM Geral	98
4.8.4. Comportamento de Trajetórias	100
5. CONCLUSÃO	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

1. INTRODUÇÃO

A redução de peso no setor aeronáutico e aeroespacial é uma busca constante por eficiência e desempenho. A redução de peso estrutural impacta diretamente o consumo de combustível, a carga útil, e a vida útil dos componentes. Cada quilograma a menos representa uma melhoria nas propriedades mecânicas e na eficiência, assim como na redução dos custos operacionais. Por esse motivo, a engenharia, impulsiona avanços em materiais, processos de fabricação e métodos de execução de projetos (POLL, 2014).

A evolução dos materiais e das técnicas de projeto levou a uma nova era de otimização. Surgiram ligas especiais de alumínio e titânio, além do uso crescente de materiais compósitos. A década de 1980 marcou o início do uso de CFRPs (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*), kevlar e fibra de vidro na fuselagem e nas estruturas primárias em aeronaves, permitindo a redução de 20 a 30 % da massa sem a perda de rigidez. Essa redução de peso resultou em uma economia de combustível de 20 a 22% (SHEN et al., 2025; CALLISTER, 2020).

Apesar dos avanços na engenharia de materiais, a busca constante por estruturas mais leves e resistentes não terminou. Nesse caso, surgiram novas tecnologias de manufatura como a fabricação aditiva, além da engenharia computacional e a simulação numérica que abriram caminho para abordagens mais avançadas, como a otimização estrutural e, em especial, a otimização topológica (SHEN et al., 2025).

Os métodos de otimização topológica tornaram-se amplamente utilizados no projeto estrutural após os estudos fundamentais de Bendsoe e Kikuchi (1988), que estabeleceram as bases teóricas da técnica. Nesse contexto, a otimização topológica consiste em uma ferramenta de *design* voltada à obtenção de estruturas de alto desempenho, capaz de determinar a melhor configuração do material dentro de um domínio de *design*, considerando as condições de carga, fronteiras e restrições físicas e geométricas do problema (GUO et al., 2025).

A otimização topológica possibilita o desenvolvimento de produtos leves e de elevada rigidez, promovendo simultaneamente a redução de massa, custos e consumo de energia, sendo amplamente aplicada em setores como o aeronáutico, automotivo, naval e biomédico, onde a redução de massa e o aumento da eficiência mecânica são fatores determinantes (PAN et al., 2025).

No segmento aeronáutico, restrições severas são exigidas e aplicadas a cada peça, visando garantir a qualidade superficial, o dimensionamento e as posições das formas (IBHADODE et al., 2024). Apesar da otimização topológica ser considerada uma atividade de alta relevância no desenvolvimento de peças aeronáuticas, os modelos resultantes

frequentemente apresentam geometrias complexas, em destaque as superfícies orgânicas, que dificultam diretamente o processo de usinagem (GUO et al., 2025; BACCIAGLIA et al., 2021).

Esses desafios persistem mesmo diante do grande avanço tecnológico das máquinas que possuem 5 eixos ou mais, dos fundamentos voltados à usinagem de alta complexidade e do uso de tecnologias versáteis de ferramentas (GUO et al., 2025).

Nesse contexto, a usinagem de superfícies esculpidas e geometrias complexas apresenta variações significativas de rugosidade superficial e limitações de acessibilidade, dificultando o controle dimensional e a qualidade do acabamento (BAPTISTA; SIMÕES, 2000). Somam-se a isso as variações das forças de corte que ocorrem durante a usinagem em função da geometria da ferramenta e das condições de corte, influenciando diretamente a estabilidade do processo e a precisão dimensional (RADU; SCHNAKOVSKY, 2024). Fatores térmicos e mecânicos agravam ainda mais esse cenário, gerando tensões residuais, alterações microestruturais e variações de rugosidade que comprometem o desempenho funcional e a integridade superficial das peças (SAOUBI et al., 2008). Esses desafios tornam-se ainda mais relevantes quando se considera a aplicação de técnicas de otimização topológica, cujas geometrias resultantes (complexas e orgânicas) exigem um maior controle dos parâmetros de usinagem e das estratégias de fabricação para garantir a integridade estrutural e dimensional dos componentes.

Diante desse cenário, a integração entre o projeto estrutural e a manufatura surge como um fator estratégico para alinhar as soluções geradas por modelos computacionais às restrições práticas do chão de fábrica, promovendo maior eficiência produtiva, redução de custos, diminuição de retrabalhos e melhor aproveitamento de materiais (LIU; MA, 2015). Além de contribuir para a viabilidade econômica do processo, essa integração fortalece a inovação tecnológica no setor, viabilizando estruturas simultaneamente leves, resistentes e fabricáveis, que atendem aos rigorosos requisitos de segurança e desempenho da indústria aeronáutica (SIGMUND, 2009).

Assim, o presente trabalho busca conciliar os resultados obtidos pela otimização topológica com a viabilidade produtiva da usinagem, demonstrando que a utilização do *design* voltado para manufatura não compromete o desempenho estrutural, mas aproxima o projeto da realidade industrial.

1.1. Objetivo Geral

Analisar os impactos da aplicação da otimização topológica no processo de usinagem de componentes estruturais aeronáuticos, buscando integrar o desempenho estrutural obtido em projeto com a viabilidade produtiva na manufatura.

1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que nortearam a realização deste trabalho de graduação foram os seguintes:

- Investigar os fundamentos teóricos e computacionais da otimização topológica aplicada ao projeto de estruturas aeronáuticas;
- Modelar e simular componentes estruturais para avaliar o desempenho mecânico de diferentes configurações otimizadas;
- Identificar e analisar as principais limitações de usinagem associadas às geometrias geradas pela otimização topológica, considerando aspectos como fixação, acesso de ferramenta e estratégias de usinagem;
- Comparar o desempenho estrutural e a viabilidade de fabricação entre modelos convencionais e modelos otimizados topologicamente;
- Propor diretrizes de integração entre projeto e manufatura, visando melhorar a aplicabilidade prática da otimização topológica na indústria aeronáutica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Componentes Aeronáuticos

A evolução das geometrias dos componentes aeronáuticos está diretamente associada ao avanço histórico da engenharia aeronáutica e entrega uma cadeia de evolução e versatilidade contra os obstáculos enfrentados que foram de suma importância para que eficiência aerodinâmica na aviação se apresente como a conhecemos hoje.

Atualmente a maneira mais eficaz de aumentar a eficiência energética e reduzir o consumo de combustível é reduzir a massa da aeronave, pois uma massa menor requer menos força de sustentação e empuxo durante o voo (POLL, 2014).

Cada peça da aeronave é projetada a partir de geometrias específicas que atendem simultaneamente a requisitos de rigidez, resistência, estabilidade, redução de peso e facilidade de fabricação. Para cada processo, as limitações e a aplicabilidade são traduzidas em restrições para a geometria da peça (ZHU et al., 2018). A fuselagem compõe estruturas primárias e secundárias, como longarinas, vigas, *frames*, nervuras e painéis de revestimento, a definição geométrica está diretamente relacionada à distribuição das cargas atuantes, à redução de tensões concentradas e ao comportamento da fuselagem em voo. Já nos componentes secundários, como suportes, ferragens, conectores e *brackets*, a geometria é ditada principalmente por funções de fixação, transferência de esforço e integração com outros sistemas (MATTHEWS, 1998).

2.1.1. Materiais

Em aplicações aeroespaciais, a seleção de materiais é uma das atividades importantes no projeto e fabricação de componentes. A seleção de materiais na indústria é orientada pela busca simultânea por elevada resistência mecânica, baixo peso específico, boa tolerância a fadiga, resistência à corrosão e estabilidade dimensional sob diferentes condições de carregamento, e temperatura, para atender a esses requisitos, os componentes estruturais das aeronaves são fabricados majoritariamente a partir de ligas metálicas de alumínio e titânio, materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras e, em regiões específicas, aços de alta resistência (ZHU et al., 2018).

As ligas de alumínio constituem um grupo de materiais leves amplamente empregados em aplicações estruturais devido à sua baixa densidade e elevada resistência à corrosão e à oxidação. Além disso, apresentam boa condutividade térmica e elétrica, custo relativamente

reduzido e propriedades funcionais favoráveis, como alta refletividade, ductilidade e resistência mecânica (ASKELAND; WRIGHT, 2019).

Dada a grande variedade de ligas de alumínio e seus respectivos tratamentos térmicos, tornou-se necessário organizar esse conhecimento em classificações técnicas. A mais amplamente utilizada no mundo é a desenvolvida pela *Aluminum Association* (AA), que agrupa o alumínio e suas ligas a partir de três critérios fundamentais: o processo de fabricação, a têmpera e a composição química. No Brasil, essa lógica foi incorporada pela norma ABNT NBR ISO 209 (2010), que adota uma classificação compatível com a da AA.

2.1.2. Integridade Estrutural

Na engenharia aeronáutica, a integridade estrutural envolve o conceito de capacidade da estrutura de manter sua funcionalidade, estabilidade e resistência, mesmo sob condições severas de tensão, vibração, fadiga, pressurização cíclica e variações térmicas significativas.

Segundo Callister (2020), a integridade estrutural depende diretamente do comportamento mecânico dos materiais, especialmente no que se refere à resistência à fadiga, tenacidade à fratura, ductilidade e estabilidade microestrutural. Em aeronaves, esses fatores tornam-se críticos porque a estrutura experimenta milhões de ciclos de carregamento ao longo do serviço, particularmente relevante para fuselagens, longarinas, *frames*, nervuras, asas e superfícies de controle. Assim, pequenas variações dimensionais, descontinuidades internas, tensões residuais ou defeitos de fabricação podem evoluir para trincas, delaminações ou falhas catastróficas se não forem adequadamente controlados (TAVARES et al., 2024).

2.2. Método Dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma análise numérica baseada na discretização de um meio contínuo em elementos menores que reproduz as propriedades físicas do meio original. Cada elemento é descrito por relações matemáticas derivadas de equações diferenciais, permitindo que o modelo global seja resolvido de forma aproximada para obtenção das respostas estruturais desejadas (LOTTI et al., 2006).

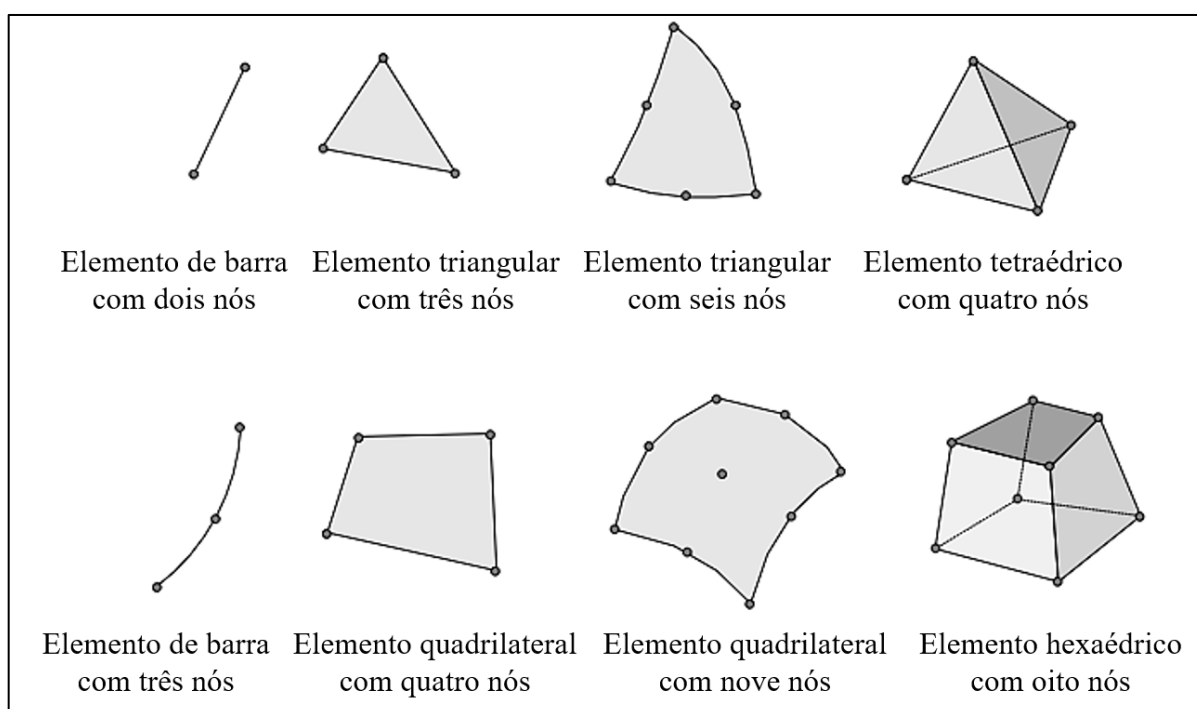
Quando os problemas estruturais envolvem cargas, geometrias e propriedades de materiais complexas, geralmente não são possíveis de obter soluções matemáticas analíticas. Por isso, métodos numéricos, como o método dos elementos finitos, são empregados para se obter soluções aceitáveis (LOGAN, 2012).

A principal ideia do Método dos Elementos Finitos consiste em dividir o domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometria simples, como elementos triangulares,

quadrilaterais, cúbicos e etc. Por possuírem dimensões finitas, essas sub-divisões são denominadas de “elementos finitos”, em oposição aos elementos infinitesimais empregados no cálculo diferencial e integral (SOUZA, 2003). Portanto, esse processo é chamado de discretização.

Os elementos finitos gerados na discretização (subdivisão) do domínio do problema são interligados entre si por pontos específicos, denominados nós ou pontos nodais. O conjunto formado pelos elementos finitos e seus respectivos pontos nodais constitui a malha de elementos finitos. Como apresentado na Figura 1, existem diversos tipos de elementos disponíveis, com diferentes formas geométricas (triangulares, quadrilaterais, cúbicos etc.) cuja escolha depende da natureza e da dimensionalidade do problema (unidimensional, bidimensional ou tridimensional) (SOUZA, 2003).

Figura 1. Diferentes tipos de elementos finitos.



Fonte: Souza (2003).

No método dos elementos finitos, ao invés de resolver o problema estrutural de forma integral para todo o domínio em uma única operação, formulam-se as equações individualmente para cada elemento finito e, posteriormente, essas equações são combinadas para obter a solução para todo o corpo. Em síntese, a solução para problemas estruturais envolve determinar

os deslocamentos em cada nó e as tensões desenvolvidas dentro de cada elemento quando o corpo é submetido aos carregamentos aplicados (LOGAN, 2012).

2.3. Otimização Estrutural

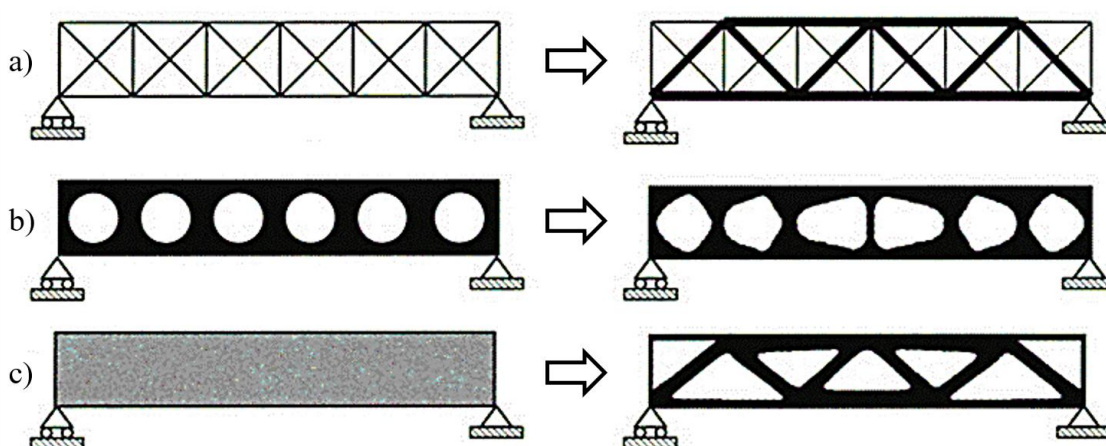
A otimização consiste na busca pela melhor solução possível, capaz de maximizar benefícios. Essa técnica deve atender às circunstâncias e restrições exigidas no projeto, além de que, para um mesmo problema, podem ser encontradas uma ou mais soluções ótimas. A solução ótima é o melhor resultado da otimização, caracterizada por ser a melhor solução para um problema ou a condição mais favorável para ele. Essa solução é apresentada como o menor valor procurado, como em casos de diminuição de custos, e em casos que a solução encontrada tem por objetivo maximizar os resultados (LIMA, 2016).

A otimização estrutural de projetos é um processo voltado a aprimorar uma estrutura existente ou projetar uma nova configuração estrutural, assegurando que ela atenda aos requisitos de desempenho estabelecidos, como rigidez, resistência e estabilidade, ao mesmo tempo em que otimiza parâmetros específicos do projeto, tais como massa, distribuição de material, custo e eficiência operacional.

2.3.1. Métodos de Otimização Estrutural

No processo de otimização estrutural, existem três diferentes abordagens que podem ser aplicadas: otimização paramétrica, otimização de forma e otimização topológica (BENDSOE; SIGMUND, 2004). As três abordagens mencionadas são apresentadas na Figura 2.

Figura 2. Três categorias de otimização estrutural. A) Otimização paramétrica, B) Otimização da forma e C) Otimização da topologia. Os problemas iniciais são apresentados no lado esquerdo e as soluções ótimas são apresentadas no lado direito.



2.3.1.1. Otimização Paramétrica

A otimização paramétrica, busca modificar as dimensões que caracterizam a estrutura, tendo como objetivo encontrar uma melhor combinação, porém, levando em conta suas condições de carregamento e restrições de graus de liberdade fixa (SIRIO, 2022). Na Figura 2, o desenho a) é um exemplo de otimização paramétrica, em que a estrutura é discretizada com elementos de treliça, e utiliza-se um grupo de formas geométricas como variáveis otimizáveis, como a área de seção transversal ou coordenadas geométricas. Essas variáveis podem ser otimizadas mantendo determinadas restrições impostas pelo projeto, como por exemplo, deslocamentos limites e tensões máximas (PALMA, 2018).

2.3.1.2. Otimização de Forma

Na otimização de forma, representada no desenho b) da Figura 2, utilizam-se curvas do tipo *spline* para parametrizar os contornos externos e internos da estrutura, sendo que os parâmetros dessas curvas constituem as variáveis de projeto. Ou seja, somente os contornos dos furos existentes são alterados, sem a criação de novas regiões vazias na estrutura. O processo se limita apenas na otimização dessas fronteiras para que atendam a uma função objetivo definida, como a maximização da rigidez, resultando em uma solução ótima para a estrutura. Nesse método, em função das geometrias complexas que podem surgir, a análise é realizada por meio de métodos numéricos. Como a forma da estrutura é modificada ao longo do processo de otimização, a malha sofre distorções, tornando necessário o remalhamento do domínio durante as etapas de otimização (PALMA, 2018).

2.3.1.3. Otimização Topológica

No método de otimização topológica, representado no desenho c) da Figura 2, o material é redistribuído dentro de um domínio de projeto fixo, permitindo tanto sua adição quanto sua remoção. Ou seja, diferentemente da otimização de forma, esse método permite a criação de novos vazios na estrutura, o que pode reduzir a quantidade de material utilizada e aprimorar o desempenho do componente. A otimização topológica é a abordagem mais abrangente, permitindo uma caracterização mais ampla da geometria resultante. Como resultado, é possível definir tanto a localização quanto o formato dos vazios, dependendo do nível de refinamento da malha. Assim, o número de variáveis de projeto na otimização topológica é grande, estando estas relacionadas ao refinamento da malha de elementos finitos (PALMA, 2018).

2.4. Otimização Topológica

2.4.1. Definição

A otimização topológica estrutural é uma área da pesquisa em expansão que tem crescido muito rapidamente nos últimos anos (AMSTUTZ; NOVOTNY, 2009). O crescimento das tecnologias avançadas tem contribuído para a aplicação da otimização topológica na arquitetura, na indústria aeroespacial e na indústria automotiva. O método de otimização topológica permite a criação de produtos leves e de alta rigidez, além de reduzir a massa, os custos e o consumo de energia (YONNET; DA, 2024).

A otimização topológica (OT) em combinação com o Método de Elementos Finitos (MEF), consiste em encontrar a distribuição ótima de material dentro de um domínio específico de projeto. A distribuição do material é alterada com base em alguns critérios de comportamento mecânico da estrutura, como tensões, flexibilidade, entre outros parâmetros relevantes. Ou seja, o desafio consiste em distribuir o material dentro de um domínio de projeto previamente definido, sob condições de contorno estabelecidas, de modo a minimizar ou maximizar a função objetivo, por exemplo, maximizar a rigidez e reduzir o volume de material (GIMENES; MORIGUCHI, s.d.). Segundo Bendsoe e Sigmund (2004), a distribuição ótima de material consiste em determinar quais regiões do domínio devem conter material isotrópico e quais devem permanecer vazias.

As técnicas de otimização topológica normalmente utilizam a análise de elementos finitos (FEA) para avaliar o desempenho estrutural. Para esse fim, grande parte das técnicas de otimização topológica requer a discretização do domínio contínuo em uma malha de elementos finitos para a realização da FEA, caracterizando as abordagens de otimização topológica baseadas em elementos. Entre as abordagens baseadas em elementos mais utilizadas destacam-se o método do material *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP) e o método *Bidirectional Evolutionary Structural Optimization* (BESO) (LI et al., 2022).

2.4.2. Métodos

Os métodos de otimização topológica buscam a solução ótima por meio da variação do domínio, ou seja, da própria topologia da estrutura. No caso de estruturas contínuas, essas técnicas são tradicionalmente classificadas em duas grandes abordagens: a abordagem micro, ou baseada no material, e a abordagem macro, ou baseada na geometria (SIMONETTI, 2009).

A abordagem micro baseia-se na consideração de uma microestrutura porosa, responsável por definir as relações constitutivas do material a partir de sua geometria e da

densidade volumétrica de uma célula unitária representativa. Essa célula é modelada por variáveis contínuas distribuídas ao longo de todo o domínio fixo estendido (região na qual a estrutura pode existir) abrangendo o carregamento aplicado, as condições de fixação e a quantidade disponível de material (SIMONETTI, 2009).

Na abordagem macro (geométrica), a topologia da estrutura é alterada por meio da introdução de vazios no domínio. Entre os métodos representativos desse grupo, destaca-se o ESO (*Evolutionary Structural Optimization*), que avalia a função objetivo a cada remoção de um elemento da malha de elementos finitos. Outro exemplo é o TSA (*Topological Sensitivity Analysis*), fundamentado em uma função escalar denominada Derivada Topológica, a qual indica, para cada ponto do domínio, a sensibilidade da função custo à criação de um pequeno furo (SIMONETTI, 2009).

Vários métodos de OT foram desenvolvidos para satisfazer as necessidades de otimização cada vez mais exigentes (GUO et al., 2025). Entre os *frameworks* mais utilizados destacam-se o SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*), baseado em densidades e amplamente adotado pela sua robustez e integração simples ao MEF; o ESO/BESO (*Evolutionary Structural Optimization / Bidirectional ESO*), que evolui a geometria por remoção e adição incremental de material conforme o carregamento; e os métodos de *Level-Set*, que trabalham diretamente com a fronteira do sólido, proporcionando geometrias mais bem definidas.

2.4.2.1. Método Utilizado

Neste trabalho, o método utilizado para a realização das análises foi o SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*). Esse método destaca-se como o mais popular método matemático para otimização de topologia (DASSAULT SYSTEMES, 2026), tendo sido proposto por Bendsoe e Kikuchi (1988) e Rozvany e Zhou (1992).

Também conhecido como método da aproximação direta ou método da densidade artificial, seu uso justifica-se pela sua simplicidade, por apresentar aplicabilidade a diferentes combinações de restrições de projeto e por possibilitar a obtenção de geometrias com menor custo de fabricação e de material em comparação a outros métodos (PALMA, 2018).

Nesse método, o domínio da estrutura é discretizado em elementos finitos, e a cada elemento é atribuída uma variável de densidade, que pode variar entre zero (ausência de material) e um (material sólido). Valores intermediários representam uma condição fictícia, utilizada apenas durante o processo numérico.

Segundo Pereira *et al.* (2021), o SIMP baseia-se em uma relação heurística entre a densidade do elemento e o módulo de elasticidade, conforme apresentado na Equação 1:

$$E_e(x_e) = x_e^p E^0 \quad (1)$$

Em que E_e representa o módulo de elasticidade do elemento, E_0 corresponde ao módulo de elasticidade do material sólido, x_e é a densidade do elemento e p é o fator de penalização, com $p \geq 1$.

O fator de penalização p é introduzido com o objetivo de minimizar a ocorrência de densidades intermediárias, isto é, regiões cuja interpretação quanto à presença ou ausência de material se torna ambígua no resultado. Essas regiões são frequentemente denominadas de “escala de cinza”, uma vez que apresentam valores intermediários de densidade. Considerando que densidades iguais a 0 representam vazio (associado à cor branca) e densidades iguais a 1 representam material sólido (associado à cor preta), os valores intermediários entre 0 e 1 não se enquadram claramente em nenhuma dessas categorias, dificultando a interpretação dos resultados (PEREIRA et al., 2021).

2.4.3. Processo Computacional

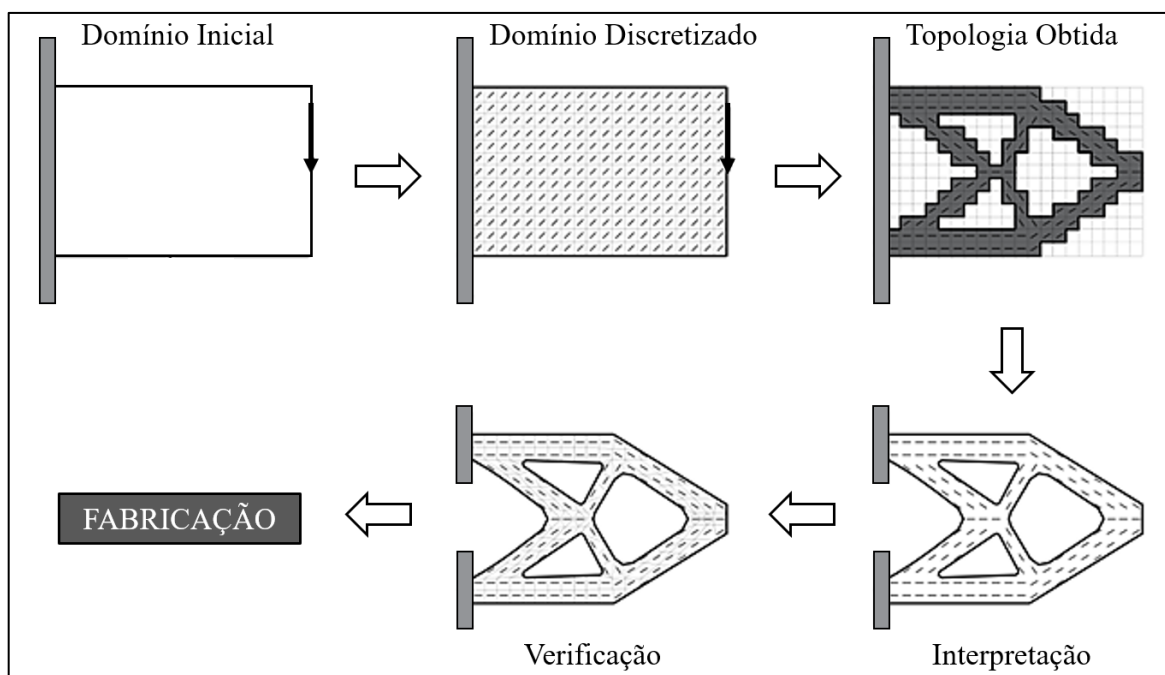
Primeiro, é necessário definir o domínio no qual a estrutura pode existir, sendo ele delimitado pelas condições de contorno e pelos pontos de aplicação das cargas. No segundo passo, o domínio inicial é discretizado por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), e todas as condições de contorno são aplicadas. No terceiro passo, os dados são inseridos no *software* de otimização topológica, que conduz um processo iterativo de redistribuição de material no domínio, buscando minimizar (ou maximizar) a função objetivo, normalmente associada à redução da deformação (SILVA, 2006). O processo computacional utilizando otimização topológica é apresentado na Figura 3.

O resultado gerado é semelhante ao mostrado na Figura 3 (item “topologia obtida”), em que as regiões escuras representam a presença de material e as regiões claras indicam sua ausência no domínio. Observe que também podem aparecer regiões com tonalidades intermediárias, conhecidas como escala de cinza (*gray scale*). Essas regiões representam materiais intermediários que não têm viabilidade prática de fabricação e surgem inevitavelmente no processo, ou seja, a ocorrência de *gray scale* é intrínseca à obtenção da solução ótima.

Uma quarta etapa de interpretação torna-se necessária e pode ser conduzida por meio de técnicas de processamento de imagem ou, de forma mais simples, pela reconstrução manual da

geometria com base no padrão gerado. A etapa de verificação por elementos finitos é essencial para confirmar se a otimização atendeu plenamente aos requisitos estabelecidos no escopo inicial. A etapa final corresponde à fabricação da estrutura (SILVA, 2006).

Figura 3. Procedimento de projeto de otimização topológica.



Fonte: Adaptado de Tecnologias Cimentícias Eco-eficientes Avançadas (CEMtec) (Acessado em 2025).

2.4.4. Geometrias e Limitações

A otimização topológica, embora seja um método que possibilita a obtenção de configurações estruturais eficazes a partir da distribuição ótima de material no domínio do projeto, apresenta, como consequência do processo, geometrias com características distintas das abordagens convencionais de projeto e das práticas do ponto de vista de fabricação (VATANABE et al., 2016).

De fato, as soluções otimizadas fornecidas pela OT têm a tendência de gerar geometrias complexas, formas orgânicas, características ocas e estrutura de moldura resultantes da adaptação do material aos caminhos de carregamento (SUTRADHAR et al., 2017). Essas configurações frequentemente incluem superfícies irregulares, transições suaves entre regiões estruturais e distribuição não uniforme de massa, o que dificulta a interpretação e a conversão dos resultados em modelos de projeto *Computer-Aided Design* (CAD), sendo esse processo atualmente minucioso e manual (LU; CHEN, 2012).

Além disso, é comum a geração de cavidade internas e regiões com acesso limitado, decorrentes da remoção de material em áreas de baixa solicitação estrutural, bem como furos internos que aparecem frequentemente nos *designs* de topologia a fim de obter um desempenho estrutural superior (LIU; MA, 2016). Tais características representam uma limitação quando consideradas sob a ótica de fabricação, principalmente de processos convencionais como a usinagem, que requer acesso direto da ferramenta às superfícies a serem trabalhadas. Em outras palavras, muitas das características do projeto otimizado não podem ser acessadas por uma ferramenta sem colidir com a peça ou dispositivo de fixação (MIRZENDEHDEL et al., 2020).

Outro aspecto recorrente refere-se à formação de elementos estruturais com dimensões reduzidas, como membros delgados e conexões localizadas (GUEST et al., 2004). Essas características contribuem para a eficiência estrutural do componente, porém podem afetar a robustez e ultrapassar limitações associadas aos processos de usinagem (VATANABE et al., 2016).

Dessa forma, apesar dos benefícios em termos de desempenho estrutural, as geometrias geradas pela otimização topológica apresentam dificuldades e limitações relacionadas à viabilidade de fabricação, muitas vezes não sendo diretamente fabricáveis ou não sendo fabricáveis de maneira econômica. Com isso, essas limitações apresentam a necessidade de uma análise dos resultados obtidos, de modo a relacionar o modelo otimizado com as restrições de usinagem.

2.5. Usinagem

Processo de fabricação pode ser definido como o conjunto de operações e transformações destinadas à transformação de matérias-primas em componentes ou produtos finais, abrangendo tecnologias como usinagem, fundição e conformação mecânica. No contexto produtivo, um componente pode ser obtido por diferentes métodos de fabricação, a escolha do processo mais adequado depende de um conjunto amplos de variáveis. Além disso, o produto final, em geral, resulta da integração de múltiplas etapas de processamento, podendo envolver operações complementares de acabamento, montagem e controle de qualidade (MACHADO et al., 2015).

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2024), a seleção do processo de fabricação deve considerar, entre outros aspectos, os seguintes fatores:

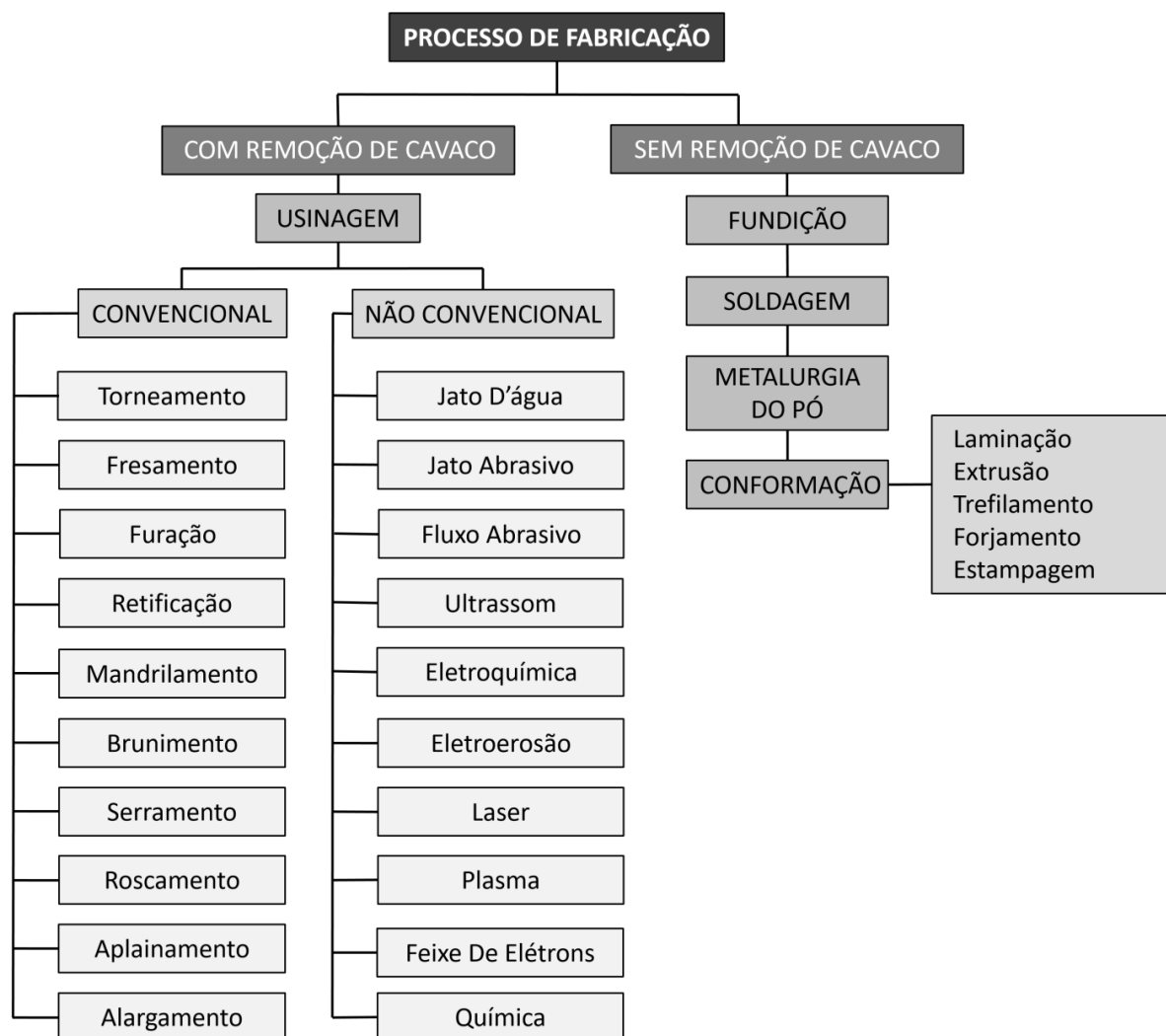
- Tipo do material e suas propriedades.
- Tamanho, forma e complexidade do componente.
- Tolerâncias e acabamento superficial exigidos.

- Processo subsequente envolvido.
- Projeto e custo de ferramental; efeito do material na vida da ferramenta.
- Disponibilidade do equipamento e experiências operacionais.
- Tempo necessário para iniciar a produção.
- Número de partes requeridas e taxa de produção desejada.

Custo total do processamento.

A Figura 4 apresenta uma classificação dos processos de fabricação, onde se destaca a usinagem.

Figura 4. Classificação dos processos de fabricação.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A usinagem é amplamente reconhecida como um dos processos de fabricação mais difundidos na indústria, sendo responsável por uma parcela significativa da produção metálica (TRENT et al, 2025). Trata-se de um processo de manufatura subtrativa, caracterizado pela

remoção controlada de material por meio da ação mecânica de uma ferramenta de corte, que pode apresentar geometria de arestas definidas (como fresas, brocas e pastilhas) ou não definidas, como nos processos abrasivos de retificação.

Do ponto de vista mecânico, o processo baseia-se no fenômeno de cisalhamento do material na zona de corte, onde as tensões induzidas pela interação ferramenta-peça superam o limite de escoamento do material. Esse mecanismo resulta na deformação plástica intensa e na formação do cavaco, sendo este o principal meio de remoção de material no processo (MACHADO et al., 2015).

2.5.1. Fresagem

Segundo Ferraresi (1970) o fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas rotativas com múltiplas arestas de corte, denominadas como fresas. Nesse processo, a peça é fixada enquanto a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam seguindo uma trajetória programada. O fresamento permite a criação de superfícies planas, curvas, canais, cavidades e perfis tridimensionais.

No processo de fresamento, podem ser realizadas operações como o fresamento tangencial (concordante ou discordante), o fresamento tangencial de canais ou de perfis, o fresamento de topo, o fresamento frontal, o fresamento com fresa de topo esférica e o fresamento de cavidades (MACHADO et al., 2015). A Figura 5 apresenta algumas das operações citadas anteriormente.

Figura 5. Operações de fresagem.



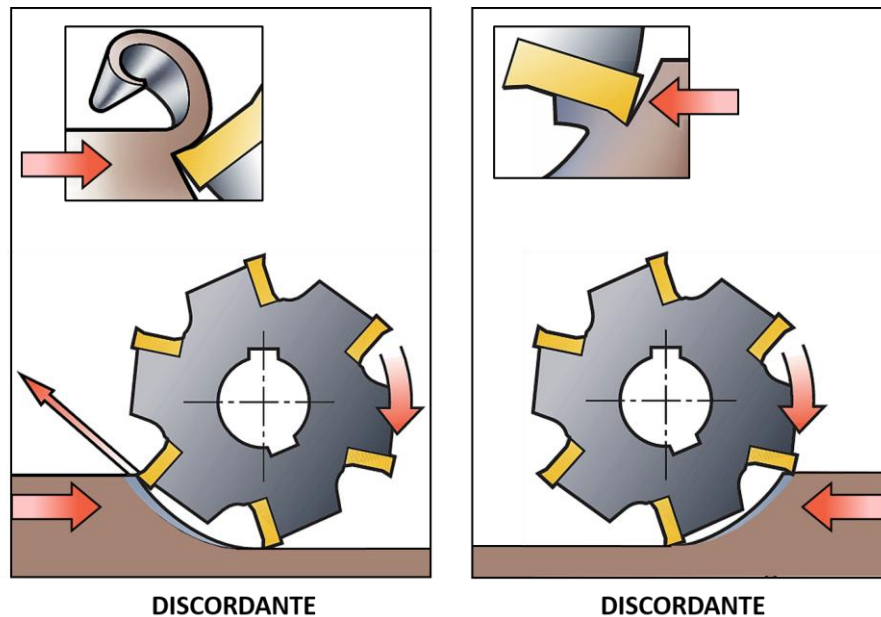
Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2024).

O Fresamento pode ser classificado de acordo com a posição do eixo da ferramenta em relação à peça. Com isso, existem duas classificações a fresagem periférica e a fresagem frontal.

O fresamento periférico é um processo de usinagem no qual o corte é realizado pelos dentes localizados na periferia da fresa, gerando uma superfície plana paralela ao eixo da ferramenta. A direção de rotação da ferramenta em relação ao movimento da peça influencia diretamente a formação do cavaco e o acabamento superficial obtido. Nesse contexto, o fresamento periférico pode ser classificado em dois tipos principais: fresamento concordante (*down-milling*) e fresamento discordante (*up-milling*) (YOUSSEF; EL-HOFY, 2020).

No fresamento discordante, a rotação da ferramenta ocorre em sentido contrário ao avanço da peça, fazendo com que o cavaco comece fino e aumente gradualmente durante o corte. Já no fresamento concordante, a ferramenta gira no mesmo sentido do avanço da peça, iniciando o corte com maior espessura de cavaco e reduzindo-a ao longo da usinagem. De maneira geral, o fresamento concordante tende a proporcionar melhor acabamento superficial e menores vibrações, enquanto o discordante apresenta maior segurança operacional e é mais utilizado em máquinas com menor rigidez. A Figura 6 demonstra o fresamento discordante e concordante (YOUSSEF; EL-HOFY, 2020).

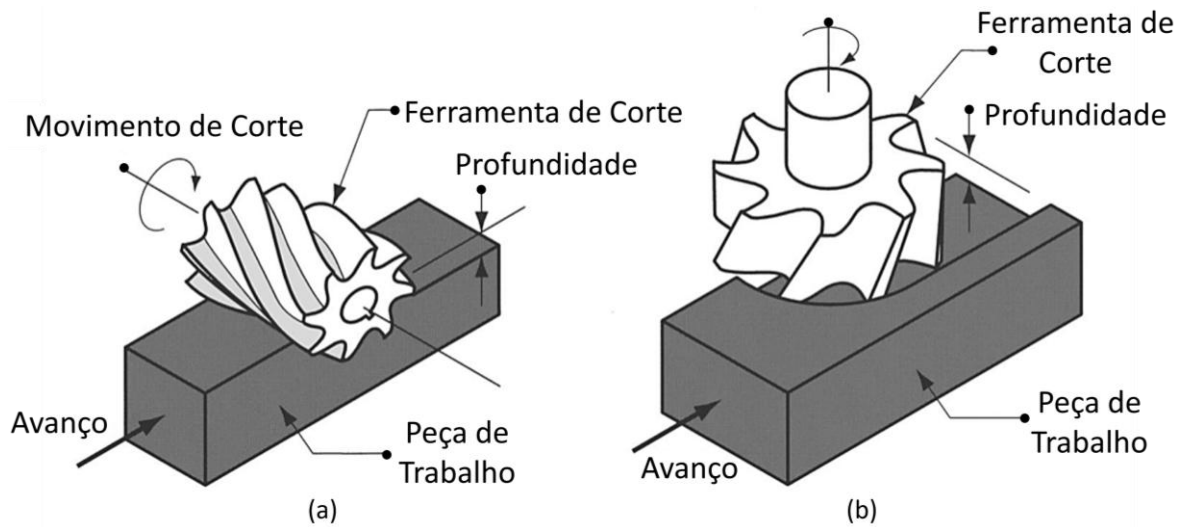
Figura 6. Fresamento concordante e fresamento discordante.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2026).

A fresagem frontal é uma operação de usinagem na qual o eixo de rotação da ferramenta permanece perpendicular à superfície da peça. Nesse processo, a remoção de material ocorre principalmente pela face da fresa, enquanto a peça realiza um movimento de avanço linear. Dependendo da direção de rotação da ferramenta em relação ao avanço da peça, a operação pode ocorrer em fresamento concordante ou discordante. Durante a usinagem, os dentes de corte deixam marcas de avanço na superfície, influenciando diretamente a rugosidade final da peça, que depende principalmente da geometria da ferramenta e do avanço por dente. Além disso, fatores como o ângulo de posição da pastilha, o diâmetro da fresa e a forma de entrada e saída da ferramenta da peça exercem grande influência sobre as forças de corte, estabilidade do processo e vida útil da ferramenta (KALPAKJIAN; SCHMID, 2024). A Figura 7 apresenta as duas classificações do fresamento.

Figura 7. Classificação dos dois tipos de fresamento: (a) fresamento periférico e (b) fresamento frontal.

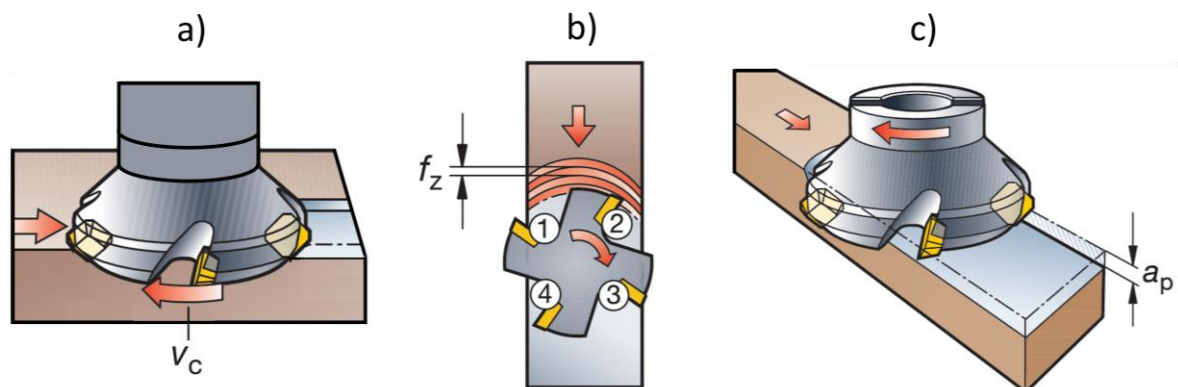


Fonte: Adaptado de LS Manufacturing (2026).

2.5.1.1. Parâmetros de Corte

No processo de fresagem, os principais parâmetros de corte utilizados são a velocidade de corte (V_c), a velocidade de avanço (V_f) e a profundidade de corte (A_p). Essas grandezas são fundamentais para se obter um bom acabamento superficial, para o desgaste da ferramenta e a estabilidade do processo (SPEROTTO, 2021). Os parâmetros são ilustrados na Figura 8 e descritos a seguir.

Figura 8. Parâmetros de corte no fresamento (a) velocidade de corte; (b) velocidade de avanço; (c) profundidade de corte.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2026).

A velocidade de corte (V_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta segundo a direção e o sentido do corte, ou seja, a velocidade com que a máquina-ferramenta realiza a remoção do material em relação à peça, expressa em metros por minuto (m/min) (PIRES, 2021).

A velocidade de avanço (V_f) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta segundo a direção e o sentido de avanço, representando o deslocamento da ferramenta em relação à peça durante o corte (MACHADO et al., 2015).

A profundidade de corte (A_p) corresponde à penetração transversal da cunha de corte da ferramenta na peça, sendo seus valores expressos em milímetros (mm) (PIRES, 2021).

2.5.2. Centros de Usinagem

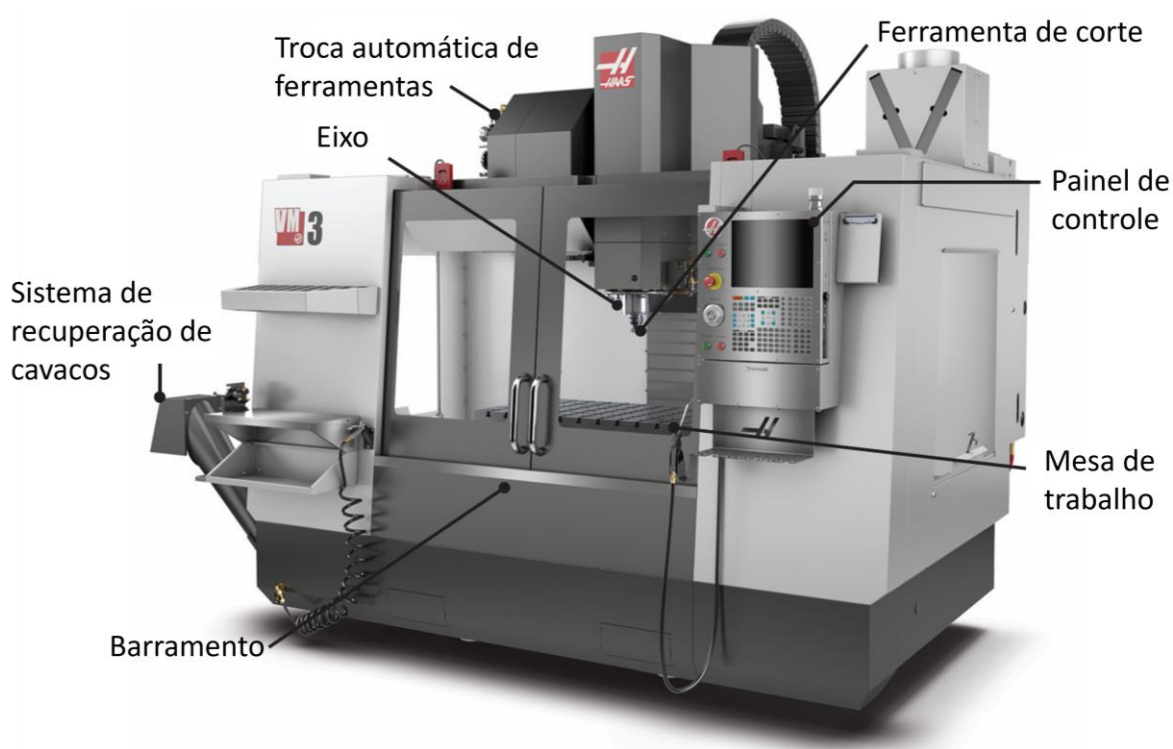
Os centros de usinagem são máquinas-ferramentas equipadas com sistemas de comando numérico computadorizado (CNC) e ferramentas de troca automatizada, podendo realizar múltiplas operações de usinagem em uma única fixação da peça. Os centros de usinagem são utilizados na produção em série de componentes de pequeno a médio porte, proporcionando maior produtividade, precisão dimensional e repetibilidade ao processo de fabricação (LEITE et al., 2017).

Os centros de usinagem integram em uma mesma máquina operações como fresamento, furação, mandrilamento e rosqueamento, reduzindo a necessidade de reposicionamento da peça e minimizando erros associados ao alinhamento.

Os dois tipos básicos de *designs* para centros de usinagem são fuso vertical e fuso horizontal, embora algumas máquinas sejam capazes de operar em ambos.

No âmbito desse trabalho, foi utilizado um centro de usinagem com eixo vertical, que são máquinas capazes de realizar operações de usinagem em cavidades profundas. Um centro de usinagem com eixo vertical é similar a uma fresadora. O magazine de ferramentas está localizado à esquerda da máquina, enquanto as operações são controladas pelo painel computadorizado à direita. Devido às forças de corte atuarem predominantemente para baixo, os centros de usinagem verticais apresentam elevada rigidez e boa precisão dimensional (KALPAKJIAN; SCHMID, 2024). A Figura 9 representa um centro de usinagem vertical.

Figura 9. Centro de usinagem de fuso vertical.



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2024).

Atualmente, os centros de usinagem incorporaram sistemas multieixos que permitem movimentos simultâneos em diferentes direções, possibilitando a fabricação de geometrias complexas com maior precisão e melhor acabamento superficial, sendo amplamente empregados na indústria aeronáutica.

2.5.2.1. Usinagem 5 Eixos

A usinagem simultânea em cinco eixos é uma das tecnologias de fabricação mais flexíveis e produtivas da atualidade (DIMITROV; SAXER, 2012). Essa tecnologia permite a movimentação simultânea da ferramenta ou da peça em cinco eixos diferentes, sendo três eixos lineares (X, Y e Z) e dois eixos rotacionais (A, B ou C).

Uma máquina de usinagem cinco eixos podem ter várias configurações. As configurações são separadas em três grupos, podendo ser: cabeçote/mesa, mesa/mesa e cabeçote/cabeçote. Na configuração cabeçote/mesa, os movimentos rotativos são divididos entre a mesa, que movimenta a peça, e a cabeça do *spindle*, que inclina a ferramenta. Já na configuração mesa/mesa, esses movimentos são realizados por duas mesas sobrepostas, em que a primária suporta a secundária, que por sua vez sustenta a peça. Por fim, na configuração

cabeçote/cabeçote, todos os movimentos rotativos são executados exclusivamente pela articulação da cabeça do *spindle*, sem qualquer movimentação da mesa (DIMITROV; SAXER, 2012).

Máquinas de cinco eixos são utilizadas em usinagens de geometrias complexas, devido à sua alta eficiência e flexibilidade. Esse equipamento permite que as ferramentas alcancem diferentes regiões do componente em múltiplas inclinações. Como vantagem, esse sistema contribui para o aumento da precisão dimensional, a redução do tempo de fabricação, o acabamento superficial e a diminuição do número de fixações (LI; ZHANG, 2006).

Outra vantagem da usinagem em cinco eixos é a possibilidade de utilizar ferramentas curtas durante as operações, o que aumenta a rigidez e diminui as vibrações e deflexões da ferramenta. Esse comportamento resulta em maior estabilidade dinâmica e uma qualidade superficial elevada (APRO, 2008).

As máquinas de cinco eixos são utilizadas em setores como as indústrias aeronáutica e aeroespacial, construção naval, automotiva e de moldes e matrizes (WU, et al, 2023). Em especial, na indústria aeronáutica e aeroespacial, essa tecnologia de máquina é aplicada na produção de componentes estruturais e superfícies aerodinâmicas, fabricados em materiais de difícil usinagem.

2.6. Usinagem aplicada a potenciais efeitos da otimização topológica

2.6.1. Acessibilidade ferramental em superfícies complexas

No contexto desta pesquisa, foram considerados os potenciais efeitos da otimização topológica sobre a acessibilidade da ferramenta em processos de usinagem de superfícies otimizadas, fundamentados nas características e limitações computacionais previamente discutidas nas seções acima.

Em usinagem de grande complexidade, existem infinitas posturas possíveis da ferramenta ao longo da superfície, o que torna indispensável avaliar previamente quais orientações são viáveis para evitar colisões e garantir a qualidade do processo (LI, ZHANG, 2006). Segundo os autores, a acessibilidade influencia diretamente a seleção da ferramenta, a direção de corte e a geração das trajetórias, sendo necessário verificar se a fresa pode alcançar cada ponto da superfície sem provocar *gouging* ou exceder os limites da máquina.

De forma complementar, é analisada a acessibilidade sob a perspectiva do dimensionamento do diâmetro da ferramenta, enfatizando que a escolha incorreta pode inviabilizar a entrada da fresa em cavidades ou impedir seu movimento seguro ao longo da

parede interna do componente a ser usinado (LIM et al., 2000). Os autores observam que ferramentas grandes tendem a gerar colisões em regiões com raios reduzidos ou bolsões profundos, enquanto ferramentas pequenas aumentam a acessibilidade, porém elevam significativamente o tempo de usinagem. Eles destacam ainda que muitos sistemas *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) apenas verificam a acessibilidade após a geração do percurso, o que pode resultar em retrabalho caso a ferramenta selecionada não seja compatível com a geometria. Para superar essa limitação, o estudo emprega operações de *offset* geométrico para determinar com precisão o volume acessível para cada diâmetro, evidenciando que pequenas variações no raio da ferramenta alteram de forma expressiva o espaço que pode ser efetivamente usinado.

A junção das duas abordagens mostra que a acessibilidade depende simultaneamente da postura da ferramenta (LI, ZHANG, 2006) e do seu diâmetro efetivo (LIM et al., 2000). Revelando que o fresamento de geometrias complexas exige compatibilização entre orientação, tamanho da ferramenta e restrições geométricas da peça.

2.6.2. Rigidez da peça e seu impacto em vibrações e forças de cortes

A rigidez da peça exerce influência direta sobre a estabilidade do processo de usinagem, especialmente em componentes que apresentam geometrias complexas, cavidades profundas, regiões de espessura reduzida e peças com paredes finas. Em operações de fresamento, componentes com baixa rigidez estrutural tendem a sofrer maiores deflexões durante o contato entre peça e ferramenta, favorecendo o surgimento de vibrações e instabilidades dinâmicas no processo de corte (SCIPPA et al., 2014). Essas vibrações forçadas e auto-induzidas, associadas ao fenômeno de “*chatter*”, causam desníveis na superfície da peça, implicando no aumento da rugosidade, afetando a qualidade superficial da componente e acelerando o desgaste da ferramenta. Além disso, ocorrem mudanças nas propriedades do material durante o processo de usinagem (RADU; SCHNAKOVSKY, 2024).

A presença de paredes finas ou regiões com pouca sustentação estrutural reduz a capacidade da peça de absorver os esforços gerados pelas forças de corte, aumentando as deformações elásticas durante o processo de usinagem (ALTINTAS, 2012). Além disso, cavidades profundas e superfícies orgânicas dificultam a distribuição das cargas mecânicas ao longo da estrutura, intensificando a instabilidade do processo (ALTINTAS, 2012). Em muitos casos, a ausência de faces planas para apoio e fixação também compromete a rigidez global do sistema, exigindo componentes adicionais para fixação e a redução dos parâmetros de corte.

Outro fator importante está relacionado à variação das forças de corte em superfícies

não lineares. Em geometrias complexas, o contato entre ferramenta e peça sofre alterações contínuas ao longo da trajetória, modificando o volume de material removido e alterando as condições de carregamento da ferramenta (STEPHENSON; AGAPIOU, 2016). Essa variação contribui para oscilações dinâmicas durante o fresamento, podendo gerar marcas superficiais, aumento da rugosidade e desgaste prematuro da ferramenta (SCIPPA et al., 2014). Dessa forma, a rigidez da peça é um fator importante para garantir estabilidade, precisão e repetibilidade em operações de usinagem de componentes com elevada complexidade geométrica.

2.6.3. Pós-processamento e estratégias CAM avançadas para superfícies complexas

A usinagem de superfícies complexas exige elevado nível de refinamento nas etapas de pós-processamento e programação CAM, principalmente em componentes gerados por processos computacionais de otimização topológica. Em muitos casos, as geometrias resultantes apresentam superfícies facetadas, transições abruptas e elevado número de pequenas entidades geométricas, dificultando a reconstrução CAD e a geração de trajetórias contínuas de usinagem (WANG, 2007; ALTINTAS, 2012). Essa condição aumenta significativamente a complexidade do pós-processamento, tornando necessária a utilização de ferramentas de suavização, reconstrução de superfícies e refinamento geométrico antes da programação final.

O refinamento do pós-processamento possui influência na qualidade das trajetórias geradas. Superfícies muito facetadas podem resultar em programas NC extremamente extensos, compostos por milhares de pequenos movimentos lineares, aumentando o tamanho do código pós-processado e exigindo maior capacidade de processamento da máquina CNC (BAPTISTA; SIMÕES, 2000). Além disso, trajetórias muito fragmentadas podem provocar desacelerações constantes dos eixos, reduzindo a suavidade do movimento e comprometendo o acabamento superficial da peça (ALTINTAS, 2012).

Em estratégias CAM avançadas, busca-se manter a continuidade das trajetórias por meio da utilização de curvas suaves, *splines* e interpolação contínua, reduzindo variações bruscas de aceleração e melhorando a estabilidade cinemática da máquina (ALTINTAS, 2012). O uso de superfícies reconstruídas e suavizadas também contribui para a redução do número de segmentos necessários no programa, favorecendo movimentos mais fluidos e melhorando o desempenho da usinagem em operações multieixos (WU et al., 2023). Nesse contexto, etapas de pós-processamento são necessárias não apenas para a conversão do percurso da ferramenta mas também para a viabilidade da usinagem de superfícies complexas.

2.6.4. Variação da velocidade de corte e estratégias de gerenciamento de contato em fresas esféricas

Em operações de fresamento utilizando fresas esféricas, a velocidade de corte efetiva varia continuamente em função da posição de contato entre a ferramenta e a superfície usinada (BOUJELBENE et al., 2007). Diferente das ferramentas de topo plano, as fresas esféricas apresentam velocidade periférica nula na região central da esfera, fazendo com que o contato próximo ao centro da ferramenta ocorra sob baixas velocidades de corte (CHEN et al., 2005).

Em superfícies complexas e inclinadas, a posição de contato entre a fresa e a peça sofre constantes alterações ao longo da trajetória, modificando o diâmetro efetivo de corte e a velocidade tangencial atuante na remoção de material. Regiões onde o contato ocorre próximo ao centro da ferramenta tendem a apresentar maior atrito, aumento da temperatura e pior qualidade de acabamento, enquanto regiões com contato mais periférico favorecem condições mais estáveis de corte (BOUJELBENE et al., 2007; DOLINSEK et al., 2001).

Para minimizar esses efeitos, estratégias de gerenciamento de contato são frequentemente empregadas em operações CAM avançadas. Entre essas estratégias destacam-se o controle da inclinação da ferramenta (*tool tilt*), a otimização da orientação do eixo-ferramenta e a utilização de trajetórias que mantenham o ponto de contato afastado da região central da esfera. Esses fatores contribuem para estabilizar as condições de corte e reduzir as oscilações nas forças atuantes durante o fresamento. Além disso, o gerenciamento adequado do contato ferramenta-peça favorece a obtenção de melhor acabamento superficial e maior vida útil da ferramenta em operações de usinagem de superfícies complexas (BOUJELBENE et al., 2007).

2.7. Design for Manufacturing (DFM)

O *Design for Manufacturing* (DFM) é uma abordagem de desenvolvimento de produtos que integra, desde as fases iniciais do projeto, os conhecimentos e requisitos relacionados à manufatura. Seu principal objetivo é orientar o *design* de modo que as peças e produtos possam ser fabricados de forma mais simples, eficiente e com menor custo. Na prática, o DFM consiste em considerar explicitamente, durante o processo de projeto, todos os aspectos envolvidos na fabricação. Exemplos incluem fatores como custos e tempo de fabricação de ferramentas, custos de processamento e controle do processo, tempo e custo de montagem, condições de trabalho (como segurança e esforço exigido), além da disponibilidade de materiais e equipamentos, entre outros. Dessa forma, o DFM não deve ser visto como uma etapa isolada, mas sim como uma diretriz contínua ao longo de todo o processo de desenvolvimento (POLI, 2001).

Os conceitos fundamentais do DFM envolvem a consideração dos processos de fabricação desde as etapas iniciais do projeto, a simplificação do *design*, a redução do número de componentes, a padronização de elementos, a seleção adequada e otimização do uso de materiais, além da definição de tolerâncias compatíveis e da redução das etapas de montagem. Essas práticas contribuem diretamente para a melhoria da eficiência produtiva, redução de desperdícios e aumento da qualidade do produto final (SIX SIGMA, 2024).

2.7.1. A Necessidade do DFM em Geometrias Otimizadas

Conforme mencionado no tópico “2.4.4. Geometrias e Limitações”, os resultados gerados pela otimização topológica frequentemente apresentam formas complexas e orgânicas (SUTRADHAR et al., 2017). Exemplos como furos internos surgem com frequência em projetos baseados em otimização topológica, uma vez que contribuem para o desempenho estrutural do componente. No entanto, esses furos não podem ser fabricados por processos convencionais, como a usinagem. Essas geometrias dificultam a construção do modelo CAD e, tornam mais complexa a etapa de programação no módulo CAM. Dessa forma, a remoção de violações relacionadas às limitações de fabricação torna-se essencial (LIU; MA, 2016).

Nesse contexto, o DFM se torna uma ferramenta essencial para garantir que as geometrias resultantes da otimização topológica sejam efetivamente fabricáveis. Sem a aplicação das limitações de fabricação, o projeto otimizado pode resultar em processos caros, com múltiplas operações e com adaptações adicionais durante a fabricação, comprometendo os ganhos iniciais obtidos com a otimização.

Portanto, a aplicação da OT e DFM permite não apenas a obtenção de componentes leves e eficientes, mas também garante que essas otimizações possam ser produzidas, reduzindo custos e tempo de fabricação.

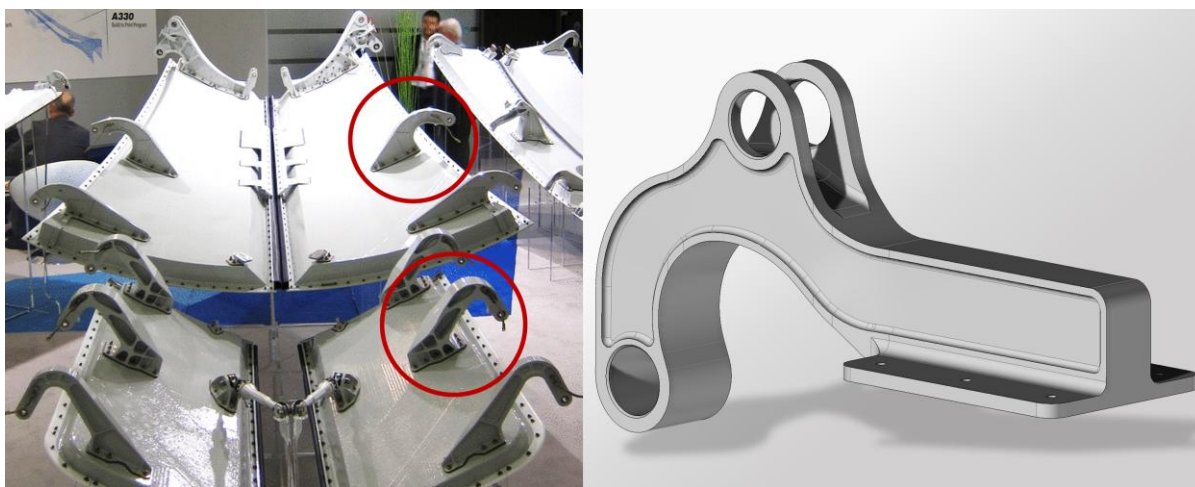
3. MÉTODO

3.1. Peça Utilizada

A peça utilizada na análise consiste em uma ferragem de articulação de trem de pouso, chamada de dobradiça. Esse componente é empregado em sistemas de abertura e fechamento de portas em aeronaves, atuando como interface mecânica entre o mecanismo de acionamento da porta e a própria estrutura da porta, permitindo a transmissão de esforços e a realização do movimento de rotação necessário durante as operações de abertura e fechamento.

O componente apresenta geometria composta por uma base plana de fixação contendo múltiplos furos para montagem estrutural, conectada a um corpo alongado com transições suavizadas por raios, terminando em uma interface cilíndrica destinada à inserção de pinos, buchas e rótulas. A geometria da peça analisada e a demonstração da localização em um sistema de trem de pouso do Airbus A350, são apresentados na Figura 10.

Figura 10. Modelo 3D da peça e demonstração da sua localização.



Fonte: Adaptado de Wikimedia Commons (2026).

A peça é fabricada em liga de Alumínio 7075, material amplamente empregado em componentes estruturais devido às suas propriedades e características, como peso baixo, alta resistência mecânica e resistência a corrosão. Conforme a norma AMS 4126E, foram adotadas as seguintes propriedades mecânicas do material: módulo de elasticidade de 71.7 GPa, coeficiente de Poisson de 0,33 e densidade de 2,81 g/cm³ (SAE INTERNATIONAL, 2025).

Para melhor obtenção de resultado das análises de otimização topológica, uma etapa de preenchimento de cavidades existentes na peça foi introduzida ao modelo 3D do componente analisado posteriormente. Esta etapa é crucial para que o algoritmo contribua com a melhor

distribuição de material, resultando na melhor eficiência estrutural do componente, dentro de um determinado volume mecanicamente solicitado.

A Figura 11 apresenta o processo de preenchimento, onde a área preenchida é indicada por elementos verdes na imagem.

Figura 11. Preenchimento da peça indicado pela cor verde na figura.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O modelo CAD da peça após o preenchimento possuía massa de 261 g e volume de 92,9 cm³, valores obtidos por meio do *software* SolidWorks versão 2024. Esses parâmetros foram utilizados para comparação com os demais modelos resultantes.

Foram realizadas análises estruturais na peça utilizada com o objetivo de estabelecer um parâmetro de referência e uma comparação quantitativa para as avaliações futuras. Nas análises foram avaliadas a tensão máxima, o deslocamento total e o fator de segurança (FOS), além da massa. Os parâmetros, carregamentos e condições de contorno utilizados nas análises foram os mesmos descritos no tópico “3.2.1. Condições de Contorno e Preservação das Regiões”.

3.2. Otimização Topológica

3.2.1. Condições de Contorno e Preservação das Regiões

As seguintes análises foram desenvolvidas utilizando um notebook ROG Strix G16, equipado com processador Intel® Core™ i9 HX, GPU NVIDIA RTX 5060 e 16 GB de

memória RAM. O *software* utilizado para as análises de otimização topológica foi o Ansys Discovery, versão 2025 R2, com licença estudantil.

As regiões de interfaces com montagens e acionamentos mecânicos foram preservadas, para que a otimização topológica não degrade as capacidades funcionais do sistema de articulação da porta do trem de pouso. Foi definido 3,5 mm de preservação da interface plana do componente, onde está disposto em uma condição de contato com a porta. A segunda região preservada foi a dos furos, onde *links* e atuadores mecânicos agem diretamente realizando o movimento a contribuir com a abertura, fechamento e sustentação da porta. Um raio de 5 mm foi inserido em torno do furo, abrangendo uma área significativa de preservação.

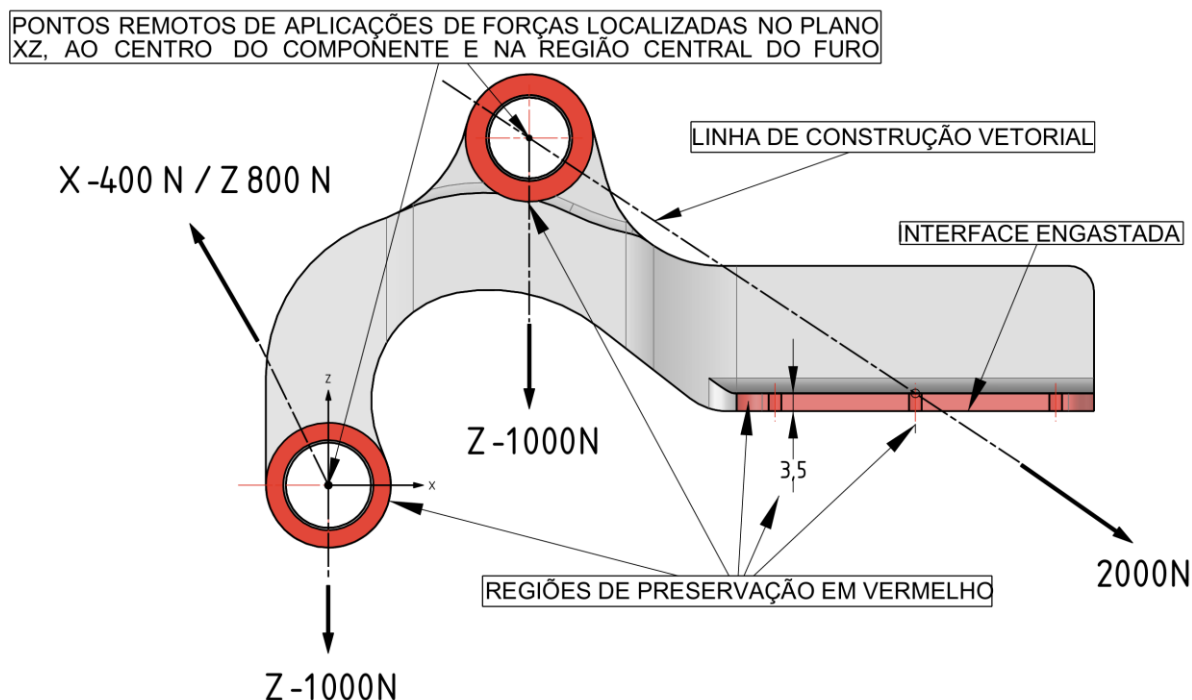
Para a elaboração das condições de contorno definiu-se uma hipótese representativa de restrições e direções de forças visando o comportamento mecânico do componente. A região plana de interface do componente, conectada a porta, foi considerada rigidamente engastada. Essa condição foi adotada representando a conexão por meio de elementos de união, ocasionando a restrição de translação e rotação desta região.

Nas duas regiões cilíndricas, onde ocorrem o acionamento dos atuadores mecânicos, foram inseridas duas direções de forças diferentes em cada furo. Considerando-se os sentidos predominantes de carga sobre o componente analisado, as direções de forças foram implementadas através da interpretação das solicitações estruturais, exemplificando a simulação no sentido funcional dos atuadores mecânicos sobre as regiões de acionamento

A grandeza das forças aplicadas originou-se da análise preliminar do cenário estrutural do componente abordado, sendo assim, o furo central resulta na região de maior magnitude e solicitação mecânica, ocasionado pelo acionamento recorrente no furo central no componente. Apesar do difícil acesso de valores de forças estruturais reais, por tratar-se de informações confidenciais de projeto, as forças aplicadas nestas análises são encontradas em literaturas sobre OT em componentes aeronáuticos da mesma proporção.

As forças utilizadas para a modelagem estrutural são representadas na Figura 12, tanto como uma linha de construção vetorial criada para exemplificar uma força na região central da superfície engastada.

Figura 12. Forças aplicadas na peça para análise.



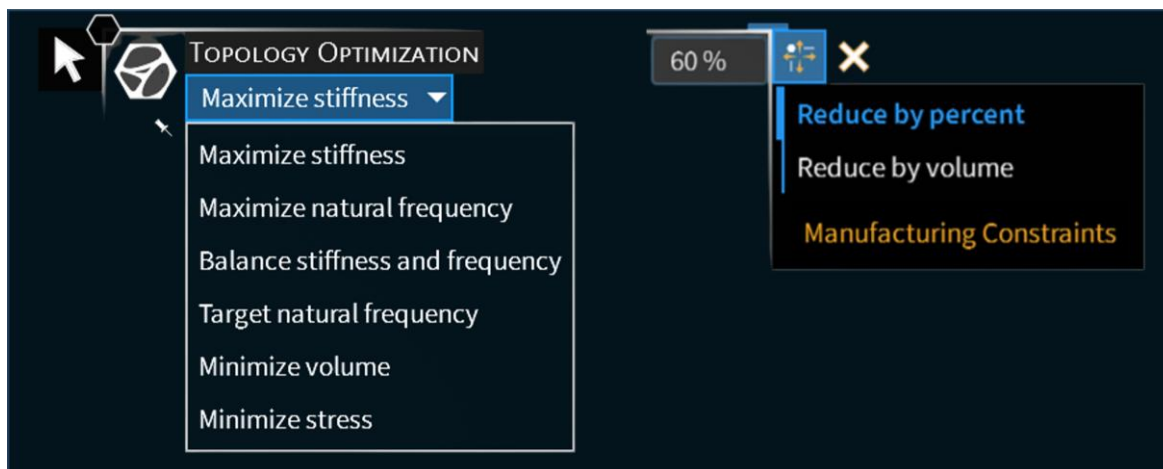
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.2.2. Configurações de simulação

O método utilizado no processo de otimização topológica foi o SIMP, citado no tópico “2.4.2.1. Método SIMP” da revisão bibliográfica”.

A opção “*Maximize Stiffness*” do *software* foi escolhida como objetivo, visando maximizar a rigidez do componente, de forma a preservar o comportamento estrutural da peça dentro do cenário onde está inserida. Como a porta é sustentada por diversas ferragens, uma alteração drástica na rigidez do componente poderia modificar a distribuição de cargas entre os demais elementos. Outro parâmetro escolhido foi a redução de peso, onde foi selecionada uma fração volumétrica de 40%, equivalente à redução de 60% do peso original, visando obter uma estrutura mais leve, em relação aos objetivos de redução de peso da indústria aeronáutica. A Figura 13 apresenta as configurações de entradas, aplicadas na otimização topológica.

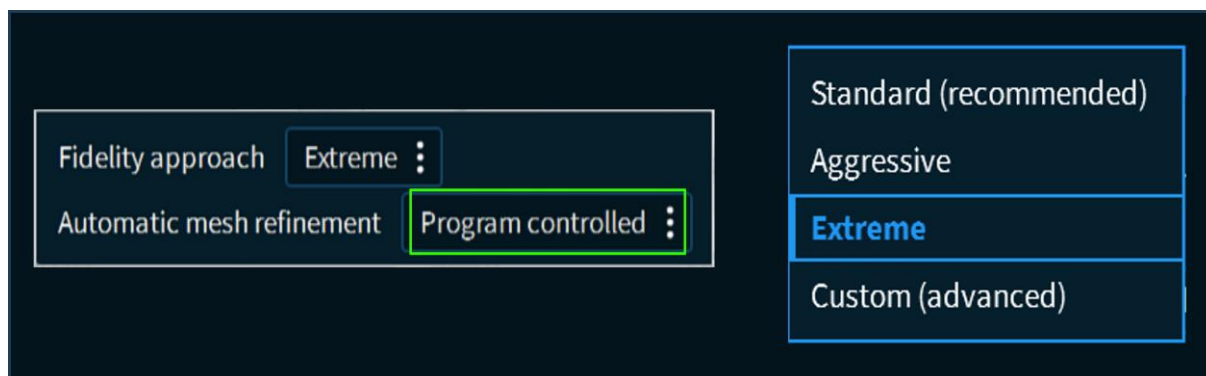
Figura 13. Configurações de entrada do *software*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na aplicação da otimização topológica, o refinamento da análise foi controlado por meio do parâmetro “*Fidelity Approach*”, disponível no *software* Ansys Discovery, responsável por definir o nível de resolução da simulação. O Discovery utiliza um conceito de discretização adaptativa, no qual diferentes níveis de fidelidade também influenciam parâmetros internos do *solver* durante a análise. Foram considerados três níveis de fidelidade: *Standard*, *Aggressive* e *Extreme*. A variação desses níveis foi utilizada para observar preliminarmente a influência da fidelidade nos resultados estruturais obtidos. Para cada nível selecionado, o tamanho característico da discretização é automaticamente definido pelo *software* por meio do algoritmo de malha adaptativa. Os valores aproximados obtidos foram 1,22 mm, 0,64 mm e 0,33 mm, respectivamente. A Figura 14 apresenta o campo de seleção do parâmetro de fidelidade e do modo de malha automática utilizado na análise.

Figura 14. Seleção do parâmetro de fidelidade no *software*.



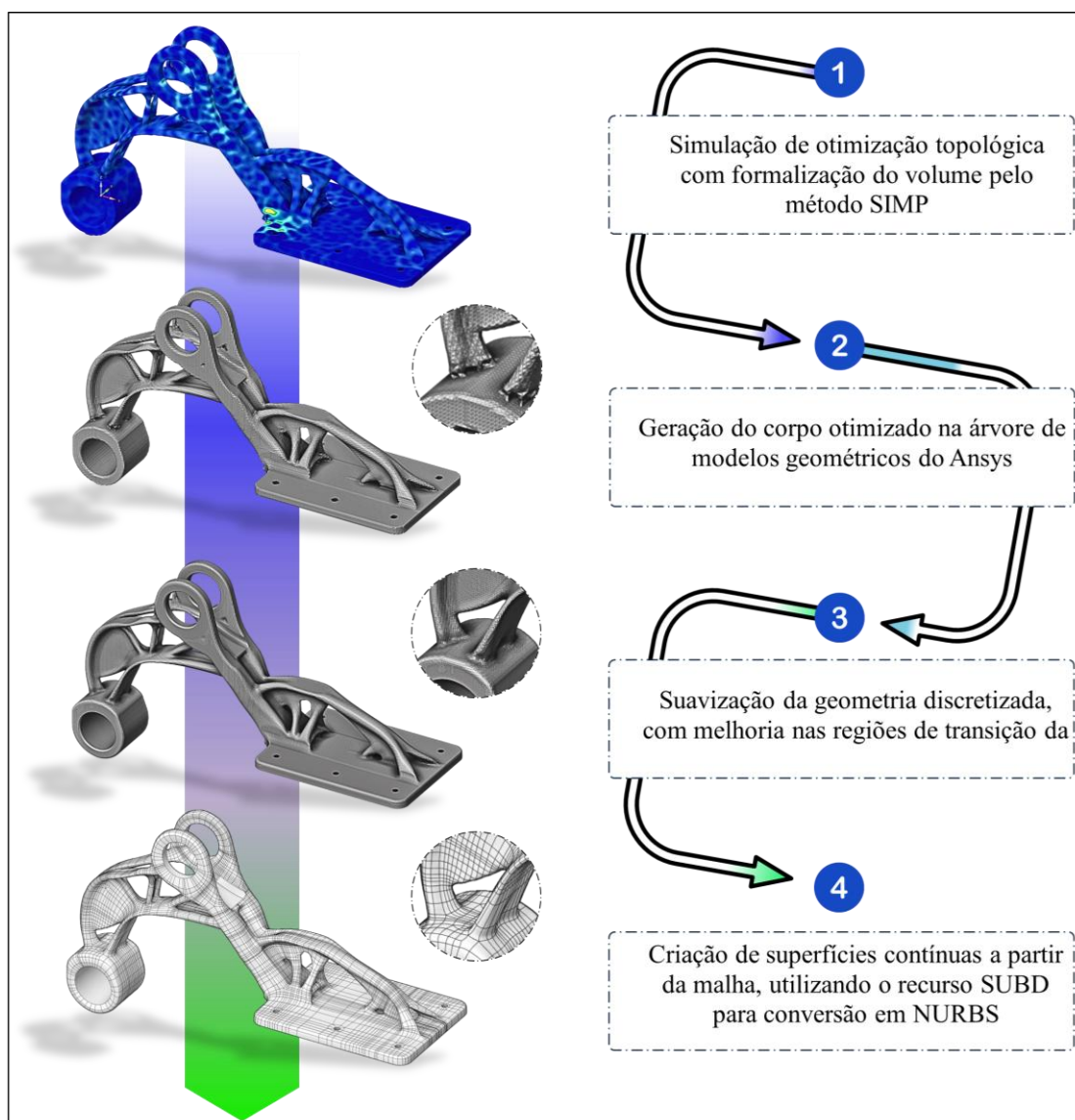
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.2.3. Processo de reconstrução de superfície

O processo de reconstrução da geometria otimizada é uma etapa crucial para operações posteriores a otimização topológica, impactando principalmente na conversão produtiva do componente otimizado. Neste estudo foi aplicado determinados recursos do Ansys Discovery para obtenção de uma superfície contributiva ao processo. A proporção da reconstrução da geometria está constantemente relacionada ao processo de fabricação submetido ao componente.

Na Figura 15 é representado o fluxo de operações realizado nas geometrias otimizadas. Este procedimento foi aplicado para os três tipos de fidelidade gerada, sendo assim, foram repetidas essa operação três vezes para que seja possível a comparação final já com a geometria final solidificada como demonstra na quarta etapa.

Figura 15. Fluxo de operações de reconstrução superficial.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após a etapa de reconstrução, realizou-se a seleção do modelo para continuidade do estudo com base na comparação entre as geometrias obtidas pelos diferentes níveis de fidelidade aplicados durante a otimização topológica. Para garantir coerência comparativa entre os modelos analisados, a mesma configuração de malha foi aplicada em todas as simulações, respeitando o limite de 128.000 nós imposto pela versão estudante do Ansys Discovery no modo “*Refine*”.

A definição do modelo final foi conduzida considerando critérios relacionados à coerência geométrica da reconstrução de Modelagem de Subdivisões (SUBD), comportamento

estrutural preliminar e potencial de aplicação nas etapas posteriores de análise de manufaturabilidade e programação CAM.

3.3. Usinagem do Modelo Otimizado

3.3.1. Análises Geométricas Preliminares para Programação CAM

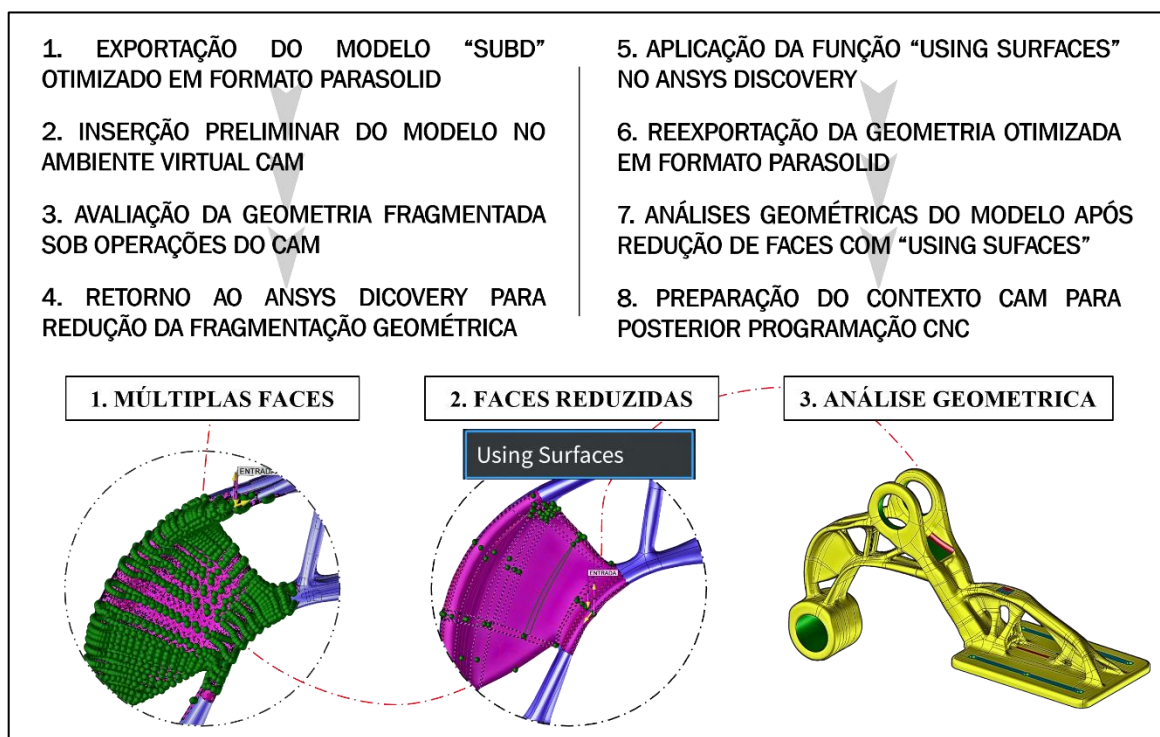
Nessa etapa utilizou-se o *software* TopSolid 7.18 versão gratuita disponível no site oficial, selecionado devido à integração entre os ambientes *Product Data Management* (PDM), *Computer-Aided Design* (CAD) e *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) e seu desempenho em operações de usinagem de alta complexidade.

Inicialmente, o modelo de Modelagem de Subdivisões (SUBD) foi exportado em formato “*Parasolid*” e inserido no ambiente CAM do TopSolid, visando avaliar o impacto da elevada quantidade de superfícies e arestas do modelo otimizado durante as operações iniciais de programação.

Posteriormente, o modelo foi novamente submetido ao Ansys Discovery utilizando a função “*Facets Using*”, com o objetivo de reduzir a fragmentação superficial da geometria, unificando faces e arestas, mantendo a geometria global previamente obtida. O novo modelo foi então reexportado em formato “*Parasolid*” para continuidade das análises geométricas e posterior programação CAM.

Na sequência, foram realizadas análises de normais, tipos de faces e continuidade de arestas, visando identificar possíveis impactos geométricos relacionados à interpretação computacional do modelo, geração de trajetórias e estabilidade das operações CAM, permitindo uma avaliação preliminar da complexidade geométrica e programação. A Figura 16 apresenta o fluxo de processo utilizado nas análises geométricas.

Figura 16. Fluxo otimizado das análises geométricas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3.2. Programação CAM do Modelo Utilizado

O presente processo demonstra as etapas de programação CAM realizadas no *software* TopSolid, abordando aspectos desde a definição inicial da tecnologia de máquina aplicada, métodos de fixação, definição de estratégias e operações de usinagem, bem como considerações gerais relacionadas ao ferramental empregado no processo.

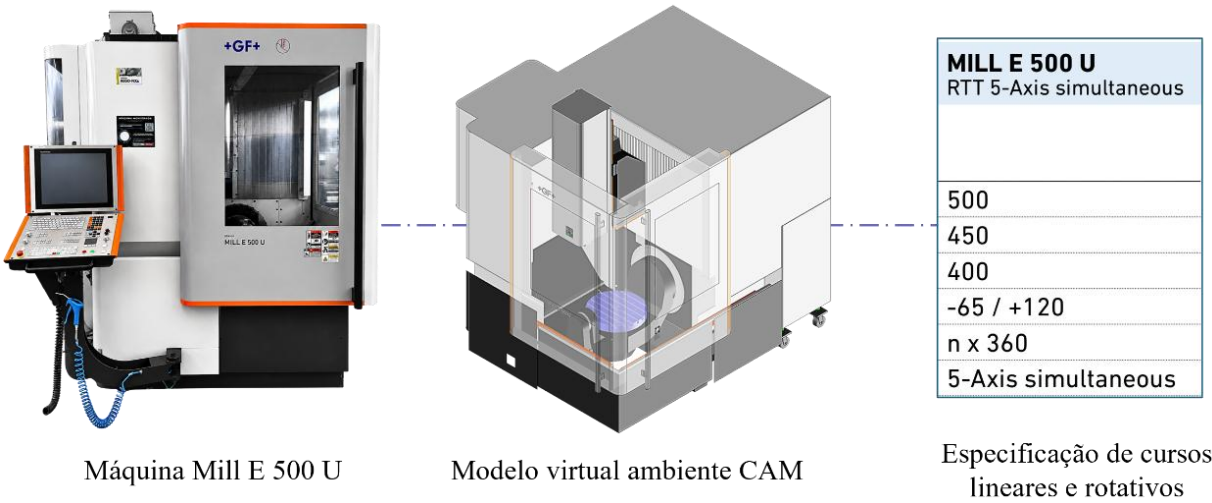
O principal objetivo desta etapa consiste em abordar estratégias de usinagem, desafios relacionados à programação CAM e à necessidade de utilização de tecnologias CNC 5 eixos, em função das geometrias orgânicas e superfícies de alta complexidade resultantes da otimização topológica.

3.3.3. Contextualização da Máquina CNC Utilizada

Para as etapas de programação CAM e simulação virtual de usinagem, foi selecionado o centro de usinagem CNC GF Mikron MILL E 500 U, configurado para operações simultâneas em 5 eixos. A escolha da máquina foi relacionada principalmente à necessidade de elevada flexibilidade geométrica e acessibilidade às superfícies orgânicas presentes no modelo otimizado.

No ambiente CAM do *software* TopSolid, foi utilizado o modelo virtual correspondente à máquina real, visando maior fidelidade entre o contexto virtual de programação e a cinemática aplicada no processo físico de usinagem, conforme apresentado na Figura 17. Dessa forma, foram mantidas características relacionadas aos eixos rotativos, limites angulares e comportamento cinemático do equipamento utilizado no estudo.

Figura 17. Máquina CNC utilizada para programação CAM do modelo utilizado.

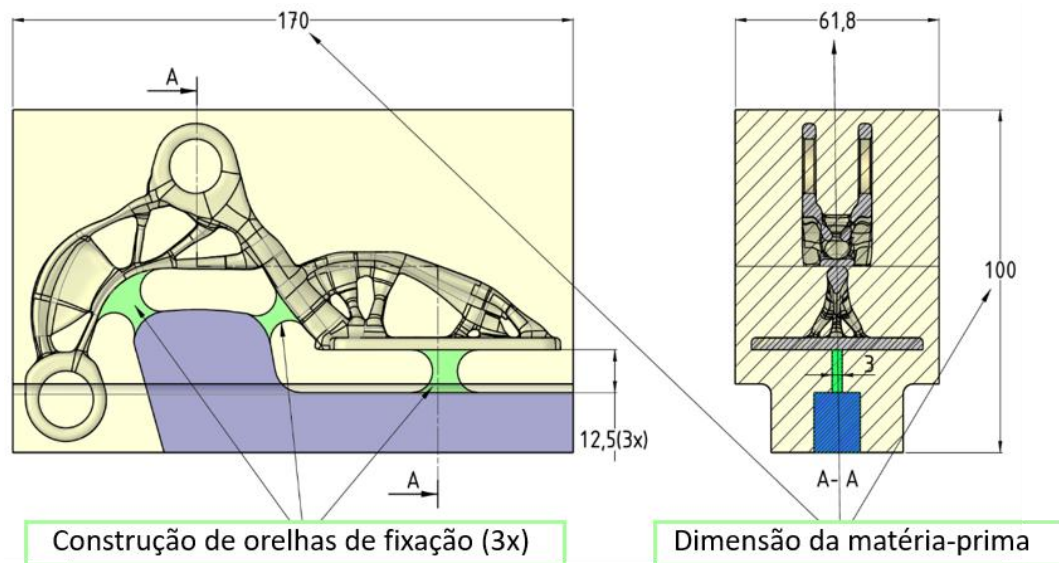


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3.4. Definição do *Setup* no Ambiente CAM e Método de Fixação da Peça

Conforme apresentado na Figura 18, a etapa inicial trata da definição das dimensões da matéria-prima para o desenvolvimento da programação CAM, considerando as especificações dimensionais necessárias para atender ao método de fixação por orelhas e à tecnologia de máquina selecionada para o processo. As construções das orelhas de fixação, assim como a definição dimensional do material, foram elaboradas por meio do documento de Ajuste da Peça Usinada no *software* TopSolid. A orelha de fixação foi projetada com 12,5 mm de altura e 3 mm de espessura, visando aspectos relacionados ao processo de usinagem e à estabilidade durante as operações finais da peça.

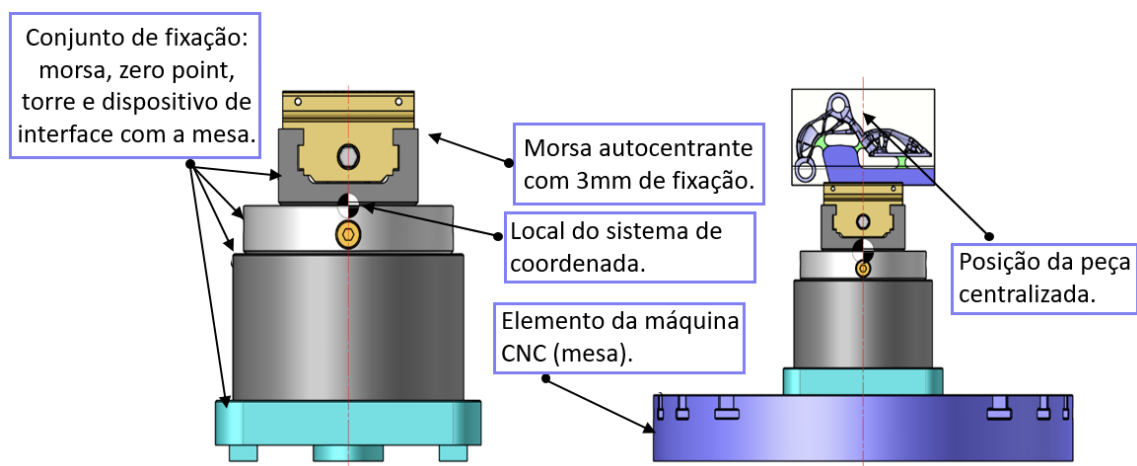
Figura 18. Definição do *Setup*, matéria-prima e orelhas de fixação.



Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A etapa seguinte, apresentada na Figura 19, aborda condições relacionadas aos sistemas de fixação, definição do sistema de coordenadas, assim como a configuração final do *setup* e métodos selecionados. Vale ressaltar que, durante a etapa de *setup*, é comum a definição do ferramental anterior à programação. Porém, para esta análise, as ferramentas de corte e suportes de fixação foram criados conforme as necessidades da programação e dificuldades identificadas durante o desenvolvimento do processo, utilizando os modelos genéricos oferecidos pelo *software* selecionado, os quais possuem excelente versatilidade, sendo possível criar modelos próximos da realidade industrial.

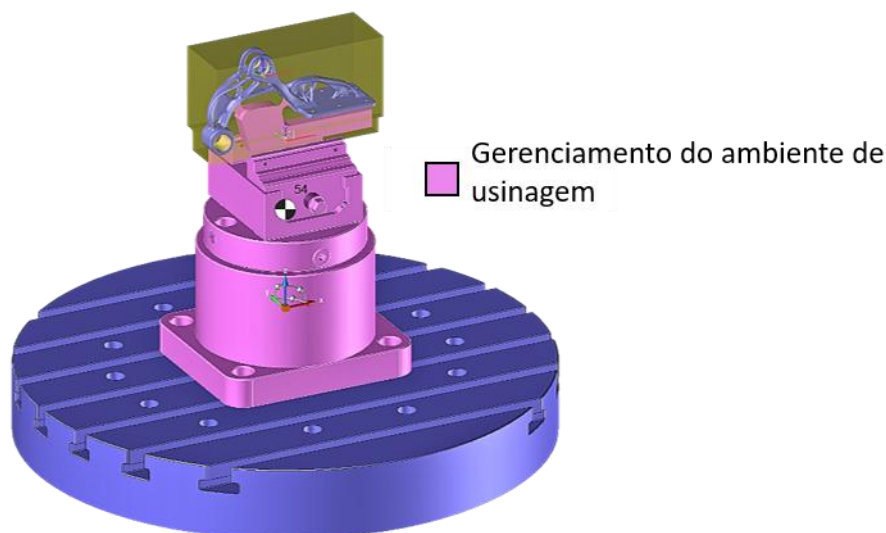
Figura 19. Sistemas de fixação, sistemas de coordenadas e configuração final de *setup*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para o início da programação CNC, foi criado e gerenciado o ambiente de usinagem do processo. Este recurso visa informar ao CAM quais elementos serão considerados para fins de detecção de entidades não usináveis, prevenção de colisões e cálculo de trajetórias realizadas. Conforme descrito, a Figura 20 demonstra os elementos presentes no ambiente de usinagem.

Figura 20. Elementos presentes no ambiente de usinagem após gerenciamento.



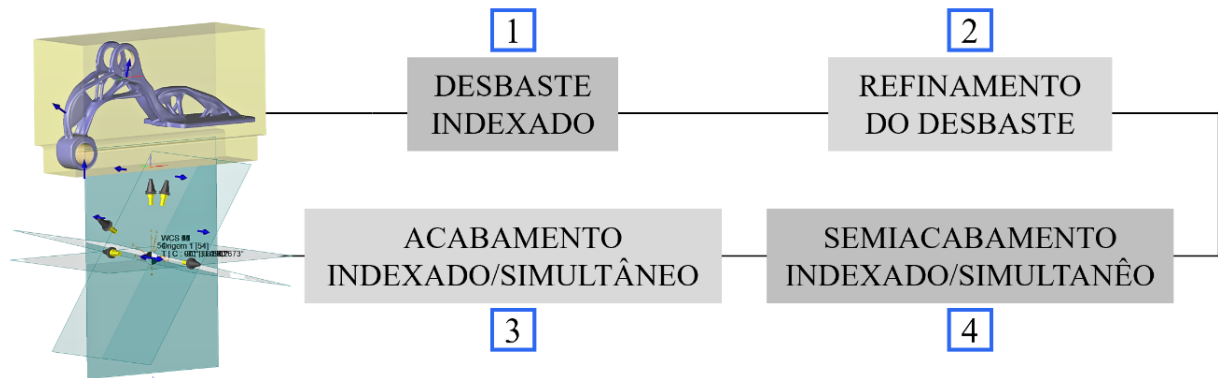
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3.5. Estratégias de Usinagem e Programação CAM

Após a estruturação do *setup* e definições de métodos, iniciou-se a programação CAM do modelo otimizado. O seguinte processo consiste em diferentes estratégias e operações de usinagem aplicadas ao modelo otimizado. O foco central da programação do componente selecionado engloba aspectos de acessibilidade ferramental, programação de superfícies orgânicas, processamento de geometrias complexas durante as operações selecionadas e desafios de usinagem simultânea em múltiplos eixos.

O modelo otimizado foi desenvolvido seguindo a respectiva ordem de desbaste, refinamento do desbaste, furações, semiacabamento e acabamento com eixos indexados e simultâneos. O fluxo apresentado na Figura 21 demonstra a sequência de programação do componente estudado.

Figura 21. Fluxo de programação do modelo otimizado.

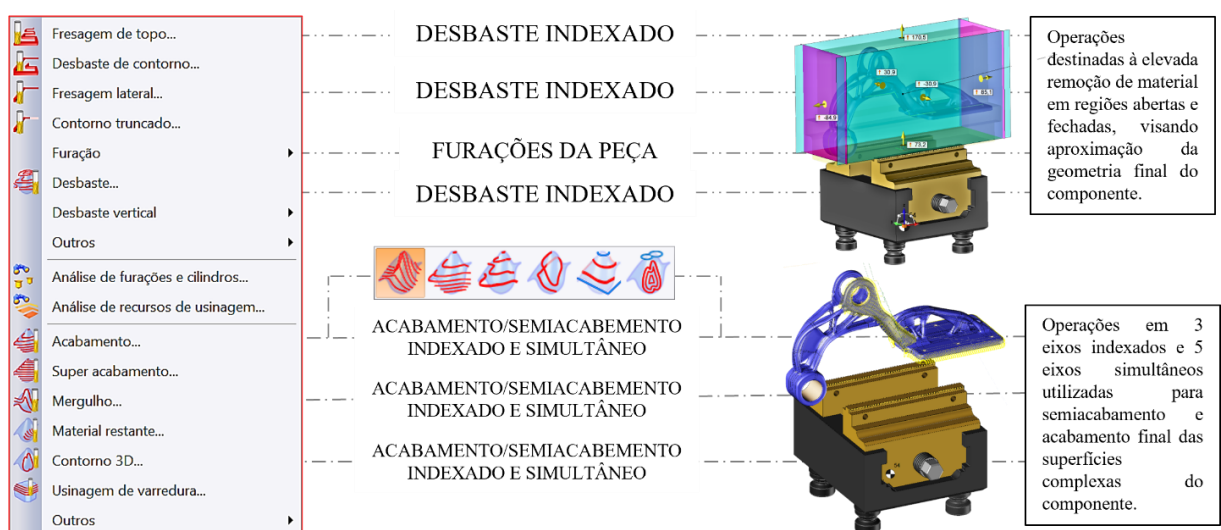


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3.6. Operações Seleccionadas para Programação do Modelo Otimizado

Conforme a lógica processual apresentada na Figura 21, esta sequência é composta por operações de usinagem dentro do contexto de programação CAM do *software* TopSolid, podendo ser classificadas quanto ao número de eixos requeridos por essas operações e suas características de aplicação, neste caso exemplificadas de forma simplificada entre etapas de desbaste e acabamento. A Figura 22 demonstra o menu otimizado do módulo de programação 2D/3D, seguido pelas operações principais utilizadas ao longo da manufatura do modelo otimizado.

Figura 22. Menu otimizado do módulo de programação e operações utilizadas.

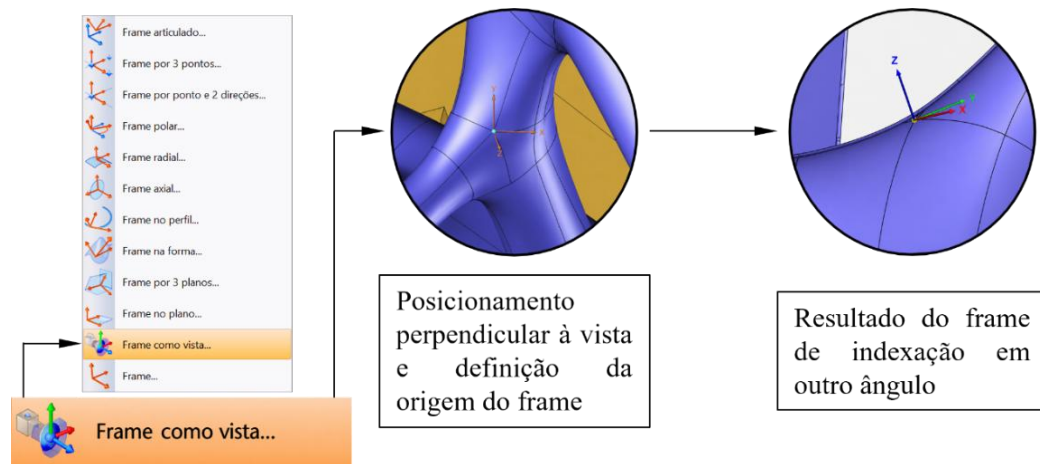


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3.7. Métodos de Indexação, Orientação de Ferramenta e Limitação de Regiões

Na programação CNC, a indexação está diretamente relacionada ao posicionamento dos eixos da máquina-ferramenta. Entre os métodos utilizados neste estudo, destaca-se o recurso “Frame como vista”, empregado principalmente em geometrias sem referências planas. A Figura 23 apresenta o fluxo simplificado de criação deste recurso.

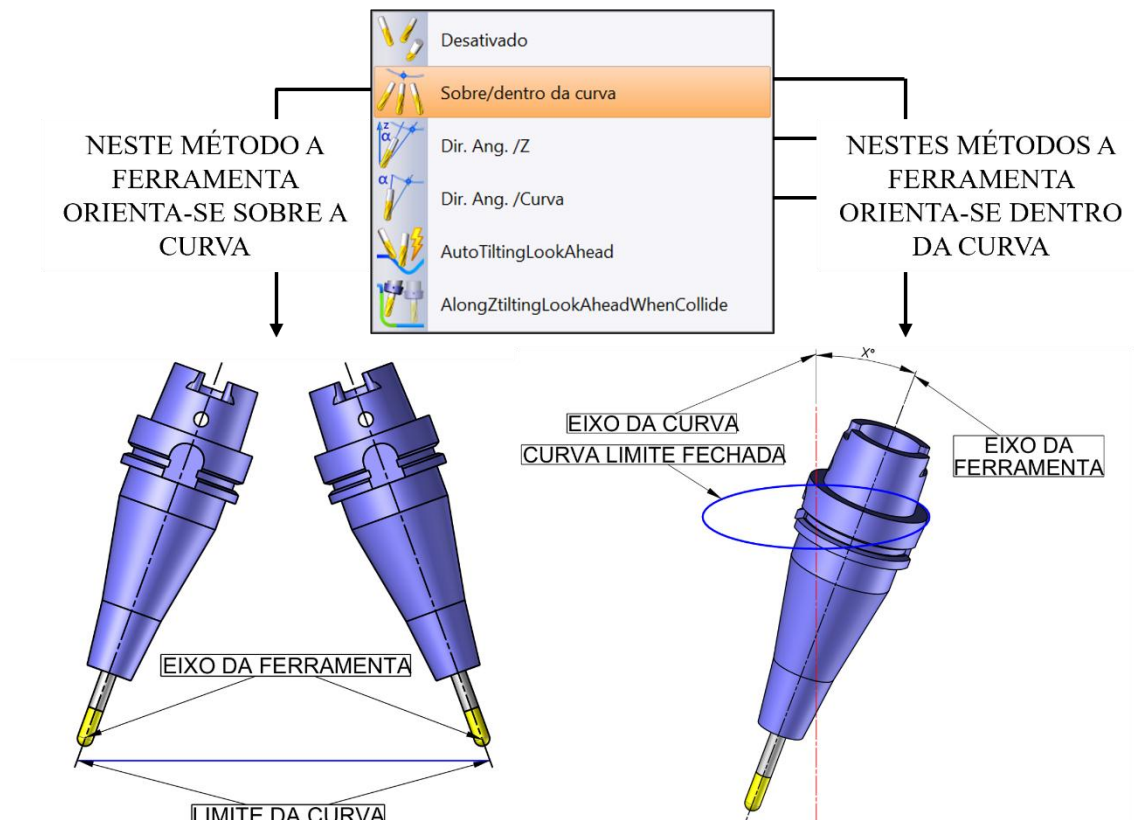
Figura 23. Fluxo da criação do recurso “Frame como vista”.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Além da indexação, a inclinação da ferramenta durante a usinagem simultânea pode ser controlada de diferentes formas no ambiente CAM. Neste estudo, foi utilizada a limitação por curvas através da criação de *sketch* 2D, permitindo controlar a trajetória e inclinação da ferramenta em geometrias orgânicas. A Figura 24 demonstra o funcionamento deste recurso.

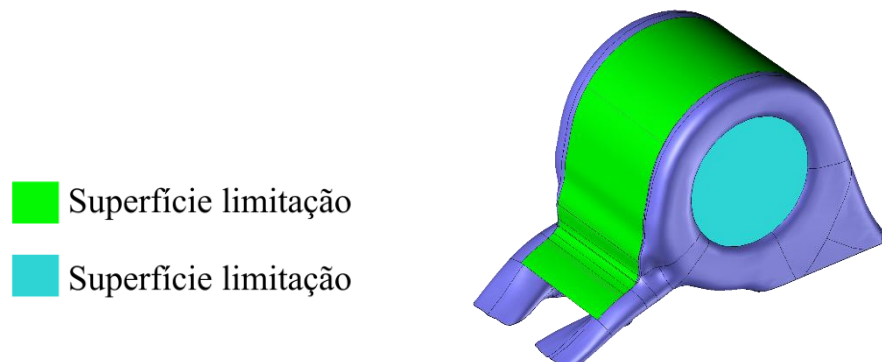
Figura 24. Limitação por curvas através da criação de *sketch* 2D.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Devido à necessidade de maior controle das trajetórias durante a programação CAM de geometrias complexas, foram utilizados recursos CAD de criação de superfícies para limitar regiões de usinagem e controlar os caminhos programados, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25. Limitação das regiões de usinagem.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Durante o desenvolvimento da programação CAM do modelo otimizado, ferramentas genéricas foram criadas ao surgimento de necessidade de acesso visando garantir a melhor eficiência durante o processo de usinagem. Devido ao foco central desta análise originar-se de aspectos relacionados a estratégia de usinagem e sua complexidade em superfícies orgânicas, a definição de aspectos de ferramentas de corte tornou-se simplificadas, ou seja, resultados como quantidade de ferramentas, tempo de trabalho, parâmetros de corte e cálculos de usinagem apresentam hipóteses simplórias para foco central em programação CNC, tendo em vista que o fator principal para todos os periféricos relacionados a ferramentas de corte a complexidade do componente programado representa uma grande influência. Conforme ilustrado na Figura 26, é exemplificado parcialmente a janela de criação de ferramentas de corte através do recurso de Gerenciador de ferramentas, este método possui configurações parametrizadas possibilitando a criação de modelos de alta confiabilidade rapidamente.

Figura 26. Janela de criação do recurso “Gerenciador de ferramentas” do *software*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

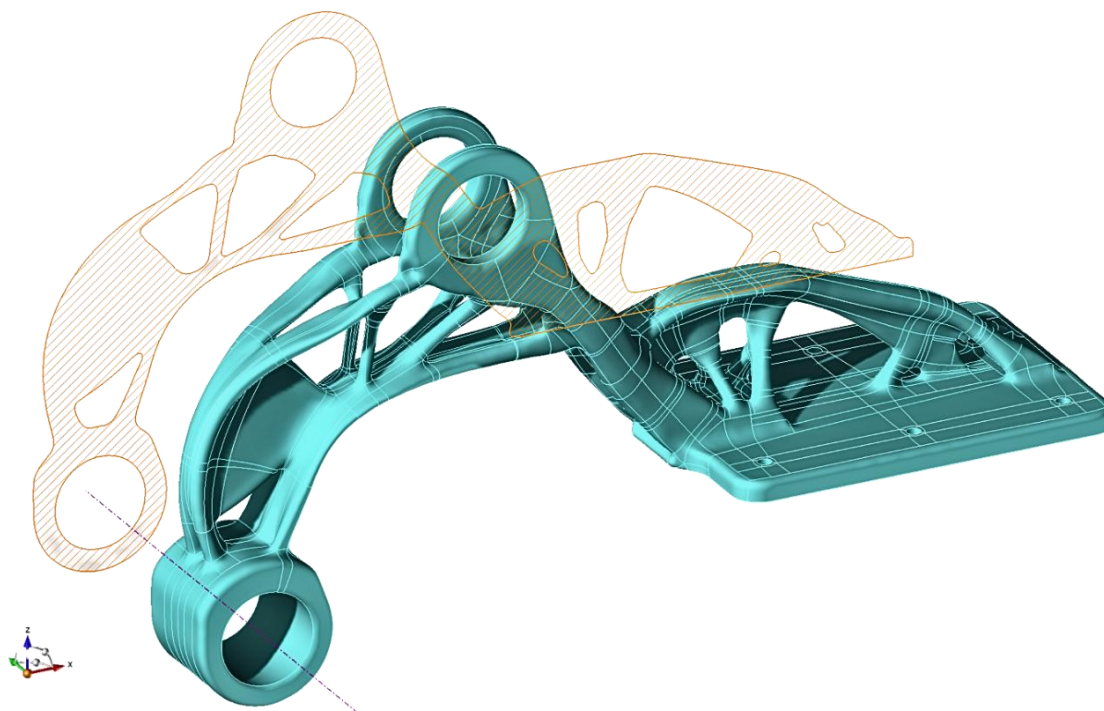
Os parâmetros de corte foram calculados através da calculadora dinâmica da fabricante Seco Tools. Esses parâmetros servem como base para a comparação posterior de partes pontuais da programação CAM. Os parâmetros foram determinados através da especificação correta da aplicação da ferramenta, considerando as estratégias de corte e o material usinado. Para simplificação, com a finalidade de comparar apenas as influências das estratégias de corte, os mesmos parâmetros foram aplicados a todas as ferramentas, simplificando a análise de tempo e das variáveis envolvidas devido à alta complexidade do modelo otimizado.

3.4. Aplicação da metodologia Design For Manufacturing ao Modelo Otimizado e Análise Estrutural Preliminar

Após a programação inicial do modelo otimizado, foram identificadas regiões críticas relacionadas à acessibilidade ferramental, inclinação de superfícies, limitação geométrica e complexidade de usinagem. Dessa forma, aplicaram-se modificações geométricas baseadas em critérios de *Design for Manufacturing* (DFM), visando melhorar a manufaturabilidade do componente, mantendo suas características estruturais principais.

Para a construção do modelo DFM, foram elaborados critérios para garantir maior confiabilidade do novo *design*, coerência geométrica e estrutural em relação ao modelo resultante da OT. A primeira etapa consiste na análise preliminar da projeção global do componente otimizado, através da direção com mais detalhes do modelo, utilizando a ferramenta de análise de área projetada no *software* TopSolid. A Figura 27 demonstra a dinâmica utilizada.

Figura 27. Análise preliminar da projeção global do componente otimizado.

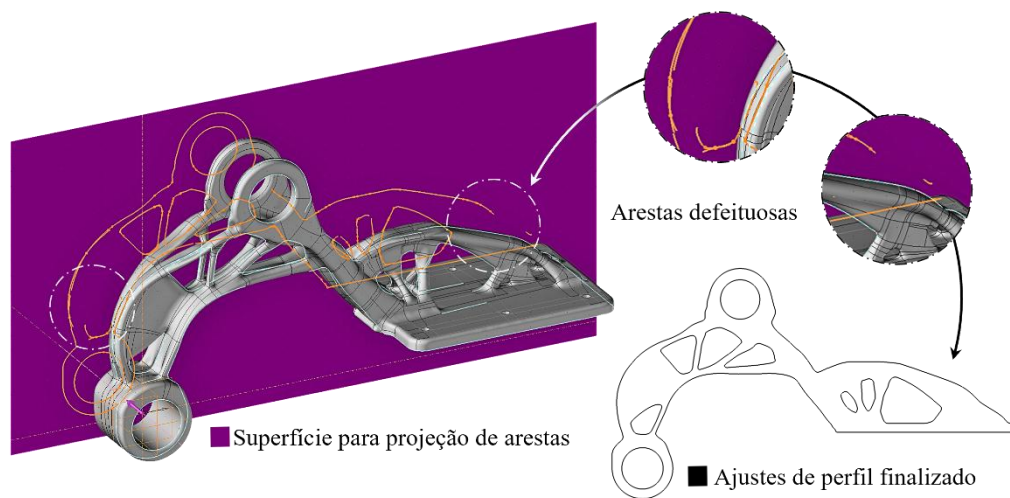


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após a projeção do modelo otimizado para compreensão de sua geometria, foi desenvolvida uma superfície plana com um *offset* de 30 mm em relação ao plano central do modelo otimizado. Em seguida, através de ferramentas de *sketch* 3D, foi realizada a projeção

de arestas na superfície plana anteriormente criada. Devido ao alto nível de detalhamento geométrico da OT, com partes isentas de arestas, foi exigida a configuração final do *sketch* utilizando recursos de ajuste de continuidade e combinação de perfis, reparando partes sobrepostas com remoção e divisão de segmentos. Esses ajustes mantêm a curvatura do perfil, permitindo a confiabilidade da reconstrução. A Figura 28 apresenta esse processo.

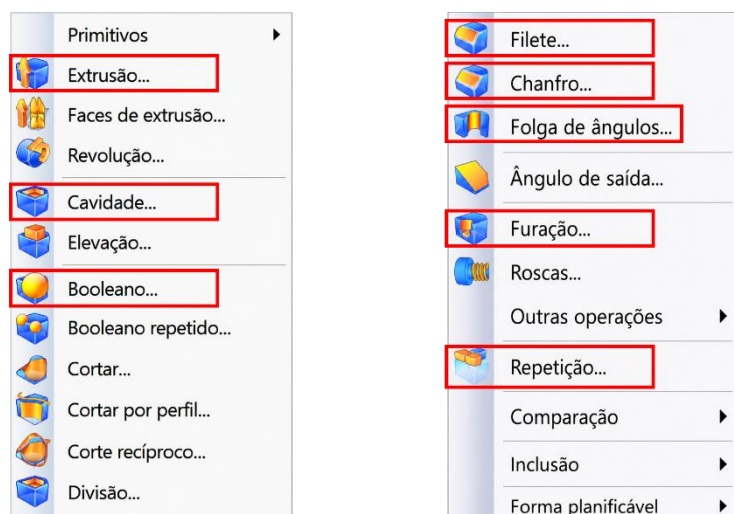
Figura 28. Projeção das arestas e configuração final do *sketch*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Com a projeção do perfil do componente otimizado, o modelo de aplicação do DFM foi baseado no perfil resultante da aresta, construindo geometrias iniciais através da referência obtida no processo anterior. Para o novo componente, as principais ferramentas utilizadas para a obtenção de novas formas e características foram: extrusão, ângulo de saída, cavidade, chanfro, entre outros. A Figura 29 demonstra o menu utilizado para a construção do modelo DFM com os recursos CAD aplicados destacados.

Figura 29. Menu do *software* para construção do modelo DFM.



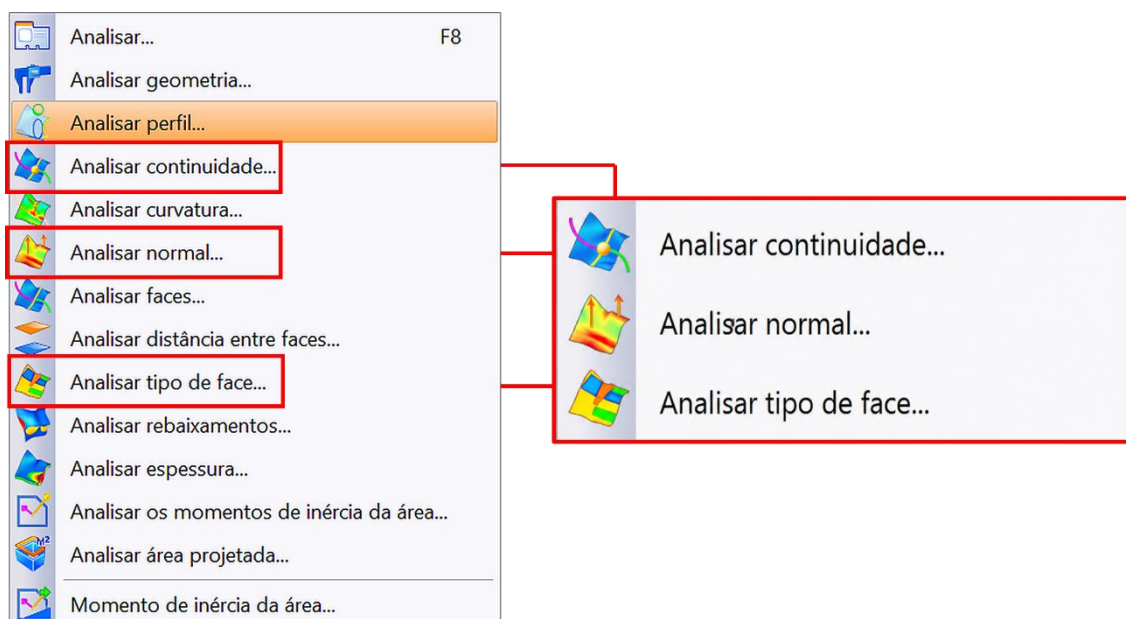
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Diante da obtenção do modelo submetido à metodologia DFM, tornou-se necessária uma nova análise estrutural para a verificação preliminar do componente. Para a realização desta análise, utilizaram-se os mesmos parâmetros e condições de contorno aplicados na Figura 12, presente na seção "3.2.1. Condições de Contorno e Preservação das Regiões".

3.5. Avaliações Geométricas Preliminares para Programação CAM Após o DFM

O procedimento atual consiste na pré-avaliação da geometria obtida durante o processo de DFM, visando avaliar a complexidade do modelo anteriormente à programação CAM. Esta etapa consiste nas mesmas análises realizadas antes da programação da dobradiça otimizada topologicamente, sendo elas: análises de normais, continuidade geométrica e tipos de faces. A Figura 30 demonstra o campo onde foram selecionadas estas análises.

Figura 30. Seleção das análises de normais, continuidade e tipos de faces.



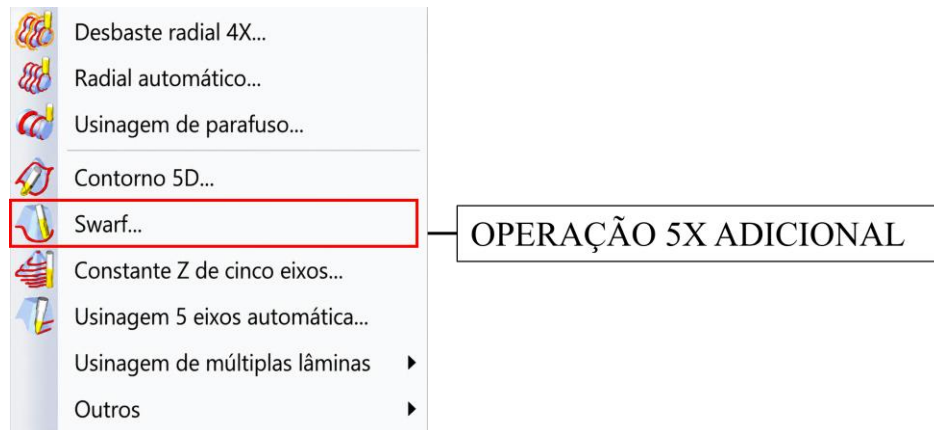
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.6. Programação CAM do Componente Após DFM

Após a inclusão da metodologia DFM e das análises estruturais e geométricas realizadas, iniciou-se uma nova etapa de programação CAM, visando avaliar os impactos das modificações para elevar a manufaturabilidade. As definições relacionadas ao *setup*, métodos de fixação por orelhas, ambiente CAM utilizado e configurações gerais de programação seguiram os mesmos critérios apresentados na Seção 3.3.4, sendo abordadas nesta etapa apenas as alterações decorrentes da aplicação do DFM.

Devido às significantes modificações geométricas, principalmente pela eliminação de características orgânicas, houve alterações nas operações selecionadas para a programação CAM, reduzindo grande parte do emprego de estratégias 3D. Na Figura 31 é ilustrada a operação adicional nomeada de “*Swarf*”, aplicada durante a programação do DFM,

Figura 31. Operação de usinagem adicional após DFM.

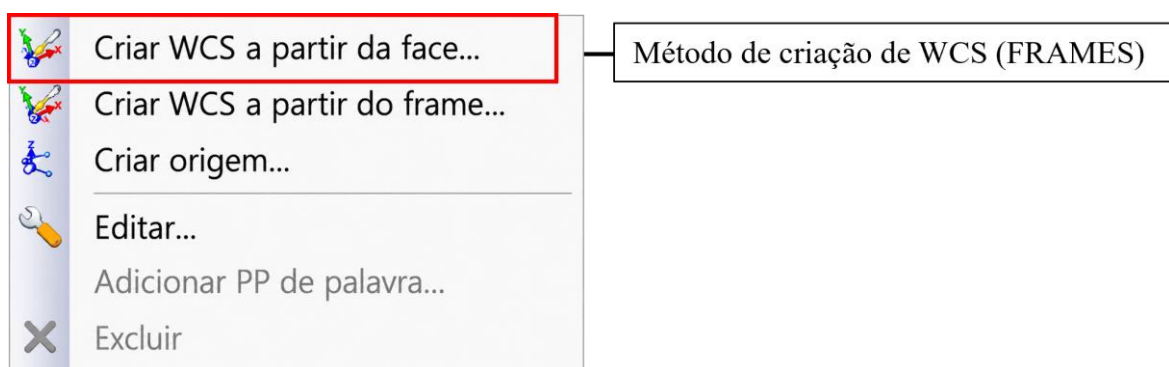


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.6.1. Métodos de Indexação, Orientação de Ferramenta e Limitação Após DFM

Para os métodos mensurados nesta seção, utilizaram-se os mesmos meios de desenvolvimento em relação ao modelo otimizado, alterando-se apenas a proporção de aplicação. A maior variação desta etapa baseia-se no modo de criação dos *frames* de indexação, sendo adotada, devido às novas necessidades, a criação de *frames* a partir de faces geométricas como referência. A Figura 32 ilustra a funcionalidade utilizada durante a programação do modelo DFM.

Figura 32. Criação de *frame* após DFM.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise Estrutural da Peça Original

A título de comparação, foi realizada uma breve análise estrutural da peça original, com o objetivo de estabelecer uma referência comparativa para as análises dos modelos otimizado e DFM. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros obtidos no modelo original.

Modelo	Deslocamento [mm]	Tensão [Mpa]	Massa [g]	FOS	Volume [cm³]
Original	0,125	260	261	1,94	92,9

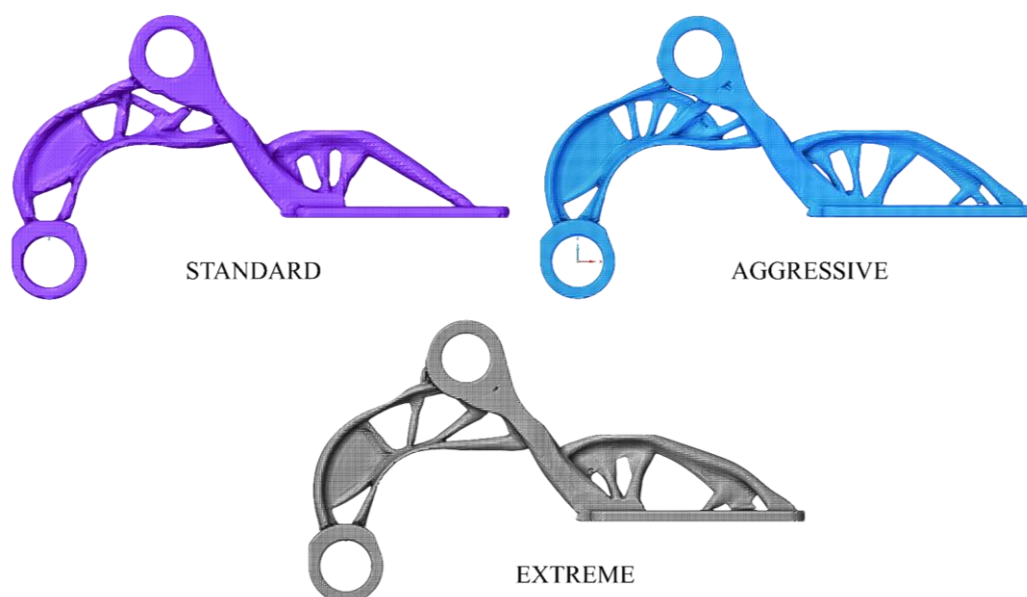
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conforme apresentado na Tabela 1, os resultados obtidos servem como referência para avaliar os impactos das modificações geométricas introduzidas pelos processos de otimização topológica e de DFM. Dessa forma, torna-se possível verificar se a redução de massa obtida nos modelos modificados acompanhou as condições estruturais.

4.2. Análise Estrutural e Reconstrução Geométrica (OT)

Com o objetivo de avaliar os resultados obtidos na otimização topológica, os níveis de fidelidades foram comparados entre os modelos *Standard*, *Aggressive* e *Extreme*. A comparação entre os modelos foi realizada considerando os parâmetros como geometria, massa final, tensão máxima, deslocamento máximo, fator de segurança (FOS) e volume. A Figura 33 apresenta a geometria obtida para cada modelo após a otimização topológica.

Figura 33. Geometria obtida para cada modelo com níveis de fidelidade (*Standard*, *Aggressive* e *Extreme*).

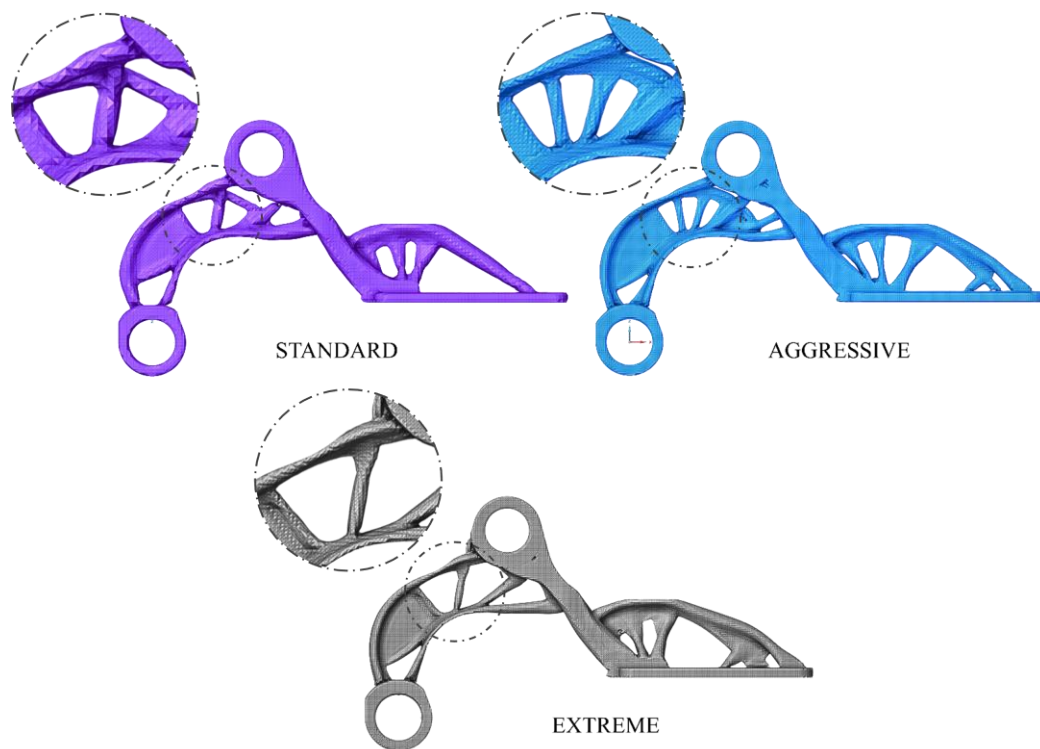


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os modelos de fidelidades analisados apresentaram geometrias semelhantes em relação à distribuição global de material, mantendo a configuração estrutural da peça antes da OT. No entanto, há diferenças relacionadas ao refinamento geométrico e à definição dos caminhos estruturais.

O modelo *Standard* apresentou superfícies menos suavizadas e regiões com detalhamento geométrico inferior, o que resultou em uma topologia simplificada. Já os modelos *Aggressive* e *Extreme*, apresentaram superfícies mais suavizadas e uma definição clara dos elementos estruturais internos, principalmente nas regiões curvas e nos reforços. A Figura 34 detalha a diferenças observadas entre os modelos otimizados.

Figura 34. Diferenças entre os modelos otimizados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Tabela 2 apresenta a comparação dos parâmetros de massa final, tensão máxima, deslocamento máximo, fator de segurança e volume entre os diferentes modelos de fidelidade avaliados.

Tabela 2. Parâmetros obtidos em cada modelo.

Modelo	Deslocamento [mm]	Tensão [Mpa]	Massa [g]	FOS	Volume [cm ³]
<i>Standard</i>	0,212	176	103	2,86	36,7
<i>Aggressive</i>	0,222	216	103	2,33	36,8
<i>Extreme</i>	0,234	270	104	1,86	37,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O modelo *Standard* apresentou menor deslocamento estrutural, melhor distribuição de tensões e um fator de segurança elevado, apresentando um melhor desempenho em comparação aos modelos *Aggressive* e *Extreme*.

Após a etapa de reconstrução geométrica utilizando as superfícies SUBD, obteve-se uma inversão no comportamento estrutural das três configurações analisadas. O modelo *Extreme* passou a apresentar os melhores desempenhos estruturais entre as demais

configurações, depois o modelo *Aggressive*, enquanto o modelo *Standard*, antes considerado o melhor, apresentou pior desempenho estrutural após a reconstrução. A Tabela 3 evidencia essa mudança de desempenho após a aplicação do SUBD.

Tabela 3. Parâmetros obtidos em cada modelo após a reconstrução geométrica.

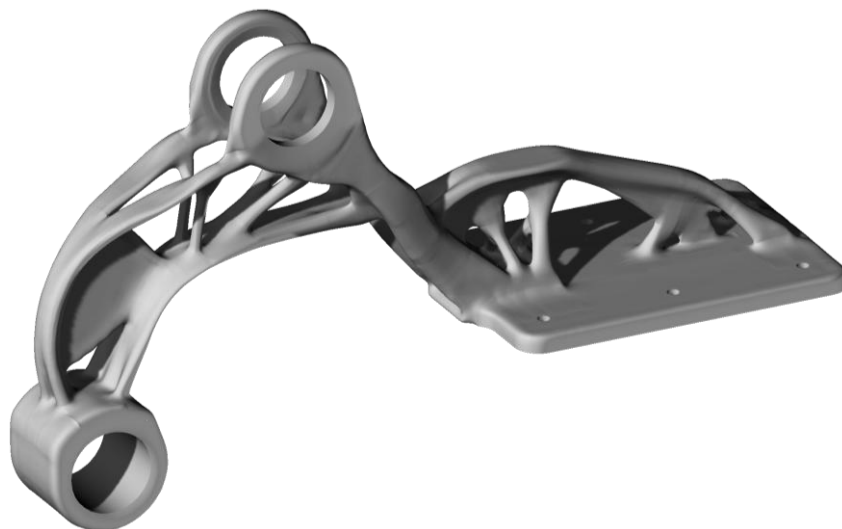
Modelo	Deslocamento [mm]	Tensão [Mpa]	Massa [g]	FOS	Volume [cm³]
<i>Standard</i>	0,266	397	102,21	1,27	38,36
<i>Aggressive</i>	0,251	386	102,23	1,3	38,38
<i>Extreme</i>	0,248	374	103,13	1,35	36,7

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Este comportamento tem relação com a influência do nível de fidelidade geométrica da otimização topológica sobre a etapa posterior de reconstrução, visto que modelos com maior refinamento geométrico tendem a preservar com mais consistência os principais caminhos de carga e a continuidade estrutural após a adaptação realizada no processo SUBD (BENDSOE; SIGMUND, 2004).

Por esse motivo, o modelo *Extreme* foi o escolhido entre as três configurações de fidelidades, por apresentar o maior refinamento geométrico, que proporcionou uma definição mais clara dos membros estruturais e uma representação fiel da distribuição de material obtida pela otimização topológica. A Figura 35 apresenta o modelo escolhido após a reconstrução.

Figura 35. Modelo *Extreme*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conforme observado na Tabela 3, o modelo *Extreme* apresentou uma redução de peso de aproximadamente 60% em relação à peça original, considerando os parâmetros de massa/volume.

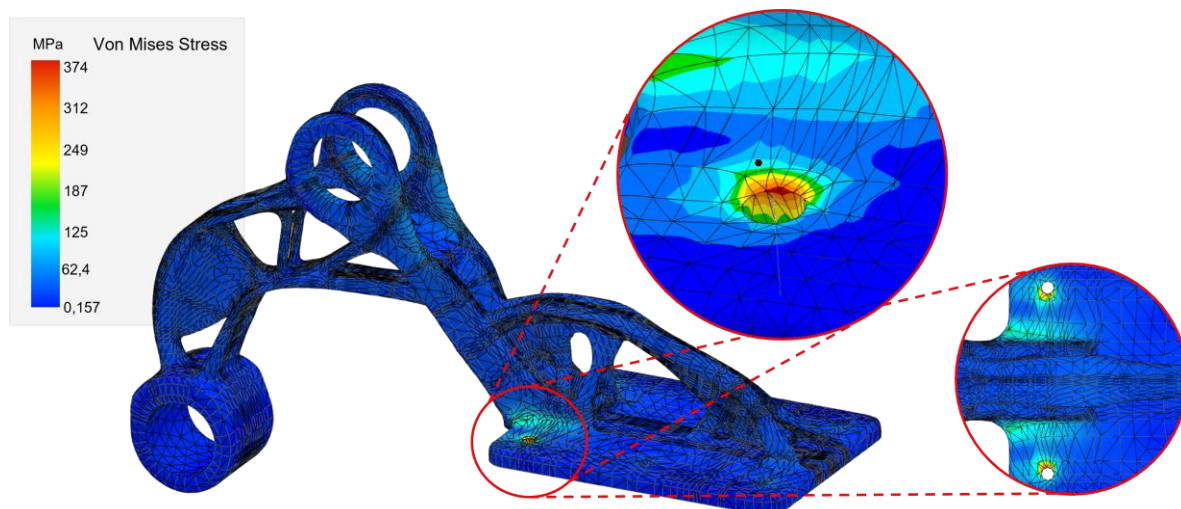
Comparando-se o modelo original com o modelo *Extreme*, observou-se uma redução de massa de 261 g para 103,13 g e uma redução de volume de 92,9 cm³ para 36,7 cm³. Com isso, houve uma redução aproximada de 157,87 g no componente. Considerando que o processo de otimização topológica foi configurado com objetivo de redução de 60% do peso, os resultados obtidos demonstraram que a otimização atendeu aos parâmetros estabelecidos.

Em relação às análises estruturais realizadas, o modelo *Extreme* apresentou um aumento na tensão máxima e no deslocamento, além da redução do fator de segurança, em relação ao modelo original. Esses comportamentos são esperados, visto que a otimização remove material das regiões menos solicitadas, resultando em uma área resistente menor.

Apesar dessas alterações, a tensão máxima do modelo otimizado permaneceu abaixo do limite de escoamento do alumínio 7075, que é de aproximadamente 503 Mpa, indicando que a estrutura continua suportando os carregamentos aplicados sem que ocorra deformação plástica. Em relação ao deslocamento, o valor obtido dobrou em relação a peça original, resultando em uma redução na rigidez estrutural. O fator de segurança se mostrou o ponto mais crítico, reduzindo de 1,94 para 1,35; ainda sim, permanece acima de 1, indicando que a peça não entra em escoamento nas condições analisadas. Entretanto, 1,35 é considerado relativamente baixo para aplicações aeronáuticas.

Essa redução no FOS está associada à distribuição de tensões identificada ao longo do modelo, especialmente nas regiões de maior concentração. Após a análise de Von Mises, a região dos furos apresentou uma alta concentração de tensão, essa geometria conta com a ausência de raios de concordância. A otimização topológica frequentemente gera cantos vivos, regiões finas, transições bruscas etc. Essas regiões intensificam a concentração de tensões, elevando os valores de Von Mises local e reduzem o FOS do componente (PILKEY et al., 2020). A Figura 36 demonstra a região dos furos com a maior concentração de tensão do modelo *Extreme*.

Figura 36. Região com maior concentração de tensão do modelo escolhido.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

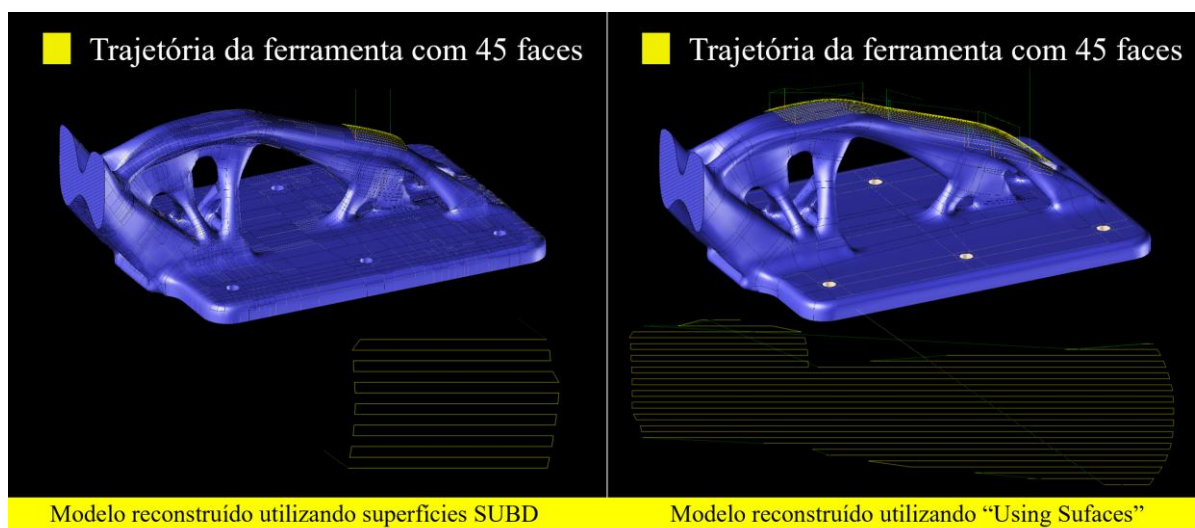
4.3. Análises Geométricas Pré-CAM do Modelo Otimizado

4.3.1. Análise da Fragmentação Superficial em Trajetórias de Programação CAM

Com o objetivo de avaliar a fragmentação superficial ocasionada pela reconstrução geométrica, o modelo selecionado foi submetido preliminarmente ao ambiente CAM, visando compreender sua estrutura e a influência dessa divisão na geração de trajetórias durante a programação de uma operação de acabamento 3D. Buscou-se também identificar alternativas para a redução do número de faces do modelo, caso necessário.

Os resultados iniciais demonstram que a reconstrução geométrica realizada pelo recurso SUBD resultou em uma divisão de faces elevada, gerando caminhos de usinagem ineficientes e uma sobrecarga operacional no encadeamento de faces durante a criação da operação de acabamento selecionada. Sendo assim, outra abordagem de reconstrução geométrica foi realizada por meio da ferramenta “*Using Surfaces*”, que proporcionou uma redução significativa de faces, otimizando o desempenho operacional e apresentando um percurso de ferramenta com maior eficácia em relação ao primeiro modelo. Para garantir a coerência na comparação entre os modelos, os mesmos critérios de quantidade de faces selecionadas foram aplicados em ambos os casos. Na Figura 37 é representada a diferença obtida na trajetória programada devido à característica geométrica de cada reconstrução.

Figura 37. Diferença na trajetória programada.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conforme observado na Figura 37, o modelo reconstruído por meio do recurso "*Using Surfaces*" do Ansys Discovery apresentou maior continuidade superficial, influenciando diretamente na geração de trajetórias programadas e permitindo caminhos mais longos e uniformes. Em contrapartida, o modelo obtido por meio da função SUBD resultou em uma fragmentação excessiva, apresentando um percurso de ferramenta descontínuo, mesmo com a seleção da mesma quantidade de faces.

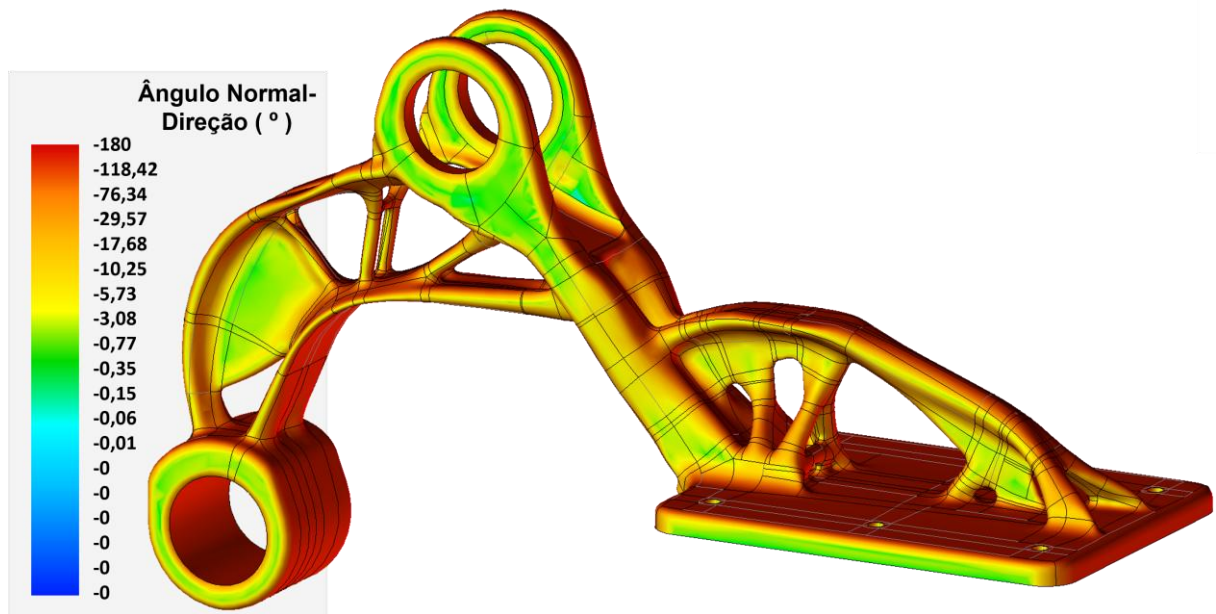
Vale ressaltar que existem outras formas de seleção de geometria, como a criação de *sketch*. No entanto, esta análise revela que a fragmentação geométrica interfere diretamente no funcionamento do CAM, podendo impactar não apenas este estudo, mas também o desempenho operacional, o processamento computacional, entre outros fatores.

4.3.2. Análises de Normais Superficiais

Durante as análises geométricas, foram realizados estudos para a compreensão das orientações angulares do componente otimizado, com o objetivo de entender o comportamento das operações selecionadas durante a programação CAM.

Devido ao alto detalhamento geométrico ocasionado pelas estruturas orgânicas resultantes do processo de OT, o modelo avaliado apresentou grande variação angular em toda a sua superfície. A Figura 38 determina o comportamento das normais em relação a uma direção específica selecionada.

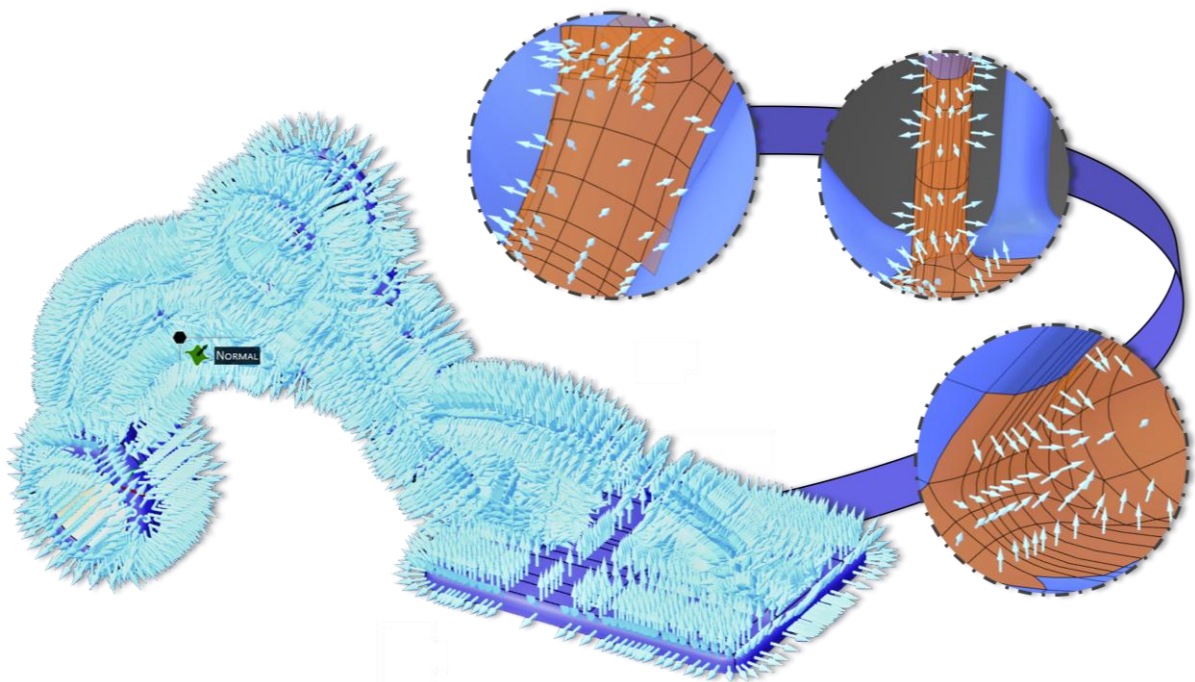
Figura 38. Comportamento das normais em relação a uma direção.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 39 demonstra o comportamento global de normais, indicado por setas distribuídas na superfície do componente.

Figura 39. Comportamento global das normais distribuídas na superfície da peça.



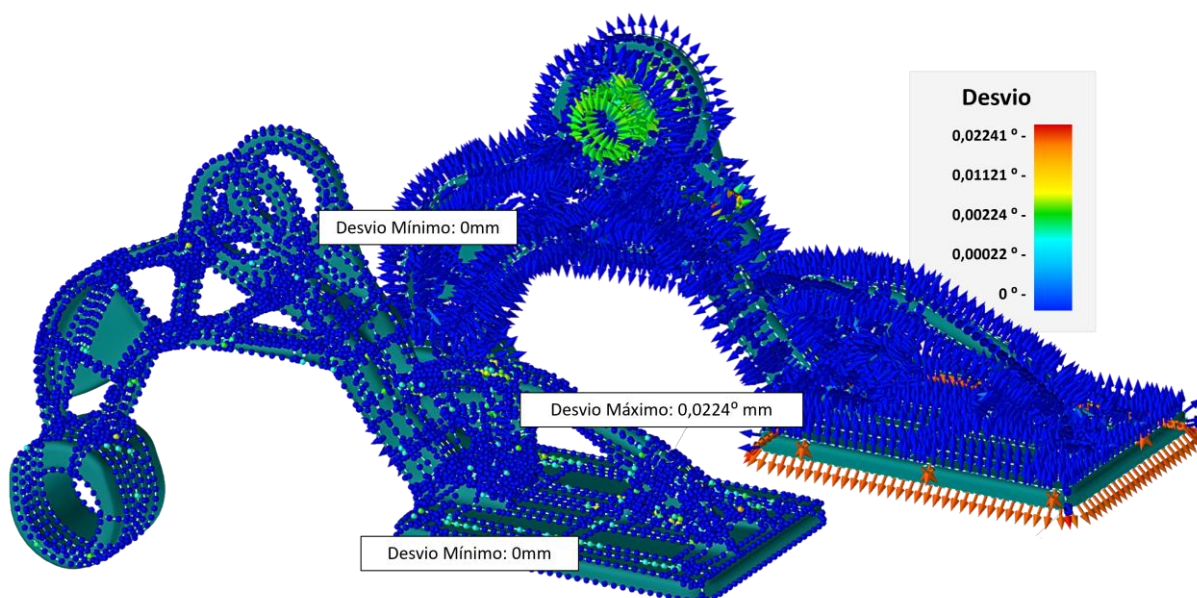
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A avaliação de normais demonstrou que o modelo analisado apresentou regiões com elevada variação angular de forma genérica. Essas variações, provenientes do processo de OT, desempenham um comportamento importante durante as estratégias CAM selecionadas, exigindo um controle rigoroso da orientação da ferramenta durante a programação. Além disso, regiões com transições angulares bruscas tendem a aumentar a complexidade da programação CNC, devido à necessidade de refinamentos de orientação e de zona de contato da ferramenta de corte em situações de inclinações abruptas.

4.3.3. Análises de Continuidade de Arestas e Tangência Superficial

Neste estudo também foram realizadas análises de continuidade superficial da geometria obtida por meio do recurso "*Using Surfaces*", visando mapear eventuais defeitos geométricos e seus impactos durante a programação. As análises de continuidade de arestas e tangência demonstraram resultados dentro dos parâmetros exigidos para a programação CAM, evidenciando adequada continuidade superficial para as operações previstas. A Figura 40 apresenta os respectivos valores mensurados nas análises de continuidade de arestas e tangência.

Figura 40. Valores obtidos nas análises de continuidades.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As análises apresentadas demonstram que, apesar do alto nível de complexidade da reconstrução geométrica, os resultados obtidos não apresentam impacto direto no processo de

programação CNC. Em termos de continuidade, o modelo extraído por meio da ferramenta "Using Surfaces" não necessita de tratamento com recursos CAD para reparo geométrico. A análise de tangência revelou que o maior valor identificado não está associado às geometrias orgânicas do modelo, tratando-se de uma característica geométrica proveniente do *design* original, anterior ao processo de OT. Já a descontinuidade de arestas ocorreu de forma pontual, com valores centesimais controláveis dentro das condições exigidas para um fluxo contínuo de programação.

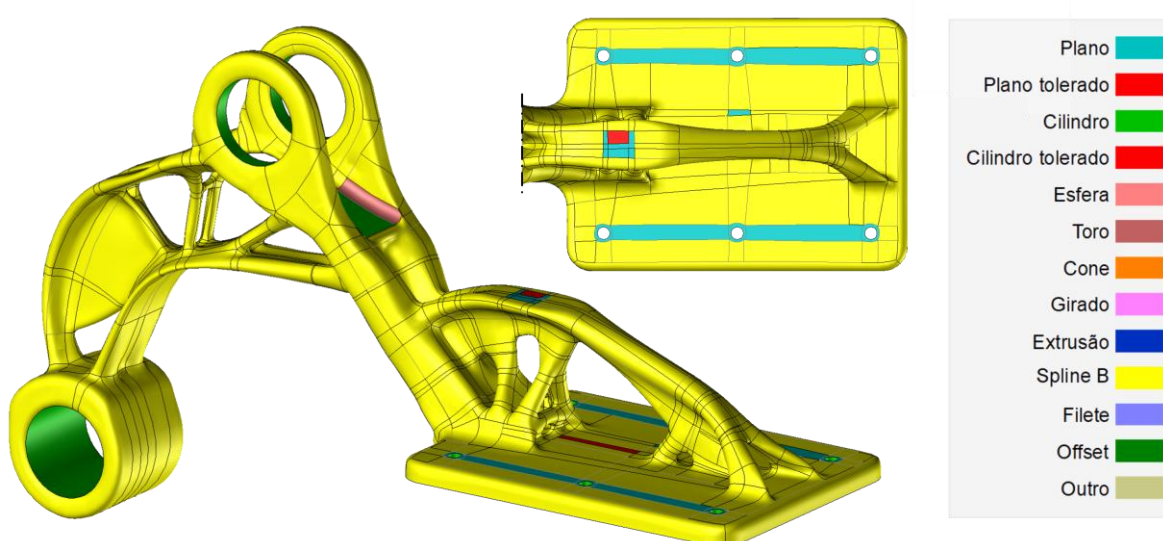
Vale ressaltar que, diante de um caso com inúmeras irregularidades geométricas, a fase de reparo geométrico é essencial, pois essas irregularidades podem ocasionar não conformidades reais nos processos de usinagem e comprometer o fluxo contínuo de programação.

4.3.4. Análise do Tipo de Face

A última etapa de análise antes da programação CAM consiste na verificação do tipo de face do modelo selecionado. O foco principal desta etapa é, por meio da visualização gráfica, identificar os tipos de operações que podem ser empregadas durante a programação.

A análise realizada demonstra que o tipo de face predominante consiste no tipo “*spline*”. A Figura 41 ilustra o tipo de face predominante e as demais variações identificadas de menor predominância.

Figura 41. Faces predominantes no modelo otimizado.



As análises dos tipos de faces demonstraram a proporção de geometrias do tipo *spline* em grande parte da superfície reconstruída. Além das superfícies *spline*, geometrias toroidais, planas e cilíndricas, também foram identificadas na análise realizada.

O alto emprego dessas superfícies influencia diretamente o comportamento das estratégias CAM criadas, principalmente em operações simultâneas de acabamento, exigindo um controle minucioso de orientação. Outro aspecto relevante a ser considerado é o potencial custo elevado de fabricação, dado que estratégias de acabamento 3D são necessárias devido à variação e complexidade de curvatura das superfícies predominantes.

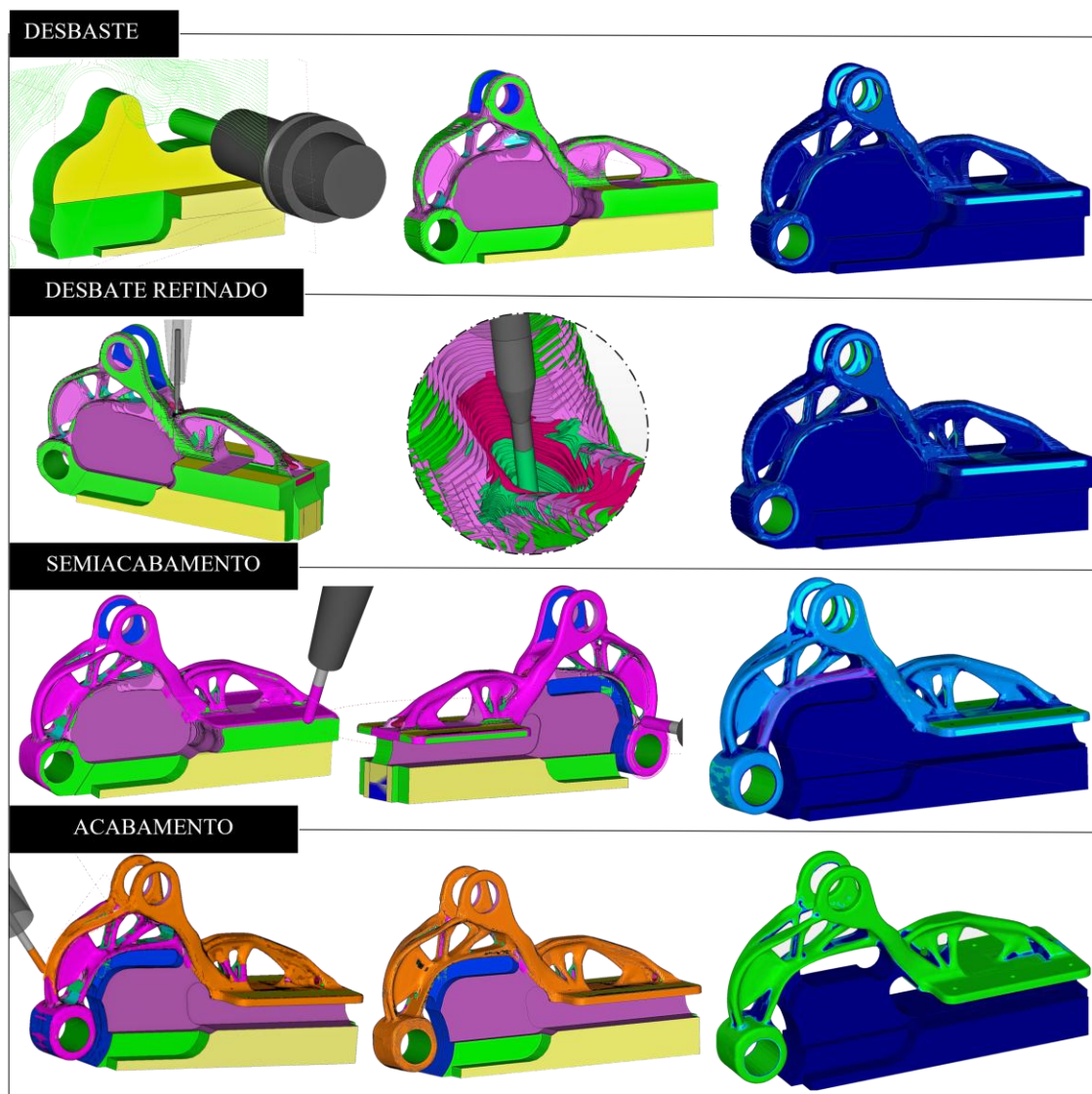
4.4. Resultados da Programação CAM do Modelo Otimizado

Após as análises geométricas preliminares, deu-se início à programação CAM do modelo otimizado, visando avaliar os impactos geométricos durante a programação do componente. Para isso, foram abordados de forma prática os efeitos da otimização topológica e da geometria resultante sobre as operações CAM.

4.4.1. Operações de Usinagem Selecionadas

Devido à elevada complexidade geométrica presente no componente submetido à programação CAM, houve a necessidade de uma diversificação na seleção das estratégias de usinagem ao longo do processo. Conforme ilustrado na Figura 42, foram aplicadas operações de desbaste, refinamento, semiacabamento e acabamento.

Figura 42. Estratégias de usinagem utilizadas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Devido às regiões com elevado nível de detalhamento geométrico provenientes da otimização topológica, diversas áreas exigiram operações adicionais para aproximação da geometria final, tornando necessário o retrabalho de desbaste com ferramentas de menor diâmetro, visando a usinagem de zonas de difícil acesso.

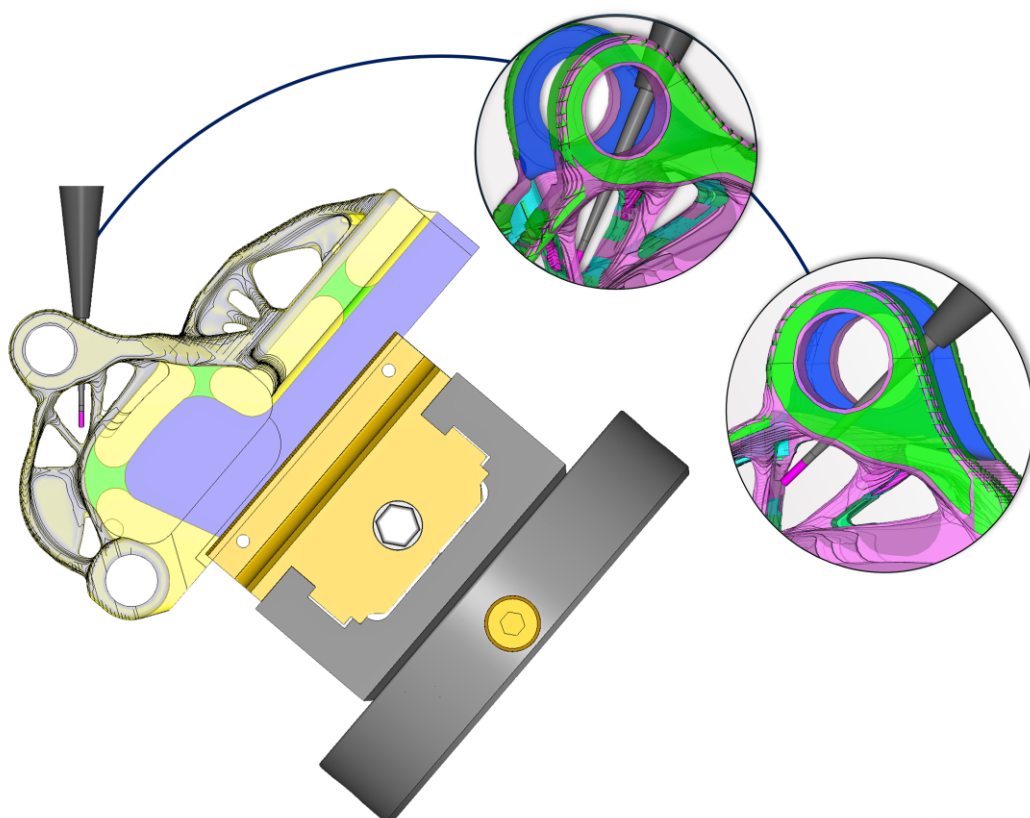
Além do refinamento das regiões críticas, a dependência de estratégias de usinagem 3D para operações de acabamento tornou-se recorrente durante a programação, integrando configurações avançadas de limitação de orientação da ferramenta para adaptação às superfícies orgânicas e conclusão das operações.

4.4.2. Acessibilidade Ferramental

A acessibilidade ferramental é um aspecto necessário para a fabricação de componentes usinados. Durante a programação CAM, devido à presença de áreas profundas e superfícies geometricamente complexas, resultantes do processo de OT, houve uma grande dificuldade para a conclusão da programação da peça otimizada.

Os resultados de acessibilidade apresentaram necessidade operacional para garantir um acesso viável durante as trajetórias de corte programadas, resultando em alto controle de inclinação da ferramenta, principalmente em operações simultâneas sobre áreas críticas. A Figura 43 ilustra a configuração da ferramenta atuando em uma região de difícil acesso, resultando em interferências na geometria final da peça, evidenciando a dificuldade de programação em regiões geometricamente desfavoráveis para usinagem e a necessidade de adaptação do ferramental.

Figura 43. Configuração da ferramenta.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O modelo otimizado demonstrou regiões com difícil acesso ferramental, exigindo configurações específicas para o controle de orientação durante operações simultâneas. Além

disso, regiões com curvaturas fechadas e detalhes profundos tornaram necessária a redução do diâmetro da ferramenta e a utilização de sistemas de porta ferramenta prolongados, visando aumentar a acessibilidade e evitar colisões durante a usinagem de zonas desafiadoras.

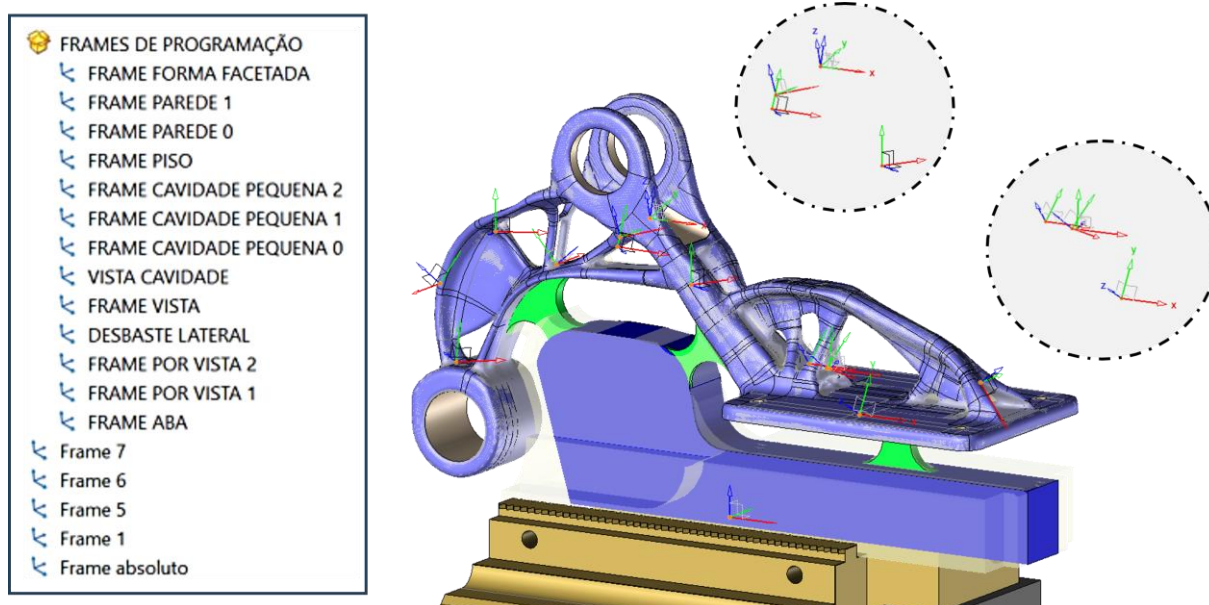
Com o alto impacto operacional ocasionado pelas características do processo de OT, obteve-se um tempo elevado para configuração dos percursos nessas regiões. Além disso, nas condições reais de processo, a combinação de ferramentas longas com diâmetros pequenos, tendem a induzir fenômenos de vibrações durante o processo de usinagem CNC, fatores críticos e prejudiciais para componentes destinados a aplicações aeronáuticas.

4.4.3. Controle de Orientação e Indexação Ferramental

Durante a programação do componente otimizado, diversos métodos e funções fizeram-se necessários para o controle angular durante as operações de usinagem realizadas. Essas adaptações estão diretamente associadas ao impacto geométrico orgânico diante diferentes operações CAM.

Para desenvolvimento e aplicações das respectivas operações de usinagem aplicadas ao processo de fabricação, foram criados múltiplos *frames* para a indexação das diferentes regiões do modelo otimizado. A Figura 44 ilustra os respectivos *frames* criados, visando fornecer as indexações, demonstrando o impacto geométrico da peça.

Figura 44. Frames criados para indexações.

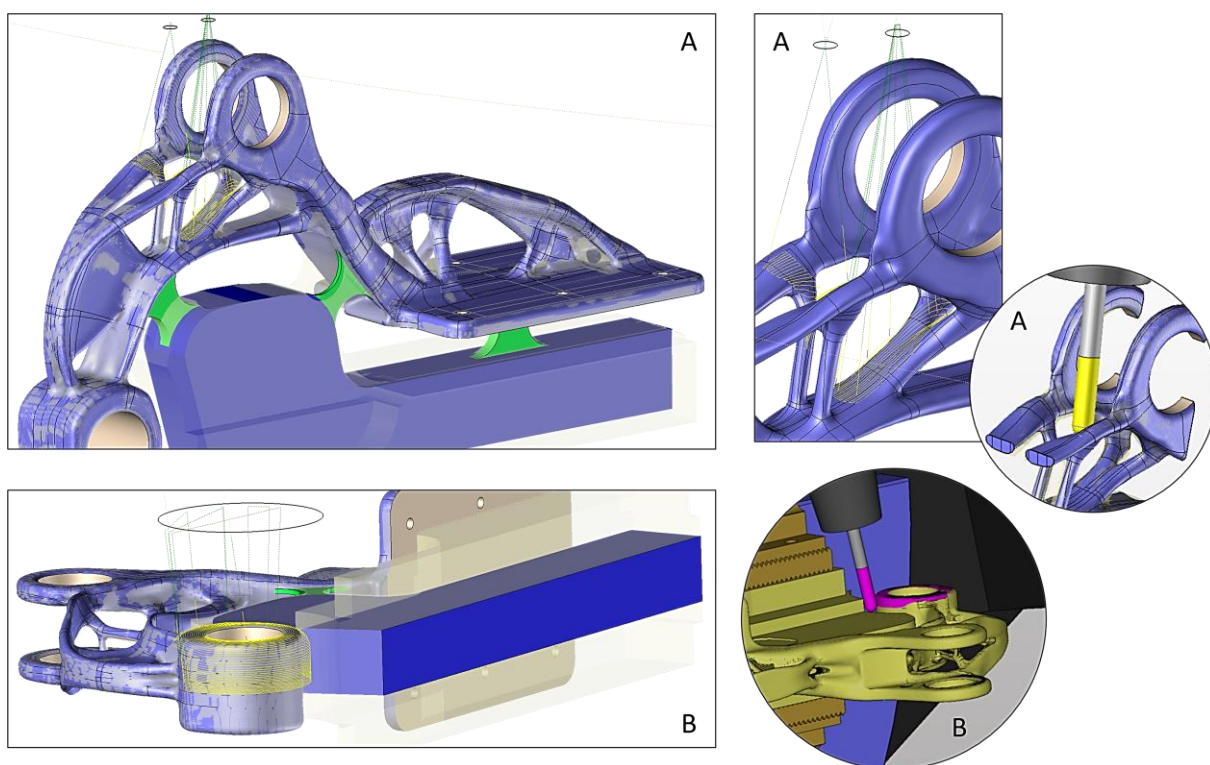


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A ilustração realizada demonstra uma etapa constante de criação de novas configurações de indexação, este aspecto retrata o ajuste excessivo operacional para a construção de novas operações de usinagem no estágio CAM, mensurando os desafios para o alcance de distintas regiões da peça. A criação de inúmeros *frames* durante operações de desbaste com maior recorrência em relação à usinagem de acabamentos simultâneos, também ressalta a ausência de referências geométricas convencionais do modelo otimizado, exigindo refinamentos adicionais nas orientações da ferramenta.

Além das criações de indexações, predominantemente em etapas de desbaste, determinadas operações CAM, com enfoque em processo de acabamento simultâneo em 5 eixos, exigiram configurações auxiliares para estabilização do percurso programado, controle preciso de trajetórias e região de corte da ferramenta. A Figura 45 aborda recursos utilizados para a conclusão desta etapa.

Figura 45. Recursos utilizados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Considerando a Figura 45 percebe-se a necessidade da aplicação de métodos que exigem a maior expertise operacional para o gerenciamento de inclinação em operações de acabamento com 5 eixos simultâneos. Estas aplicações visam não somente controlar de forma criteriosa o

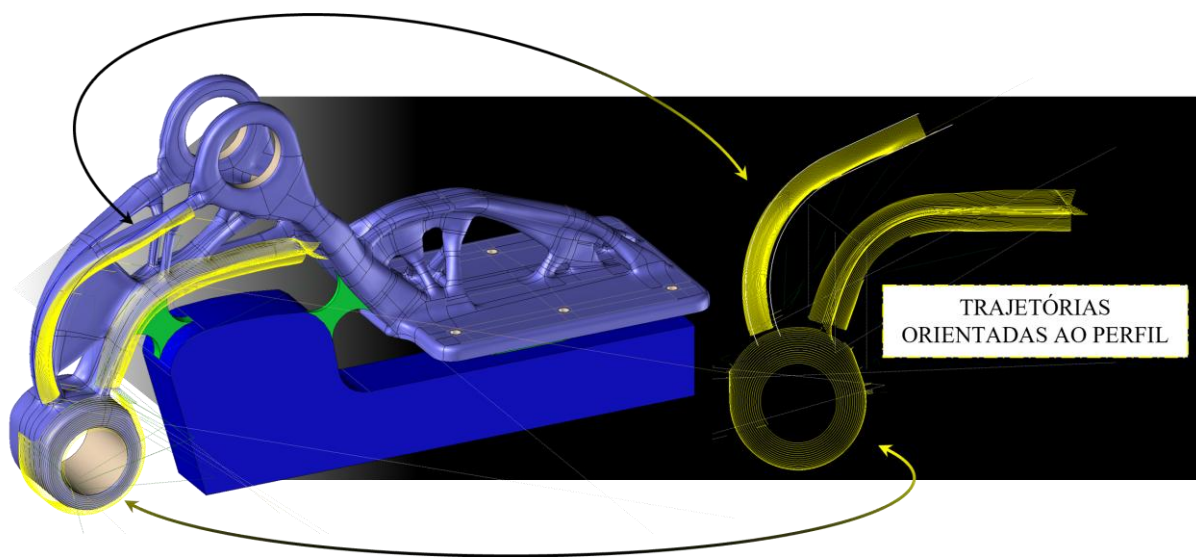
trajeto de ferramenta, obtendo uma maior previsibilidade de percursos, mas também garantir a melhor zona de contato da fresa esférica em etapas finais de acabamento. De acordo com Chen et al. (2005), cortes em regiões centrais ocasionam acabamento superficial indesejado, devido a baixas velocidades de corte nessa região. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a relevância do controle da região de corte efetivo da ferramenta submetida as operações de acabamento.

4.4.4. Comportamento Global das Trajetórias de Usinagem

As trajetórias geradas durante a programação CAM apresentaram diferentes configurações ao longo das superfícies do modelo analisado. Esses resultados permitiram identificar os principais desafios baseando se diretamente na geometria usinada.

As características de curvaturas orgânicas existente na peça otimizada, exigiram acompanhamentos de perfis durante o desenvolvimento da programação, resultando em trajetos orientados pelas direções das superfícies. A Figura 46 ilustra os caminhos de usinagem adaptado ao perfil geométrico do componente.

Figura 46. Caminhos de usinagem adaptados.



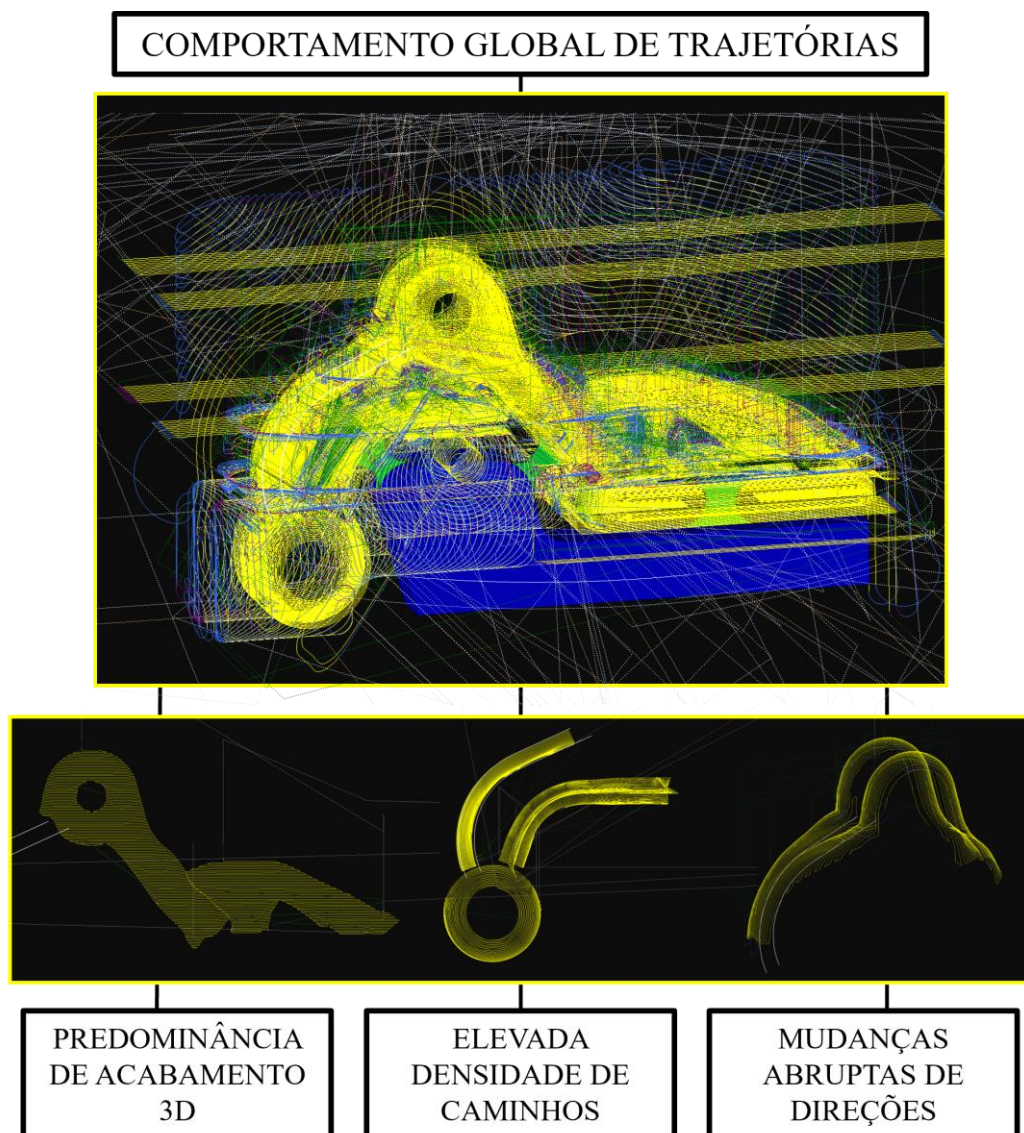
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Durante a programação do componente otimizado, elevadas necessidades de orientações de caminho de ferramenta tornaram-se indispensáveis. Após a aplicação de testes de operações e trajetórias, observou-se que caminhos orientados resultaram em maior eficiência, obtendo a melhor estratégia de usinagem aplicada ao tipo de geometria aplicada.

Apesar da eficiência de caminhos aderentes à geometria da peça, estas regiões exigiram aumento significativo de refinamento durante o desenvolvimento, consecutivamente, devido à criticidade, aumentando a densidade de trajetórias percorridas.

Diante de diversas configurações, a respectiva geral das trajetórias de programação apresentou alta densidade de percursos, com caminhos de usinagem atribuídos e abrangendo praticamente toda a superfície da peça. Na Figura 47 é demonstrado o aspecto geral de caminhos obtidos e condições periféricas existentes.

Figura 47. Caminhos obtidos na programação e condições periféricas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conforme a Figura 47, observa-se um volume alto de trajetos, resultantes dos desafios de programação. Diante da variação topológica constante das geometrias orgânicas, obteve-se

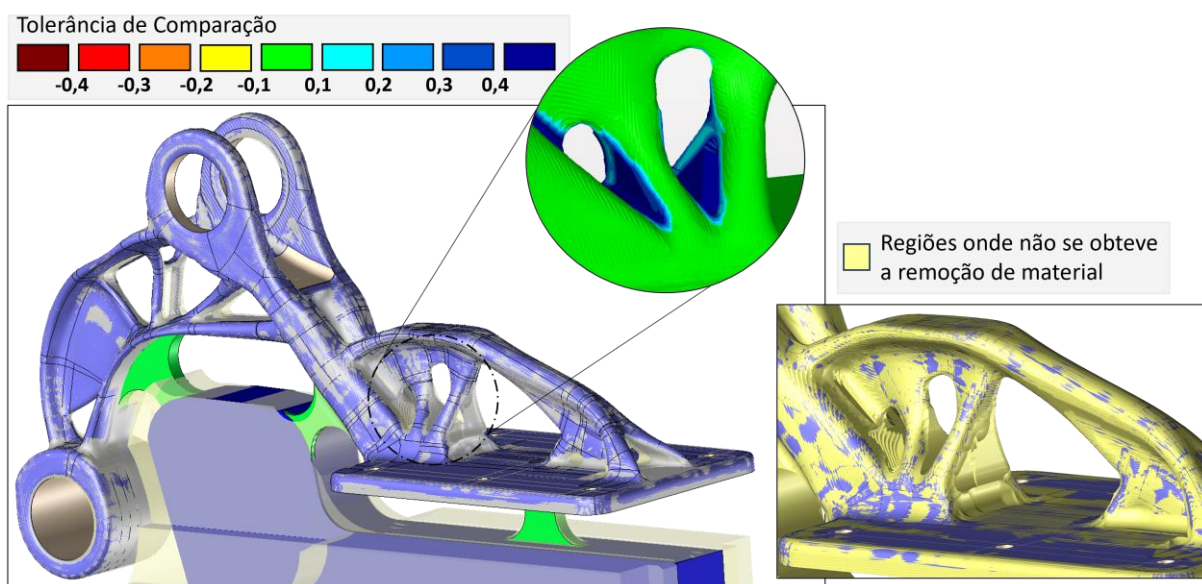
a necessidade de realizar estratégias de acabamento 3D por meios de passes radiais, abrangendo significativas proporções do componente. Com isso, resultou em maior densidade de caminhos e elevado custo de processamento das operações realizadas no estágio CAM.

Além da extensa densidade ocasionada pelo elevado emprego de estratégias 3D, fatores complementares como a sobreposição de caminhos devido à necessidade de indexações semelhantes, o refinamento de zonas críticas e o excesso de operações, além de uma expressiva quantidade de movimentos de ligação entre as diferentes estratégias, contribuíram diretamente para a elevada complexidade do comportamento global observado.

4.4.5. Limitações Operacionais Identificadas

Durante o desenvolvimento da programação do modelo otimizado, foram identificadas limitações e desafios operacionais decorrentes da elevada complexidade geométrica. Além das dificuldades tradicionais de geometrias orgânicas, relacionadas à acessibilidade, gerenciamento de orientação, observaram-se múltiplos recursos e adaptações auxiliares para viabilizar determinadas operações de usinagem. Na Figura 48 são demonstradas regiões críticas de difícil acesso onde não se obteve a remoção de material.

Figura 48. Regiões críticas de difícil acesso.



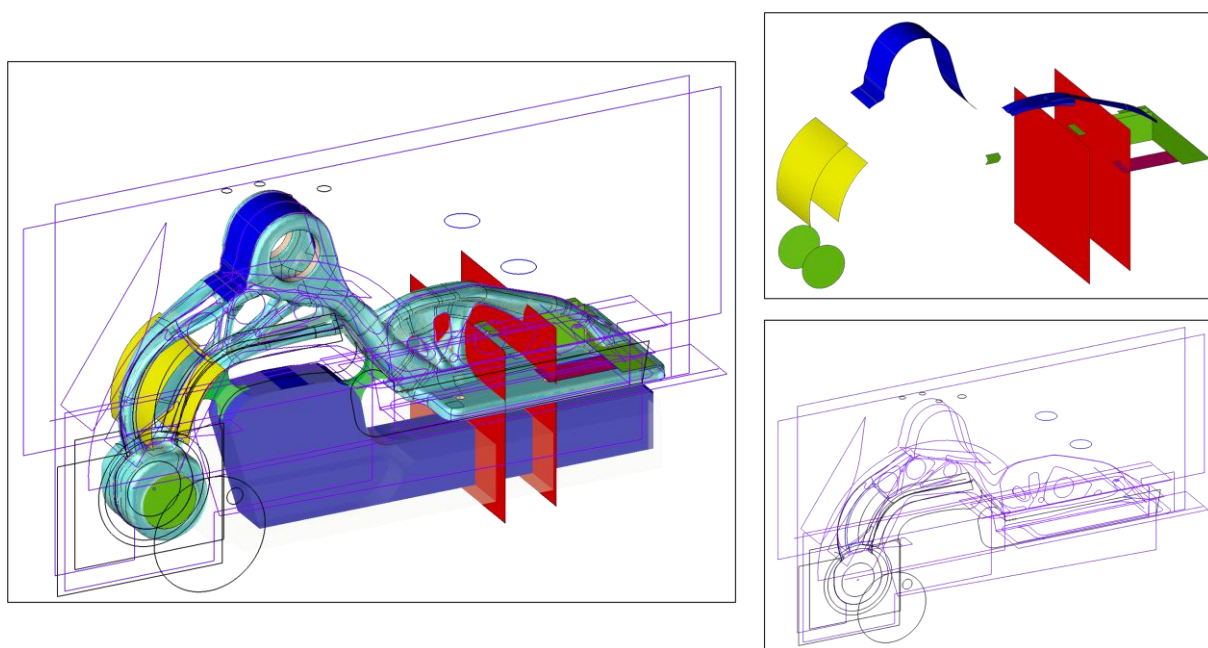
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 48 evidencia regiões compostas por geometrias extremamente desafiadoras para a aplicação de operações de usinagem, principalmente em termos de acesso e robustez do

processo aplicado. Por meio das análises técnicas realizadas, foi possível identificar áreas classificadas como extremamente críticas do ponto de vista da manufatura. Em um cenário industrial, essas regiões demandariam maior refinamento para garantir a conformidade da peça. Como alternativa, a redefinição do processo selecionado com a inclusão de operações adicionais de fabricação poderia ser necessária para viabilizar a usinagem dessas áreas. Esse aspecto demonstra que os desafios de programação podem ser ainda maiores quando considerados os requisitos reais de produção

Complementando essa análise, os desafios geométricos impactaram diretamente a quantidade de elementos contribuintes necessários para a programação CAM. A Figura 49 ilustra a quantidade de *sketches*, *frames* e superfícies auxiliares obtidos durante a programação CAM.

Figura 49. Quantidade de *frames*, *sketches* e superfícies auxiliares.

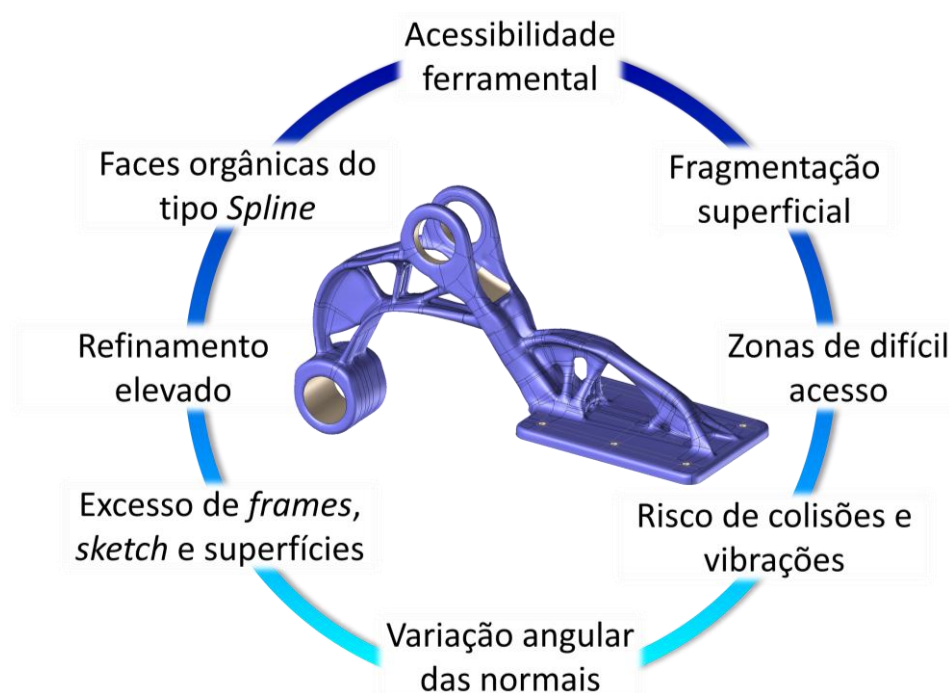


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conforme apresentado na Figura 49, é correto afirmar que o modelo otimizado e suas características geométricas influenciaram o excesso de criação de elementos integrados ao contexto CAD. Essas construções, de forma geral, fizeram-se necessárias para a criação de novas indexações, orientações e contenções de trajetórias, orientação da ferramenta, encadeamento de regiões de usinagem, entre outros.

De forma geral, os resultados da programação CAM após a OT evidenciaram que a elevada complexidade geométrica impactou diretamente a inserção do componente ao processo de usinagem em 5 eixos, com diferentes desafios periféricos ocasionados por geometrias de formas livres. A Figura 50 representa globalmente as principais dificuldades encontradas durante o desenvolvimento da dobradiça otimizada.

Figura 50. Principais dificuldades encontradas no desenvolvimento da peça.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Ilustrando os desafios encontrados durante o desenvolvimento da programação, a Figura 50 evidencia as principais barreiras de fabricação associadas à manufatura do componente, mesmo considerando as simplificações relacionadas à quantidade de ferramentas e às etapas de programação aplicadas neste estudo.

Adicionalmente, a presença de condições altamente desafiadoras sob a perspectiva da usinagem indica que, em um cenário industrial, a fabricação do modelo otimizado poderia demandar operações adicionais, maior diversidade de ferramentas de corte e refinamentos mais robustos para atender aos requisitos de confiabilidade exigidos pelo setor aeroespacial, onde essa família de peças é empregada. Dessa forma, os resultados obtidos justificam a aplicação de critérios de *Design for Manufacturing* (DFM), visando reduzir as limitações identificadas e promover uma melhor integração entre desempenho estrutural e viabilidade de fabricação.

4.5. Aplicação do DFM

A programação CAM do modelo otimizado apresentou limitações em relação a usinagem da peça. Por esse motivo, foi realizada a aplicação de modificações geométricas baseadas na metodologia de DFM, buscando melhorar aspectos relacionados a manufaturabilidade do componente. Na Figura 51 é apresentada a peça após a aplicação do DFM.

Figura 51. Geometria do componente após a aplicação do DFM.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As modificações realizadas incluíram remoção de regiões profundas, aplicação de raios e chanfros, suavização de transições, redução de cavidades, aumento da acessibilidade ferramental e eliminação de excessos de regiões necessárias de usinagem por varredura. As modificações foram realizadas com o objetivo de facilitar as futuras operações de usinagem, preservando a configuração estrutural obtida por meio da otimização topológica. Na Figura 52, é apresentada uma comparação entre o modelo otimizado e com DFM, com o intuito de evidenciar as modificações realizadas.

Figura 52. Comparação entre o modelo otimizado e o modelo com a aplicação do DFM.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O modelo DFM apresenta geometrias mais simples e regular que o modelo otimizado, que apresenta geometrias orgânicas. As formas livres e complexas geradas pela otimização topológica foram substituídas por uma geometria mais contida, com transições suaves e elementos estruturais, visando a fabricação por processos convencionais de manufatura.

Após a aplicação da metodologia de DFM, seguindo o mesmo processo adotado nos modelos original e otimizado, foi realizada uma análise estrutural a fim de comparar os resultados obtidos e validar o desempenho estrutural do modelo DFM. São apresentados na Tabela 4, os parâmetros obtidos após a análise estrutural realizada no modelo DFM.

Tabela 4. Parâmetros obtidos na análise estrutural no modelo DFM.

Modelo	Deslocamento [mm]	Tensão [Mpa]	Massa [g]	FOS	Volume [cm³]
DFM	0,277	285	133,91	1,77	47,65

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

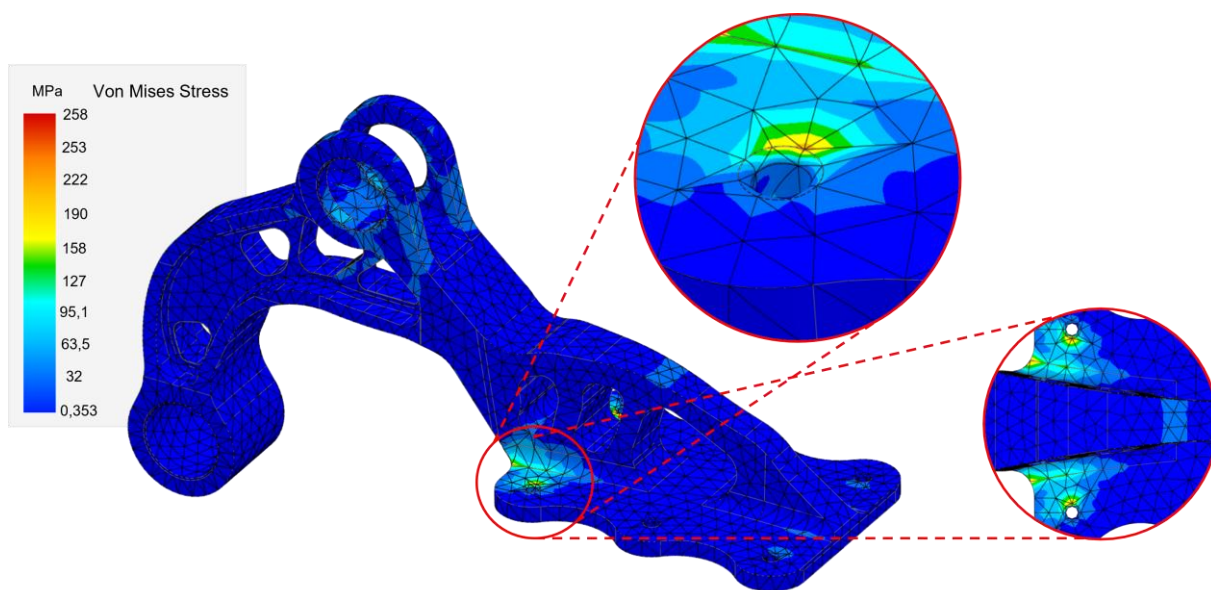
Conforme observado na Tabela 4, o modelo DFM apresentou uma massa de 133,91 g. Em relação ao modelo original, observou-se uma redução de 127,09 g, totalizando 48,7% de redução de massa. Em comparação ao modelo otimizado, verificou-se um aumento de 30 g, o que representa um acréscimo de 29,8%, ainda assim mantendo-se abaixo da massa do modelo original.

Com base nas análises estruturais realizadas, o modelo DFM, quando comparado ao modelo otimizado, apresentou redução na tensão máxima e aumento no fator de segurança. Em

relação ao deslocamento, o modelo obteve um aumento de 0,029 mm em comparação ao modelo otimizado.

Esse comportamento indica que as modificações geométricas realizadas para adequação ao processo de usinagem promoveram uma melhor distribuição das tensões na estrutura, reduzindo concentrações localizadas. Um dos fatores que contribuíram para o menor fator de segurança observado no modelo otimizado foi a presença de cantos vivos nas regiões dos furos, conforme discutido anteriormente. No modelo DFM, foi aplicado raios nessas regiões, conforme apresentado na Figura 53, contribuindo para a redução das tensões máximas e o aumento do fator de segurança. Entretanto, tais alterações também resultaram em uma redução da rigidez global do componente, refletida no aumento do deslocamento observado. Ainda assim, ao analisar o conjunto dos resultados, essa diferença se mostra favorável: enquanto a tensão diminuiu cerca de 24% e o fator de segurança aumentou aproximadamente 31%, os resultados sugerem que a aplicação do DFM proporcionou um ganho significativo em segurança estrutural com impacto relativamente moderado na rigidez do componente.

Figura 53. Aplicação de raios nas regiões dos furos no modelo DFM.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em comparação à geometria original, o modelo DFM apresentou um aumento da tensão máxima e do deslocamento máximo, o fator de segurança permaneceu acima da média, indicando que a peça continua apta a suportar os carregamentos aplicados, com uma significativa redução de massa.

4.6. Análises Geométricas Pré-CAM do Modelo DFM

4.6.1. Análise da Fragmentação Superficial em Trajetórias de Programação CAM

Para avaliar a fragmentação superficial no modelo DFM, conforme realizado no modelo otimizado, o modelo foi submetido ao ambiente CAM, com o objetivo de compreender a divisão superficial e sua influência na geração de trajetórias durante a programação.

As fragmentações superficiais no modelo DFM se apresentaram em menor grau, com poucas variações geométricas e uma quantidade menor de faces, em razão das superfícies regulares e contínuas do modelo, por isso a trajetória CAM tende a ser mais suave, com movimentos lineares e circulares mais estáveis e uma quantidade menor de micropontos.

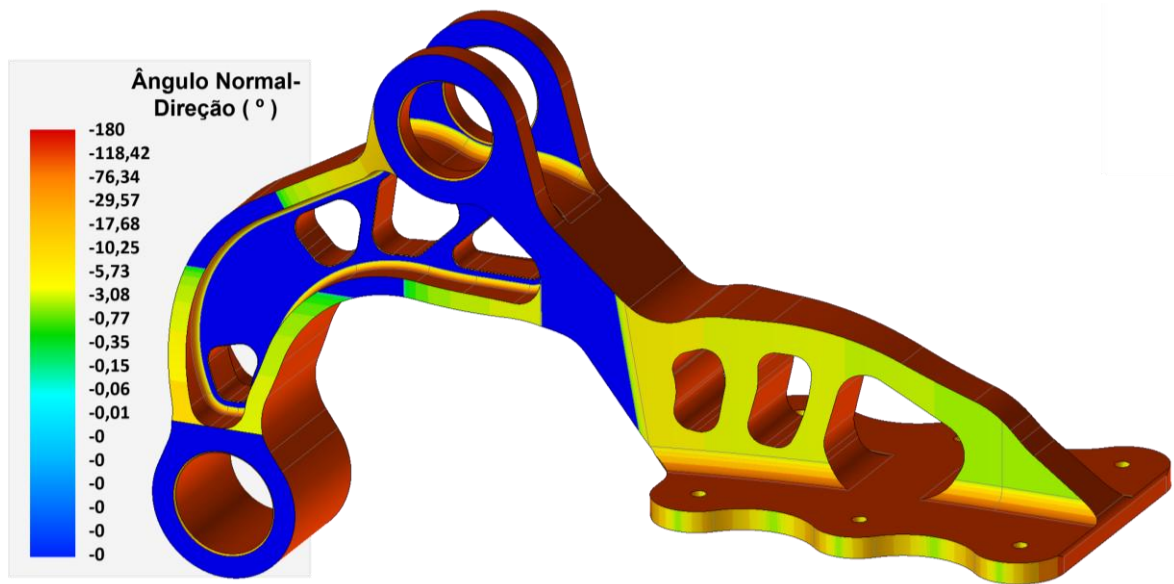
Esse resultado traz benefícios diretos para a programação CAM, visto que a máquina realiza movimentos contínuos com menor variação de aceleração e desaceleração, permitindo que os programas utilizem interpolações lineares e circulares. Isso resulta em um código CNC mais compacto, contribuindo para maior estabilidade de corte, melhor acabamento superficial e redução do tempo de usinagem.

4.6.2. Análises de Normais Superficiais

Para a compreensão das orientações angulares e direções perpendiculares no modelo DFM, foram realizados estudos e análises com o objetivo compreender o comportamento das operações selecionadas durante a programação.

Ao contrário do modelo otimizado, o modelo DFM apresenta geometrias simplificadas, resultando em orientações angulares previsíveis e organizadas. Nesse caso, as normais apontam para direções principais e variam pouco ao longo da peça. A Figura 54 determina o comportamento das normais em relação a uma direção específica selecionada.

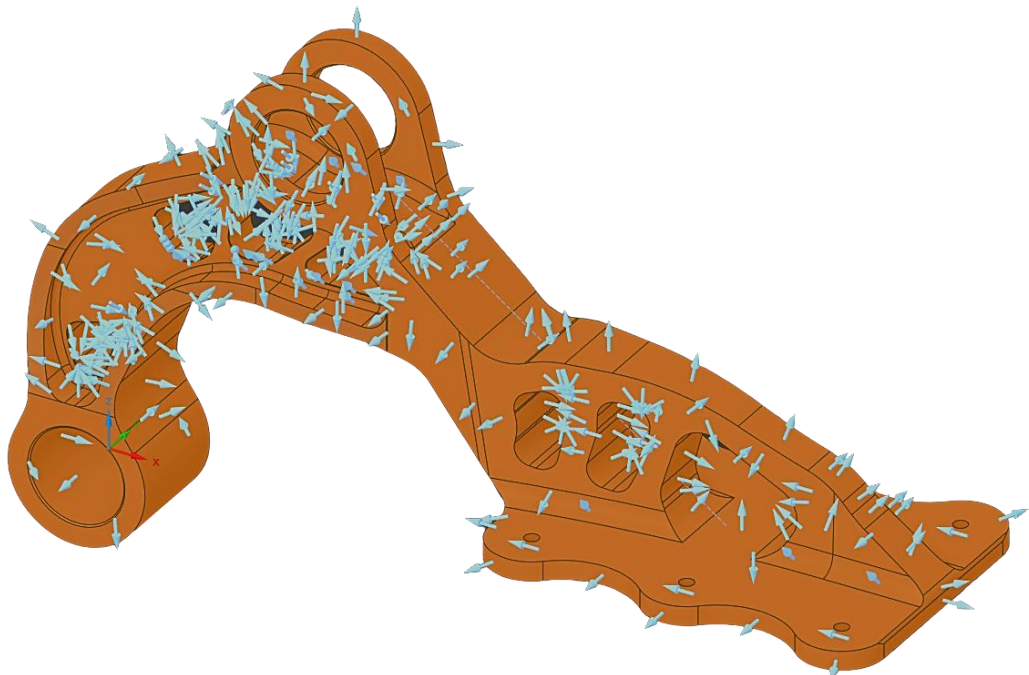
Figura 54. Comportamento das normais em relação a uma direção.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 55 demonstra o comportamento global de normais, indicado por setas distribuídas na superfície do componente.

Figura 55. Comportamento global de normais distribuídas na superfície da peça.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

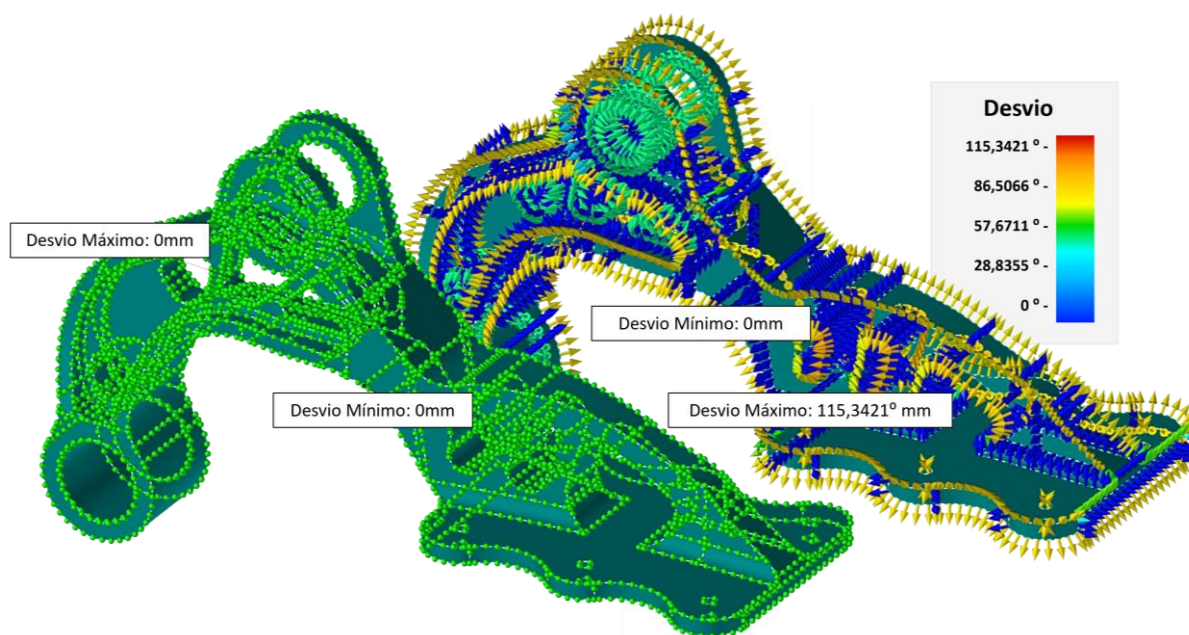
Esse comportamento angular resulta em menor inclinação da ferramenta, menor complexidade de programação e maior estabilidade de corte, facilitando o acesso da ferramenta às superfícies e o controle do acabamento superficial.

4.6.3. Análises de Continuidade de Arestas e Tangência Superficial

Nesse estudo foram realizadas análises de continuidade de arestas e tangências da geometria do modelo DFM, com o objetivo de identificar possíveis regiões de defeitos geométricos e qual impacto teriam durante a programação.

As análises demonstraram resultados satisfatórios dentro das condições exigidas na programação CAM, sem irregularidades de continuidade superficial e falhas tangenciais, conforme ilustrado pelos respectivos valores apresentados na Figura 56.

Figura 56. Valores obtidos nas análises de continuidade de arestas e tangências.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

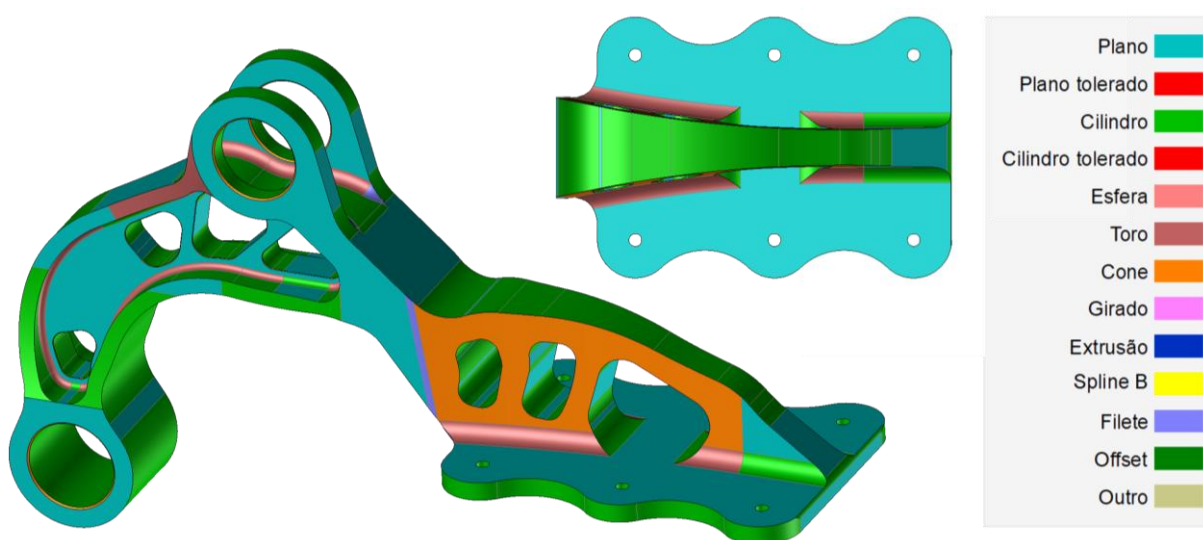
Em peças com geometrias simplificadas, como o modelo DFM, as análises de continuidade de arestas e tangências tendem a ser mais diretas, pois suas superfícies possuem formas regulares, como planos, raios simples e cilindros. No modelo DFM foi observado que as superfícies se encontram de forma contínua, as arestas são bem definidas com interseções claras, e os raios e filetes são tangentes às demais geometrias.

4.6.4. Análise do Tipo de Face

Conforme realizado anteriormente no modelo otimizado, esta análise consiste na verificação do tipo de face resultante do modelo, ou seja, o foco é identificar os tipos de operações de usinagem que possam ser aplicadas por meio das faces geométricas geradas.

As análises realizadas no modelo DFM demonstram que o tipo “plano” é o tipo de face predominante em toda a peça, conforme ilustrado na Figura 57, que apresenta o modelo e os tipos de faces geométricas presentes.

Figura 57. Tipos de faces do modelo DFM.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Além das faces tipo “plano” serem predominantes, faces do tipo cone e cilindro, aparecem com frequência no modelo. Essas superfícies são mais simples para programar, por permitirem estratégias de programação com trajetórias diretas e previsíveis. Exemplos de operações como faceamento, contornos 2D e furação em faces planas são utilizadas nesses tipos de faces, resultando em menor tempo de programação, maior estabilidade do processo e melhor acabamento superficial, entre outros fatores.

4.7. Programação CAM Após Aplicação da Metodologia de DFM

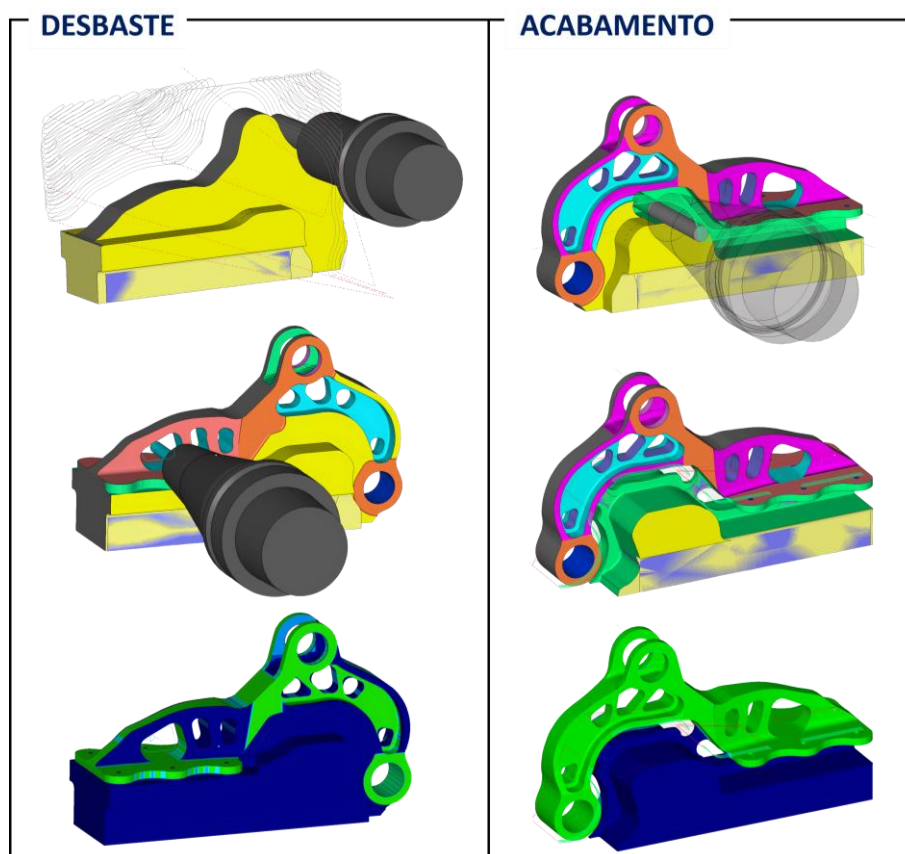
Com base nas limitações identificadas durante a programação CAM do modelo otimizado, a aplicação do DFM mitigou dificuldades provenientes da otimização topológica, alavancando a manufaturabilidade do componente. As modificações realizadas permitiram o

surgimento de configurações distintas durante o processo de usinagem, possibilitando novas análises sob diferentes perspectivas

4.7.1. Etapas da Programação CAM

Em comparação ao modelo otimizado topologicamente, a programação CAM após o DFM apresentou alterações significativas em função da redução da complexidade geométrica. Como resultado, a necessidade de refinamento das operações de desbaste e acabamento mostrou-se reduzida, tornando o processo mais simplificado e vantajoso para a obtenção de um fluxo de programação eficaz. A Figura 58 demonstra a forma do material em diferentes etapas de programação.

Figura 58. Forma do material nas etapas de programação.



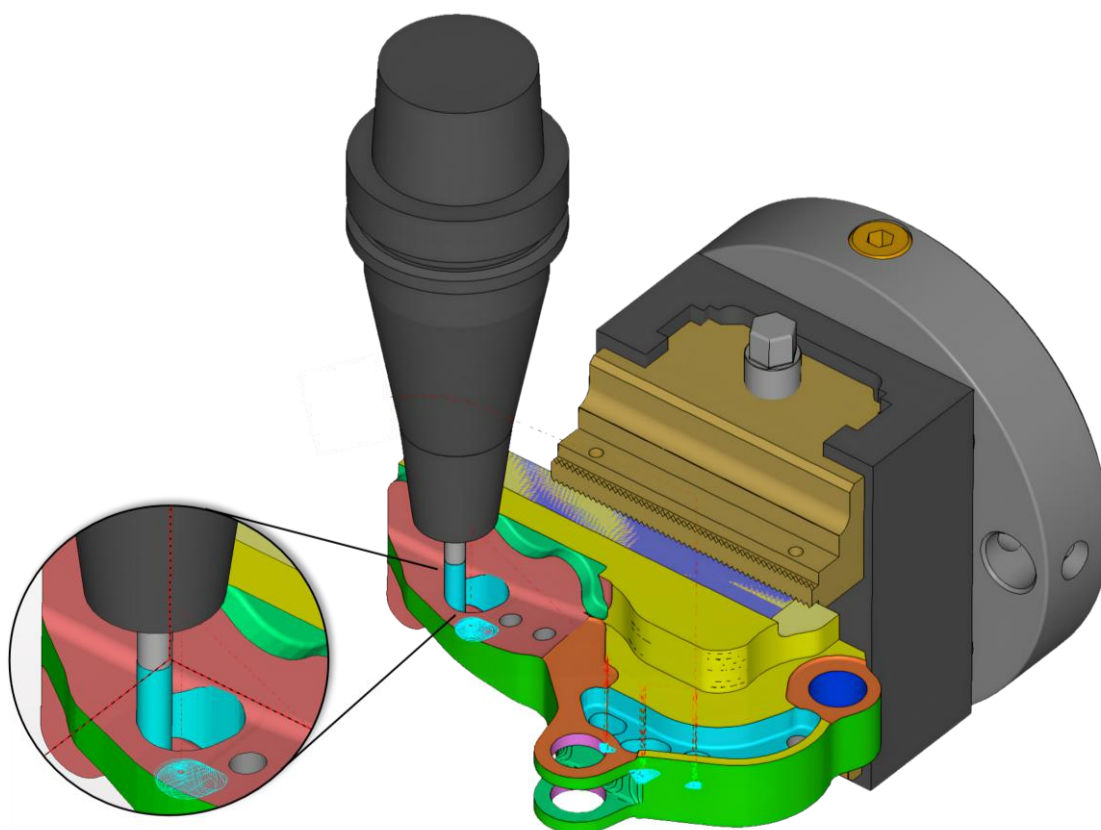
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 58 demonstra resultados contrários em relação ao modelo otimizado, detentor de grandes refinamentos de operações desenvolvidas. A aplicação do DFM permitiu modos operantes viáveis durante o processo de usinagem, reduzindo significativamente a inserção de estratégias 3D para a obtenção da geometria final.

4.7.2. Acessibilidade Ferramental Posterior a Aplicação de Critérios de DFM

A programação do modelo DFM apresentou bruscas alterações de acessibilidade ferramental em relação ao componente otimizado, proporcionando condições de acesso altamente favoráveis, sem a necessidade de grandes precauções durante a programação. A Figura 59 demonstra a configuração ferramental em relação à peça.

Figura 59. Configuração ferramental em relação à peça.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Diante da Figura 59, observa-se que a acessibilidade ferramental detém aspectos distintos em relação ao modelo otimizado, resultado obtido após conceitos de DFM serem aplicados ao componente otimizado, eliminando regiões de cavidades profundas, áreas de transições bruscas e principalmente regiões de raios pequenos com elevadas profundidades desproporcionais ao diâmetro da ferramenta. Devido a essas modificações, houve grandes reduções nas variedades de ferramentas e porta-ferramentas com maiores comprimentos necessários para atingir áreas críticas presentes no componente otimizado.

Com isso, o processo de fabricação da nova versão geométrica potencializa a confiabilidade da programação e do processo de forma geral, eliminando riscos de vibrações

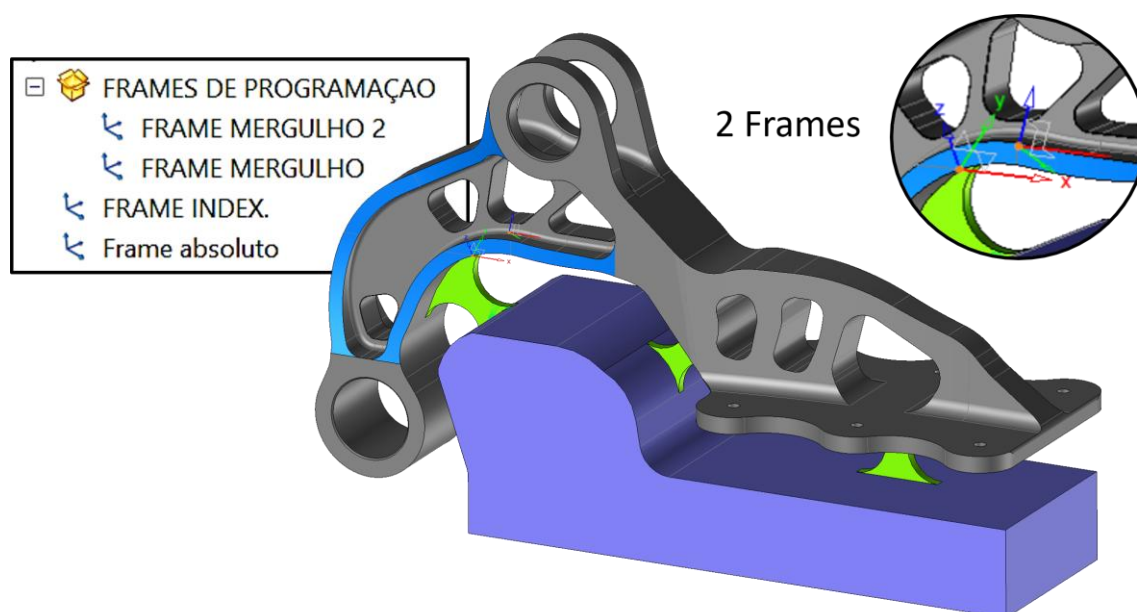
devido a altos comprimentos de ferramenta e diâmetros pequenos, sequencialmente possibilitando ganhos em dados de corte ferramental por estarem em condições de menor momento fletor diante das forças de corte atuantes na remoção de material em relação à área de fixação da ferramenta.

4.7.3. Controle de Orientação e Indexação Ferramental Após DFM

A reconstrução do modelo após o DFM permitiu otimizações nos métodos de indexação e orientação ferramental devido à simplificação de *design* obtida, sem a necessidade de constantes adaptações para a criação de novas operações e estratégias durante a programação.

Para a elaboração de diferentes operações de usinagem, baixas quantidades de *frames* criados manualmente para indexação de novas soluções angulares fizeram-se necessárias devido à simplificação geométrica da peça, possibilitando uma remoção de material maior em menor variação de posicionamento. A Figura 60 demonstra a nova perspectiva de *frames*.

Figura 60. Nova perspectiva de *frames*.



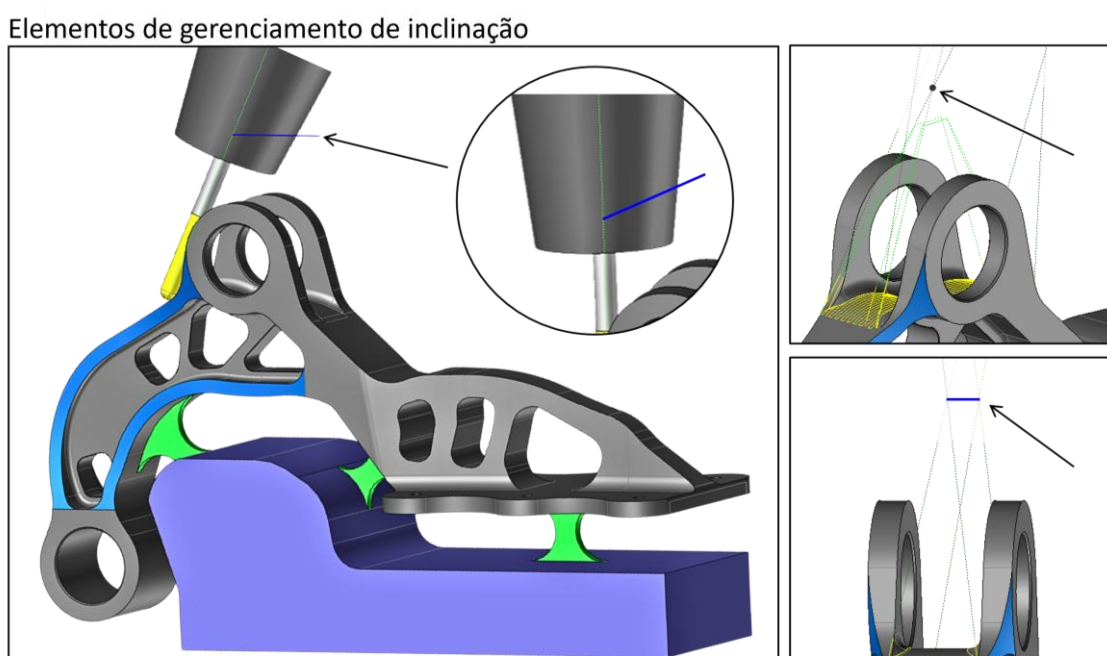
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conforme a Figura 60, conclui-se que a redução da complexidade geométrica durante o projeto do componente influencia diretamente o refinamento operacional necessário para acessar diferentes áreas do componente em novos posicionamentos de eixo. Com uma redução significativa na criação de novas indexações, as que se fizeram necessárias foram obtidas por meio de referências geométricas convencionais do próprio componente, reduzindo assim a

necessidade de criação de *frames* por meio de recursos que demandam maior ajuste operacional devido à falta de referências planas, desafio encontrado no componente antes da aplicação do DFM.

Além da redução e simplificação da criação de *frames* de indexações, houve otimizações na criação de elementos para controle de orientação da ferramenta, obtendo adaptações mínimas de recursos de controle de região de corte, orientação e limitação de trajetórias por meio de curvas e configurações auxiliares. Na Figura 61 é ilustrada a região única onde utilizou-se recursos auxiliares para o gerenciamento de orientação em operações simultâneas.

Figura 61. Região única e recursos auxiliares.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Diferente do modelo otimizado, o componente após o DFM exigiu mínimos ajustes de gerenciamento de inclinação, obtendo em uma única operação configurações de orientações durante operações simultâneas. Estas características evidenciam a simplificação de *design* obtida, reduzindo diretamente a quantidade de operações simultâneas com acabamentos 3D. Diante da obtenção destas análises, naturalmente o emprego de operações posicionadas 2D tornou-se a estratégia de maior magnitude durante o desenvolvimento do componente, minimizando assim o elevado ajuste operacional.

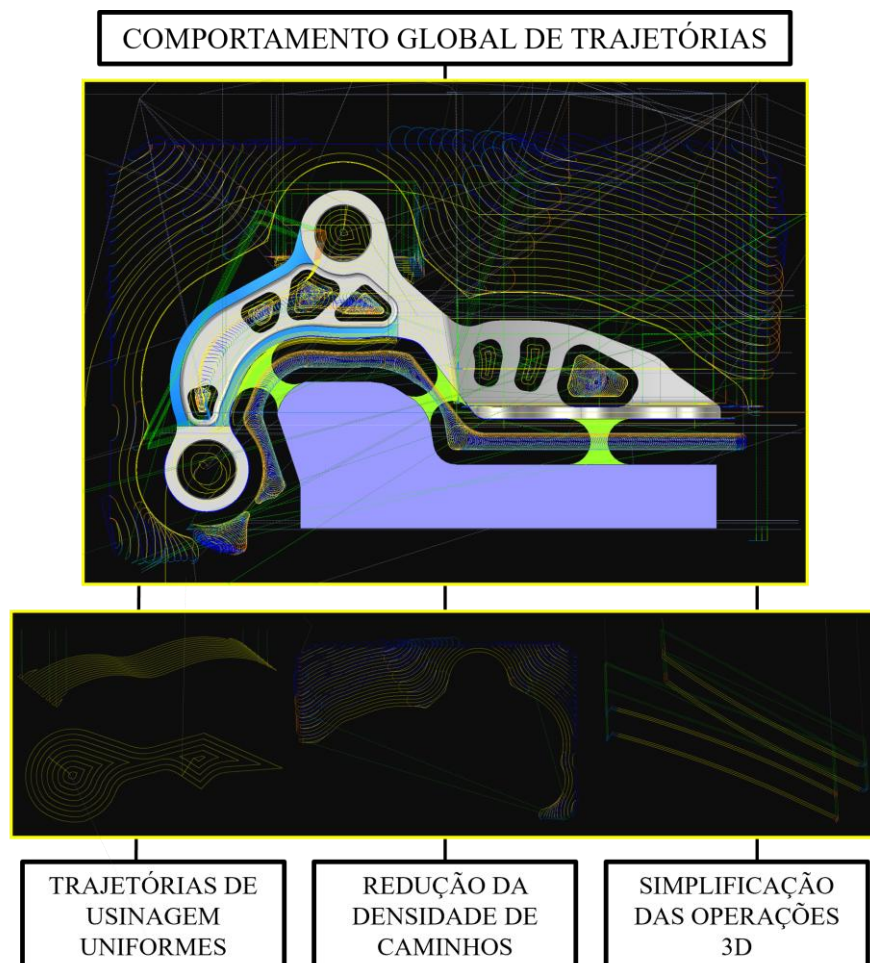
Em relação à redução de configurações de orientações, outro ponto que potencializou este aspecto foi a possibilidade do acabamento de paredes do componente com a região lateral

da ferramenta de corte. Em contrapartida, o componente otimizado demonstrou a necessidade de acabamento com regiões próximas à ponta da ferramenta, devido ao excesso de formas livres, limitando o acabamento com fresas esféricas em suas regiões extremas, inserindo cortes laterais por meio da hélice da ferramenta, aumentando assim o gerenciamento de recursos adicionais para minimizar condições negativas de cortes em regiões centrais de ferramentas esféricas.

4.7.4. Comportamento Global das Trajetórias Posteriormente ao DFM

O comportamento das trajetórias após a aplicação do DFM resultou em mudanças significativas em comparação ao modelo otimizado. Devido à simplificação geométrica, obteve-se percursos simplificados e estáveis. A Figura 62 evidencia a mudança encontrada no trajeto global de programação, com condições superiormente favoráveis em relação ao modelo otimizado.

Figura 62. Trajeto global de programação do modelo DFM.



A Figura 62 ilustra uma das características mais potencializadas obtidas após a aplicação do DFM, demonstrando aspectos distintos de trajetórias de usinagem em relação ao modelo otimizado. Após a reconstrução de *design* visando melhorar a manufaturabilidade do componente, observou-se a simplificação e continuidade das trajetórias, isentas de regiões com caminhos densos e comportamentos complexo de mapeamento como característica geral do modelo otimizado.

Adicionalmente, a redução de detalhes geométricos desfavoráveis contribuiu para a obtenção de trajetórias organizadas e de maior previsibilidade em termos processuais. Esse comportamento ressalta a melhoria durante a realização da programação CAM, contribuindo com a performance do processo de fabricação.

4.7.5. Limitações Operacionais Identificadas

Diante das melhorias observadas no decorrer da programação CAM, as limitações operacionais reduziram de forma significativa. A simplificação geométrica permitiu a redução da recursos auxiliares durante a programação. Apesar da otimização operacional, desafios pontuais de estratégias de 5 eixos fizeram-se necessários para a obtenção da geometria final. A Figura 63 ilustra o aspecto geral encontrado durante o desenvolvimento do processo de fabricação.

Figura 63. Aspecto encontrado durante o processo de fabricação.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Como ilustrado na Figura 63, observou-se a melhoria do processo após o DFM em proporções globais. Os desafios pontuais existentes não ocasionam grandes volumes ao ponto de impactar a fluidez da programação, sendo consideradas condições naturais para o processo de fabricação em máquinas de 5 eixos.

A aplicação do DFM possibilitou que a geometria final do componente fosse completamente alcançada com o processo definido. Em contrapartida, o modelo otimizado apresentou áreas críticas de difícil acesso impactando a obtenção da geometria final, demandando refinamentos excessivos.

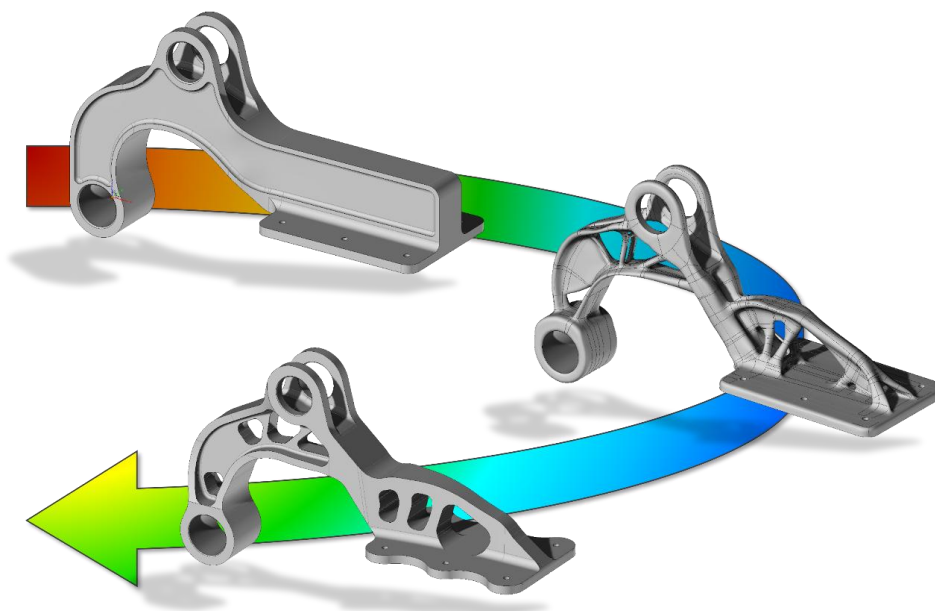
Os resultados obtidos demonstram que a fabricação de geometrias orgânicas provenientes da otimização topológica é possível por meio de processos convencionais de usinagem. Entretanto, em muitos casos, essa fabricação pode exigir elevados níveis de programação e manufatura para viabilizar a produção do componente. Dessa forma, a aplicação de critérios de DFM torna-se justificável, contribuindo para a redução da complexidade de fabricação e favorecendo uma melhor adaptação dessas geometrias aos processos de usinagem empregados pela indústria.

4.8. Comparação Final

4.8.1. Comparação Geométrica e Estrutural

As comparações geométricas realizadas entre os modelos Original, OT e DFM demonstraram que a aplicação de critérios de usinabilidade contribuiu para uma simplificação geométrica do componente. Enquanto o modelo OT gerou superfícies orgânicas complexas, cavidades internas e a presença de cantos vivos em regiões críticas, a metodologia DFM substituiu essas formas livres por uma geometria mais regular e contida. As modificações focaram na eliminação de regiões profundas, promovendo a suavização de transições abruptas. A Figura 64 apresenta a evolução e a comparação dos três modelos: Original, Otimizado e DFM.

Figura 64. Evolução e comparação dos modelos estudados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os resultados estruturais obtidos demonstraram que as modificações geométricas aplicadas por meio da metodologia do DFM não provocaram alterações significativas no comportamento mecânico do componente, e otimizaram o desempenho mecânico em relação ao modelo puramente OT. Apesar das alterações realizadas com foco no processo de usinagem, os níveis de tensão, deslocamento e massa permaneceram compatíveis com os resultados observados na peça original. Dessa forma, os resultados indicam que a melhoria da geometria visando a manufatura pode ser alcançada sem comprometer significativamente o desempenho

estrutural da peça. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nas análises estruturais de ambos os modelos.

Tabela 5. Resultados das análises estruturais do modelo original, otimizado e DFM.

Modelo	Deslocamento [mm]	Tensão [Mpa]	Massa [g]	FOS	Volume [cm³]
Original	0,125	260	261	1,94	92,9
Otimizado	0,248	374	103,13	1,35	36,7
DFM	0,277	285	133,91	1,77	47,65

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

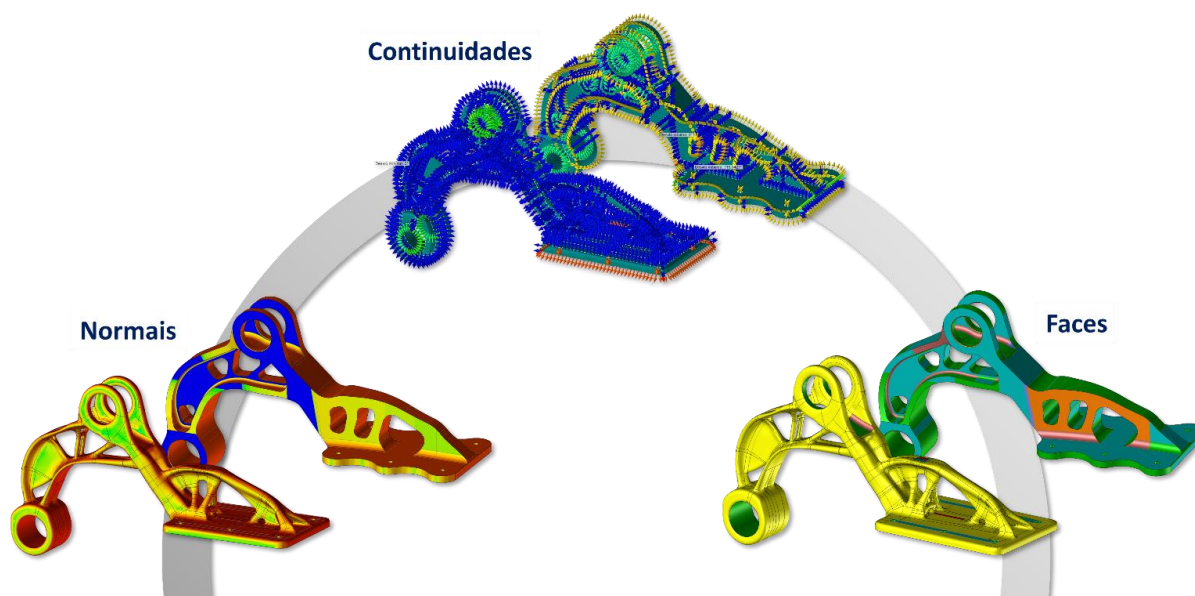
A análise comparativa dos três modelos evidencia tendências estruturais distintas. Em relação ao modelo original, o modelo OT reduziu a massa em 60,5% (de 261 g para 103,13 g), com um aumento de 98,4% no deslocamento máximo e de 44,2% na tensão de Von Mises, com redução de 30,4% no fator de segurança. O modelo DFM, por sua vez, reduziu a massa em 48,7% em relação ao original e apenas 29,8% acima do modelo OT, com ganho de 31,1% no FOS e redução de 23,8% na tensão máxima em comparação ao modelo otimizado. Esses dados indicam que a aplicação do DFM promoveu uma recuperação significativa do desempenho estrutural sem comprometer os ganhos de redução de massa obtidos pela OT.

4.8.2. Comparação Geométrica Pré-CAM

As análises geométricas pré-CAM revelaram que a aplicação dos critérios de DFM exerceu influência direta na adaptação da geometria aos processos de usinagem. Em comparação ao modelo OT, o modelo DFM apresentou condições geométricas mais favoráveis à programação, com redução das características associadas a superfícies complexas e regiões potencialmente críticas para a manufatura. Essa transição refletiu em uma compatibilidade geométrica mais adequada para o desenvolvimento das etapas subsequentes de programação CAM.

A Figura 65 apresenta os resultados comparativos das análises de normais, continuidade geométrica e tipos de faces, permitindo visualizar as principais diferenças identificadas entre os modelos OT e DFM.

Figura 65. Comparação pré-CAM.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

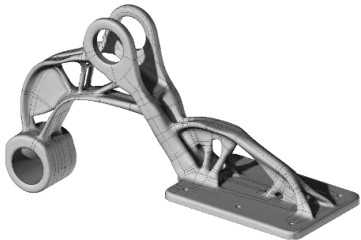
Do ponto de vista geométrico, o modelo OT apresentou predominância de faces do tipo *spline* em sua superfície, ao passo que o modelo DFM apresentou faces planas como tipo dominante, com presença secundária de faces cônicas e cilíndricas. Essa transição no perfil de faces tem impacto direto na programação CAM: faces planas e cilíndricas permitem o emprego de estratégias posicionadas 2D, enquanto superfícies *spline* exigem estratégias de acabamento 3D contínuo, com maior custo computacional e operacional. Em relação às normais superficiais, o modelo OT apresentou elevada variação angular distribuída por toda a superfície, ao contrário do modelo DFM, cujas normais apontam para direções principais com variação reduzida, condição favorável ao controle de orientação da ferramenta e à estabilidade das trajetórias.

4.8.3. Comparação CAM Geral

A Figura 66 apresenta uma comparação entre o modelo otimizado obtido através da otimização topológica e o modelo desenvolvido após a aplicação dos critérios de Design for Manufacturing (DFM). Visualmente, observa-se que o modelo OT apresenta uma geometria predominantemente orgânica, caracterizada por nervuras delgadas, transições complexas e regiões com elevada variação geométrica. Embora essas características contribuam para a eficiência estrutural da peça, também resultam em maiores desafios para sua adaptação aos processos convencionais de usinagem.

Em contrapartida, o modelo DFM apresenta uma geometria mais simplificada e compatível com os requisitos de fabricação, preservando os principais caminhos estruturais identificados pela otimização topológica. As modificações aplicadas promoveram a redução de detalhes excessivamente complexos, a suavização de regiões críticas e uma melhor adaptação das superfícies aos processos de usinagem. Como consequência, observou-se uma redução da complexidade geométrica sem alterações significativas na função estrutural do componente, favorecendo sua manufaturabilidade e contribuindo para uma melhor integração entre desempenho estrutural e viabilidade de fabricação.

Figura 66. Comparação global CAM.

Aspectos		
Estratégias	Maior refinamento	Estratégias mais diretas
Acessibilidade	Regiões Críticas	Melhor acesso ferramental
Orientação	Maior quantidade de frames	Menor quantidade de frames
Elementos auxiliares	Mais sketches e superfícies	Menor dependência de recursos auxiliares

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para quantificar o impacto operacional observado, a Tabela 6 apresenta os dados de programação CAM obtidos para os dois modelos, evidenciando as reduções obtidas com a aplicação do DFM.

Tabela 6. Comparação quantitativa dos dados de programação CAM entre os modelos OT e DFM.

Critério	Modelo OT	Modelo DFM	Redução
Operações 2D posicionadas	84	43	48,8%
Operações 3D/5D	70	20	71,4%
Operações com 3/5 eixos simultâneos	41	6	85,4%
<i>Sketches</i> auxiliares	45	27	40,0%
<i>Frames</i> de indexação	14	2	85,7%
Superfícies auxiliares	12	4	66,7%

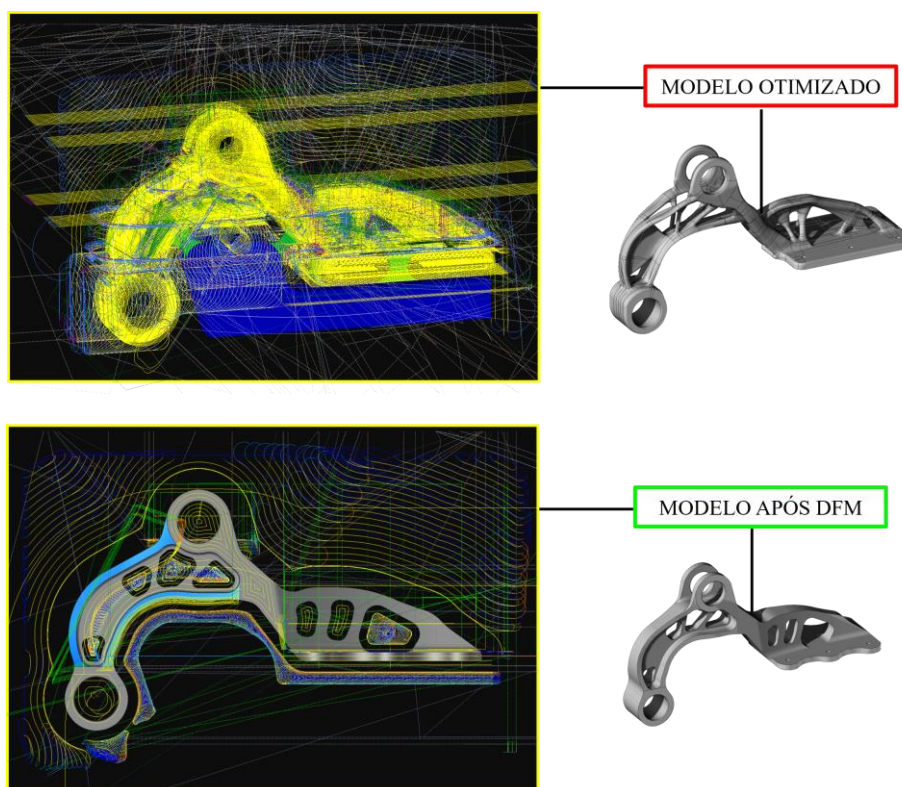
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os dados observados na Tabela 6 evidenciam o impacto quantitativo da aplicação do DFM sobre a programação CAM. A redução de 71,4% nas operações 3D/5D e de 85,4% nas operações com eixos simultâneos reflete diretamente a eliminação das geometrias orgânicas que tornavam indispensável o uso de estratégias de acabamento multieixos. A diminuição de 85,7% na quantidade de frames de indexação indica que o modelo DFM passou a oferecer referências geométricas convencionais suficientes para a programação, eliminando a necessidade de criação manual de orientações angulares. Da mesma forma, a redução de 53,5% no total de elementos auxiliares representa uma simplificação direta do esforço de programação, com reflexos esperados na redução do tempo de setup CAM e na redução de retrabalho.

4.8.4. Comportamento de Trajetórias

A Figura 67 apresenta uma comparação do comportamento global das trajetórias geradas para os modelos OT e DFM durante a programação CAM. Esta análise permite avaliar a influência das modificações geométricas sobre os percursos de ferramenta, evidenciando diferenças relacionadas à distribuição dos caminhos, refinamento das operações e adaptação das estratégias de usinagem empregadas ao longo do processo de fabricação.

Figura 67. Comparação das trajetórias.



Conforme observado na Figura 67, o modelo OT apresentou maior concentração de trajetórias, elevada dependência de operações de acabamento 3D e mudanças mais frequentes de direção ao longo das superfícies usinadas. Este comportamento está diretamente associado à complexidade geométrica resultante da otimização topológica, exigindo maior refinamento operacional para adaptação das estratégias de usinagem às características do componente.

Em contrapartida, o modelo DFM apresentou trajetórias mais uniformes e organizadas, reduzindo a concentração de caminhos e favorecendo uma melhor continuidade entre as operações programadas. De forma geral, os resultados demonstram que as modificações geométricas aplicadas através dos critérios de DFM contribuíram para a simplificação do comportamento das trajetórias, favorecendo a adaptação do componente aos processos de fabricação empregados neste estudo.

Em termos de etapas de usinagem, o modelo OT demandou quatro fases: desbaste, refinamento do desbaste, semiacabamento e acabamento, enquanto o modelo DFM foi programado em duas etapas principais: desbaste e acabamento, representando uma redução de 50% na quantidade de fases de processamento. Essa simplificação decorre diretamente da eliminação de regiões com raios acentuados, cavidades profundas e transições orgânicas, que no modelo OT exigiam operações intermediárias de refinamento para aproximação progressiva da geometria final. Em um cenário industrial, essa redução implica menor tempo de *setup*, menor consumo de ferramentas e menor probabilidade de não conformidades acumuladas entre etapas.

De forma integrada, os resultados obtidos nas comparações geométrica, estrutural e de manufatura demonstram que a metodologia DFM operou como elo entre a eficiência estrutural proporcionada pela OT e a viabilidade do processo de usinagem. A redução de massa obtida pela OT foi preservada em 80,6% pelo modelo DFM, enquanto os indicadores de manufaturabilidade, operações CAM, complexidade de trajetórias e necessidade de elementos auxiliares, apresentaram reduções expressivas entre 40% e 85%. Esses resultados reforçam que a integração entre otimização topológica e critérios de DFM representa uma abordagem mais completa e industrialmente viável do que a aplicação isolada de cada metodologia.

5. CONCLUSÃO

De forma geral, os resultados obtidos neste estudo indicam que a otimização topológica foi capaz de promover uma redução significativa de material, preservando características estruturais compatíveis com os requisitos estabelecidos para o componente analisado. Do ponto de vista estrutural, a redistribuição de material proporcionada pela OT resultou em uma geometria eficiente, com níveis adequados de tensão e deslocamento mesmo após a redução de massa.

Do ponto de vista da manufatura, no entanto, a geometria resultante da otimização topológica revelou desafios relevantes para sua adaptação aos processos convencionais de usinagem. Aspectos como acessibilidade ferramental, definição de estratégias de usinagem, controle de orientação e refinamento de trajetórias evidenciaram um aumento considerável da complexidade operacional ao longo da programação CAM. Embora a fabricação dessas geometrias seja viável, sua execução tende a exigir elevados níveis de programação, recursos avançados de manufatura e maiores investimentos para garantir a conformidade do componente.

Nesse cenário, a aplicação dos critérios de Design for Manufacturing mostrou-se uma alternativa eficaz para contornar parte das limitações identificadas. As modificações geométricas implementadas favoreceram a adaptação do componente aos processos de fabricação, tornando as estratégias de usinagem mais acessíveis, reduzindo a complexidade das trajetórias e melhorando as condições gerais de programação, tudo isso sem comprometer de forma significativa o desempenho estrutural alcançado pela otimização.

Conclui-se, portanto, que a integração entre otimização topológica e critérios de manufaturabilidade representa uma abordagem promissora para o desenvolvimento de componentes estruturais aeronáuticos. Os resultados reforçam que considerar não apenas o desempenho estrutural, mas também os impactos da geometria otimizada sobre as etapas de fabricação, é fundamental para uma integração mais equilibrada entre eficiência estrutural, viabilidade produtiva e aplicação industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design**. 2ª ed. Cambridge University Press, 2012.
- AMSTUTZ, S.; NOVOTNY, A. A. Topological optimization of structures subject to Von Mises stress constraints. **Struct Multidisc Optim**. Vol. 41, p. 407-420, 2009.
- APRO, C. **Secrets of S-Axis Machining**. New York: Industrial Press, 2008.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 4ª ed. Cengage, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 209: 2010**. Alumínio e suas ligas – Composição química. Brasil, 2010.
- BACCIAGLIA, A.; CERUTI, A.; LIVERANI, A. Surface smoothing for topological optimized 3D models. **Structural and Multidisciplinary Optimization**. Vol. 64, p. 3453-3472, 2021.
- BAPTISTA, R.; SIMÕES, J. F. A. Three and five axes milling of sculptured surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 103, p. 398-403, 2000.
- BENDSOE, 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.
- BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology Optimization: Theory, Methods and Applications**. 2º ed. New York: Springer, 2004.
- BOUJELBENE, M.; MOISAN, A.; BOUZID, W.; TORBATY, S. Variation cutting speed on the five axis milling. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. Vol. 21, 2007.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CEMtec -Tecnologias Cimentícias Eco-eficientes Avançadas. **Ferramentas com gradação funcional: Otimização da orientação de fibras em estruturas compósitas utilizando o método de otimização topológica**. Disponível em: <https://cemtec.org/temas/ferramentas-com-gradacao-funcional/>. Acesso em: 25/11/2025.
- CHEN, J. S. B.; HUANG, Y. K.; CHEN, M. S. Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 45, p. 1070–1076, 2005.
- DASSAULT SYSTEMES. **Método SIMP para otimização de topologia**. Disponível em: https://help.solidworks.com/2026/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm?id=2efc975af4434c8098a05da708cb314c. Acesso em: 14/03/2026.

DIMITROV, D.; SAXER, M.; Productivity Improvement in Tooling Manufacture through High Speed 5 Axis Machining. **Procedia CIRP**. Vol. 1, p. 277-282, 2012.

DOLINŠEKA, S.; ŠUŠTARŠIČ, B.; KOPA, J. Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes. **Wear**. Vol. 250, p. 349–356, 2001.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem de metais**. São Carlos: Editora Edgard Blücher Ltda, 1970.

GIMENES, R.; MORIGUCHI, S. K. Aplicação de Técnicas de Otimização Topológica via Software. **Escola de Engenharia de Maúá**, s. d.

GUEST, J. K.; PRÉVOST, J. H.; BELYTSCHKO, T. Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**. Vol. 61, p. 238-254, 2004.

GUO, T.; LIU, J.; MA, Y.; AHMAD, R. Deep learning-based topology optimization for multi-axis machining. **Applied Mathematical Modelling**. Vol. 138, 2025.

IBHADODE, O.; ZHANG, Z.; SIXT, J.; NSIEMPBA, K. M.; ORAKWE, J.; MARCHESE, A. M.; ERO, O.; SHAHABAD, S. I.; BONAKDAR, A.; TOYSERKANI, E. Topology optimization for metal additive manufacturing: current trends, challenges, and future outlook. **Virtual and Physical Prototyping**, 2024.

KALPAKJIAN, S.; SCHIMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 8ª ed. Pearson Education, 2024.

LEITE, Y. G. S.; LEITE, W. B. M.; SILVA, A. C.; SILVA, B. N.; VELHO, L. I. Proposta de Melhoria para Aumento de Produtividade em um Centro de Usinagem. **Navus**. Vol. 8, n. 3, p. 113-125, 2017.

LI, Z.; LEE, T. U.; YAO, Y.; XIE, Y. M. Smoothing Topology Optimization Results Using Pre-Built Lookup Tables. **Advances in Engineering Software**, Vol. 173, 2022.

LI, L. L.; ZHANG, Y. F. An Integrated Approach Towards Process Planning for 5-axis Milling of Sculptured Surfaces Based on Cutter Accessibility Map. **Computer-Aided Design & Applications**. Vol. 3, p. 249-258, 2006.

LIM, T.; CORNEY, J.; CLARK, D. E. R. Exact Tool Sizing for Feature Accessibility. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Vol. 16, p. 791-802, 2000.

LIMA, P. I. T. A. **Otimização Estrutural: Estudo e aplicação de técnicas de otimização em concreto armado utilizando Solver**. 2016. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2016.

LIU, J.; MA, Y. S. 3D level-set topology optimization: a machining feature-based approach. **Struct Multidisc Optim**. Vol.52, p. 563-582, 2015.

LIU, J.; MA, Y. A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. **Advances in Engineering Software**. Vol. 100, p. 161-175, 2016.

LOGAN, D. L. **A first Course in the Finite Element Method**. 5° ed. Canadá: Thomson, 2012.

LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; LADRE JÚNIOR, J. Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos. **Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**. Vol. 11, p. 35-43, 2006.

LS MANUFACTURING. **Serviços de fresamento CNC: o guia definitivo para enfrentar VS. Fresamento periférico para resultados e custos ideais**. Disponível em: <https://www.lsrpf.com/pt/blog/face-milling-vs-peripheral-milling-whats-the-difference>. Acesso em: 10/02/2026.

LU, J.; CHEN, Y. Manufacturable mechanical part design with constrained topology optimization. **Journal of Engineering Manufacture**. Vol, 10, p. 1727-1735, 2012.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3ªed. São Paulo: Blucher, 2015.

MATTHEWS, C. 11 - Piranha – technology transfer and project structure. **Case Studies in Engineering Design**. p. 101-112, 1998.

MIRZENDEHDEL, A. M.; BEHANDISH, M.; NELATURI, S. Topology optimization with accessibility constraint for multi-axis machining. **Computer – Aided Design**. Vol. 122, 2020.

PALMA, L. F. **Estudos Complementares sobre Otimização Topológica Multimaterial Utilizando Interpolação SIMP Ordenada**. 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2018.

PAN, W.; KUANG, H.; GAO, S.; WANG, Y.; XU, G.; LI, M.; LIU, W.; QIAO, L. An automatic approach for generating parametric models from topology-optimization results for three-axis CNC machining. **Computer – Aided Design**. Vol. 82, 2025.

PEREIRA, R. E. L.; SILVA, P. U.; LEITE, I. M. L.; BONO, G. Estudo dos Métodos de Otimização Topológica SIMP e BESO para Problemas 2D Aplicado a Estruturas de Contraventamento. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional**. Vol. XXXVIII, p. 289-297, 2021.

PILKEY, W. D.; PILKEY, D. F.; BI, Z. **Peterson's Stress Concentration Factors**. 4ª ed. New York: WILEY, 2020.

PIRES, G. L. **Influências dos Principais Parâmetros de Corte na Usinagem por Torneamento: um Roteiro Prático para Disciplinas de Processos de Fabricação**. 2021. 60 f. Monografia (Bacharel em Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas – RN, 2021.

POLI, C. **Design for Manufacturing – A Structured Approach**. Butterworth Heinemann, 2001.

POLL, D. I. A. On the Application of Light Weight Materials to Improve Aircraft Fuel Burn – Reduce Weight or Improve Aerodynamic Efficiency? **The Aeronautical Journal**. Vol. 118, p. 903-934, 2014.

RADU, P.; SCHNAKOVSKY, C. A Review of Proposed Models for Cutting Force Prediction in Milling Parts with Low Rigidity, **Machines**. Vol.12, 2024.

ROZVANY, G. I. N.; ZHOU, M.; BIRKER, T. Generalized shape optimization without homogenization. **Structural Optimization**. Vol. 4, p. 250-252, 1992.

SAE INTERNATIONAL. **AMS4126E** - Aluminum Alloy, Die and Hand Forgings and Rolled Rings, 5.6Zn - 2.5Mg - 1.6Cu - 0.23Cr (7075-T6), Solution and Precipitation Heat Treated. Warrendale, PA, 2025. DOI: <https://doi.org/10.4271/AMS4126E>

SANDVIK COROMANT. **Tecnologia para Usinagem de Metais**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt>. Acesso em: 08/01/2026.

SAOUBI, R. M.; OUTEIRO, S. C.; CHANDRASEKARAN, H.; DILLO JÚNIOR, O. W.; JAWAHIR, I. S. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. **Int. J. Sustainable Manufacturing**. Vol. 1, p. 203-236, 2008.

SCIPPA, A.; GROSSIA, N.; CAMPATELLIA, G. FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining. **Procedia CIRP**. Vol. 14, p. 287-292, 2014.

SIGMUND, O. Manufacturing tolerant topology optimization. **Acta Mechanica Sinica**. Vol. 25, p. 227-239, 2009.

SHEN, C.; GUO, Y.; SHEN, Z.; YAN, F.; ZHONG, N. Additive Manufacturing of Aerospace Composites: A Critical Review of the Material–Process–Design Interplay and Prospects for Application. **Materials**. Vol. 18, 2025.

SILVA, E. C. N. **Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da USP. São Paulo. 2006.

SIMONETTI, H. L. **Otimização Topológica de Estruturas Bidimensionais**. 2009. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SIRIO, H. M. M. **Aplicação da Otimização Topológica e Análise de Fadiga pelo Método dos Elementos Finitos de uma Ponta de Eixo para um Veículo Off-Road**. 2022. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SIX SIGMA. **Design for Manufacturing (DFM): A Guide to Optimizing Product Development**. Disponível em: <https://www.6sigma.us/six-sigma-in-focus/design-for-manufacturing-dfm/>. Acesso em: 04/02/2026.

SOUZA, R. M. **O método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Belém, 2003.

SPEROTTO, E. **Efeitos dos Parâmetros de Corte sobre as Forças de Usinagem Geradas no Fresamento Frontal de Aços Inoxidáveis: uma Revisão**. 2021. 28 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**. 3^oed. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.

SUTRADHAR, A.; PARK, J.; HAGHIGHI, P.; KRESSLEIN, J.; DETWILER, D.; SHAH, J. J. Incorporating Manufacturing Constraints in Topology Optimization Methods – A Survey. In: **Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference**, DETC2017-68192, 2017, Cleveland, Ohio, USA. ASME, 2017.

TAVARES, S. M. O.; RIBEIRO, J. A.; RIBEIRO, B. A.; CASTRO, P. M. S. T. Aircraft Structural Design and Life-Cycle Assessment through Digital Twins. **Designs**. Vol. 8, 2024.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K.; DEARNLEY, P. A. **Metal Cutting: Theory, Selection, and Design**. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2025.

VATANABE, S. L.; LIPPI, T. N.; LIMA, C. R.; PAULINO, G. H.; SILVA, E. C. N. Topology optimization with manufacturing constraints: A unified projection-based approach. **Advances in Engineering Software**. Vol. 100, p. 97-112, 2016.

WANG, C. C. L. Direct extraction of surface meshes from implicitly represented heterogeneous volumes. **Computer-Aided Design**. Vol. 39, p. 35-50, 2007.

WIKIMEDIA COMMONS. **Nose landing gear doors of Airbus A350**. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nose_landing_gear_doors_of_Airbus_A350_%2829.jpg. Acesso em: 05/05/2025.

WU, Q.; YUAN, C. M.; SHEN, L. Y.; HE, S. T.; GAO, X. S. Cubic time-spline fitting and interpolation for five-axis CNC machining. **Journal of Computational Design and Engineering**. Vol. 10, p. 2345-2360, 2023.

YONNET, J.; DA, D. Topology Optimization to Fracture Resistance: A Review and Recent Developments. **Archives of Computational Methods in Engineering**. Vol. 31, p. 2295-2315, 2024.

YOUSSEF, H. A.; EL-HOFY, H. **Traditional Machining Technology: Machines Tools and Operations**. 2^aed. CRC Press, 2020.

ZHU, L.; LI, N.; CHILDS, P. R. N. Light-weighting in aerospace component and system design. **Propulsion and Power Research**. Vol. 7, p. 103-119, 2018.