

Desenvolvimento de uma peça de suporte metálica de aeronáutica numa ótica de fabrico aditivo

Sebastião José Queiroga Santos Perdigão

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Marco Alexandre de Oliveira Leite

Prof. Inês Esteves Ribeiro

Júri

Presidente: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Orientador: Prof. Marco Alexandre de Oliveira Leite

Vogal: Prof. António Manuel Relógio Ribeiro

Novembro 2021

Agradecimentos

O desenvolvimento desta dissertação de mestrado marca o final do meu percurso académico na instituição de excelência que é o Instituto Superior Técnico. Foram anos de desafios, aprendizagens e amizades que vão deixar muita saudade e onde tive o privilégio de me cruzar e ter por perto diversas pessoas que me acompanharam, ajudaram e encorajaram a ser melhor, tanto a nível académico como a nível pessoal.

Antes de mais é importante referir que esta dissertação teve apoio do projeto BEYOND.ADDITIVE, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) e Programa Operacional Regional Lisboa 2020 (Portugal 2020 e FEDER), e do projeto "KM3D – *Knowledge Management in Additive Manufacturing: Designing New Business Models*", financiado pela FCT.IP (Ref. PTDC/EME-SIS/32232/2017).

Logo em seguida, queria deixar um forte agradecimento aos meus orientadores Professora Inês Ribeiro e Professor Marco Leite por toda a disponibilidade, *feedback* e compreensão. Foram um grande apoio, especialmente nos momentos mais difíceis, e sem eles este trabalho não teria sido possível.

Gostaria de agradecer também à Bruna Ferreira e ao Gonçalo Cardeal pela disponibilidade e apoio na resolução de diferentes problemas relacionados com esta dissertação.

Um agradecimento especial à minha querida namorada Leonor Saunders e aos meus queridos amigos e colegas Manuel Gamboa, Vítor Martins e André Neves, pelo apoio, motivação e momentos bem passados que ficarão connosco para o resto da vida.

Por fim à minha querida família, em especial aos meus queridos pais Ana e António Perdigão, por toda a paciência, força e boa disposição. Obrigado por me desafiarem a ser melhor todos os dias, a ser humilde e agradecido e ainda mostrarem que na vida nada se tem sem esforço e dedicação.

Resumo

Devido à inovação tecnológica e às recentes necessidades do mercado relacionadas com customização, foco na sustentabilidade e redução de tempos e custos de fabrico, nas últimas décadas o fabrico aditivo tem sido cada vez mais utilizado em diversas aplicações de diferentes sectores. Nomeadamente no setor da aeronáutica, que tirando partido da capacidade do AM para produzir componentes de elevada complexidade geométrica, tem sido fundamentalmente utilizado numa ótica de projeto para redução de massa, reconfigurando diferentes componentes pré-existentes no avião e otimizando a distribuição de material. Este facto é particularmente importante para o caso dos componentes metálicos presentes em elevada quantidade numa aeronave, onde a maioria das aplicações referem-se a componentes metálicos “auxiliares” pois ao contrário dos componentes estruturais ou de suporte não se encontram limitados pelas normas de segurança e exigência de certificação.

Assim sendo, este trabalho pretende avaliar o potencial da aplicação do projeto para fabrico aditivo a um componente metálico de suporte do ramo da aeronáutica com vista a reduzir a sua massa.

Para tal, em primeiro lugar são obtidas duas novas propostas de configuração através da aplicação de dois métodos de projeto: otimização topológica e projeto generativo. Em seguida, são avaliados os custos de fabrico associados à maquinagem CNC da configuração inicial e fabrico aditivo da proposta de configuração final. Por último, é realizada uma análise ao potencial de redução de custos operacionais e emissões diretas, associados à poupança de combustível obtida pela redução de massa.

A proposta final otimizada, obtida por fabrico aditivo, apresenta uma redução de massa acentuada e um aumento do fator de segurança para um dos casos de carga. A análise de custos apresenta uma redução nos custos de fabrico e um potencial de redução de custos operacionais e emissões considerável.

Palavras-chave: Fabrico Aditivo, Otimização Topológica, Projeto Generativo, Aeronáutica, Emissões de Carbono, Customização.

Abstract

Considering the technological innovation and recent market needs, related to customization, sustainability and reduction of production times and costs, in the last decades additive manufacturing has increased its applications in several sectors. In the aircraft sector, taking advantage of AM capacity to produce components of high complex geometry, it has been used in a weight reduction perspective through the redesign and material optimization of several aircraft components. This fact it's particularly interesting for the case of metallic components that are present in high numbers in an aircraft, where most of the applications are related to the "auxiliary" metallic components, that opposed to the structural and support ones, they are not limited by the security norms and certification processes demand.

Thus, this work aims to evaluate the potential of applying design for AM methods to a metallic support bracket of the aircraft sector in order to reduce its weight.

To do so, two new configuration proposals are obtained through the application of two different design methods: topology optimization and generative design. Then, production costs related to the CNC machining of the initial configuration and the additive manufacturing of the final proposed configuration, are evaluated. Finally, the reduction potential related to the operational costs and carbon emissions given by the fuel savings obtained by the weight reduction, is also analyzed.

The final optimized proposal, obtained by additive manufacturing, presents a marked reduction in mass and an increase in the safety factor for one of the load cases. Cost analysis shows a reduction in manufacturing costs and a potential for considerable reduction in operating costs and emissions.

Keywords: Additive Manufacturing, Topology Optimization, Generative Design, Aircraft Sector, Carbon Emissions, Customization.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	x
Nomenclatura	xii
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Estrutura da Dissertação	2
2. Estado da Arte	3
2.1. Fabrico aditivo	3
2.1.1. Processo.....	4
2.1.2. Tecnologias	5
2.2. Fabrico aditivo na aeronáutica	6
2.3. Projeto para fabrico aditivo (DfAM)	9
2.3.1. Otimização topológica	9
2.3.2. Projeto generativo	10
2.3.3. Otimização topológica vs Projeto generativo	12
2.3.4. Limitações de projeto	13
2.4. Process-Based Cost Model (PBCM).....	14
3. Caso de estudo	15
3.1. Definição do problema	15
3.1.1. Propriedades mecânicas da liga	16
3.1.2. Massa do componente	17
3.1.3. Definição do carregamento	18
3.2. Otimização topológica	27
3.2.1. Domínio de projeto	27
3.2.2. Condições de fronteira	28

3.2.3.	Parâmetros de controlo	28
3.3.	Projeto generativo	30
3.3.1.	Domínio de projeto	30
3.3.2.	Propriedades dos materiais	33
3.3.3.	Condições de carregamento e fronteira	33
3.3.4.	Parâmetros de controlo	34
3.4.	Resultados e Discussão	36
3.4.1.	Otimização topológica	36
3.4.2.	Projeto generativo	38
3.4.3.	Comparação de resultados	42
4.	Análise de custos e emissões	44
4.1.	Custos de fabrico.....	44
4.1.1.	Modelo de custo - Maquinagem CNC	44
4.1.2.	Modelo de custo - Fabrico aditivo	52
4.1.3.	Resultados e discussão.....	65
4.2.	Custos operacionais e emissões de carbono	68
5.	Discussão e Conclusão	71
	Bibliografia.....	73
	Anexos.....	I
	Anexo A –Especificações geométricas das configurações.	II
	Anexo B – Dados do processo iterativo de obtenção de condições de carregamento.	VI
	Anexo C – Dados e configurações do processo de otimização topológica.	VII
	Anexo D – Modelos geométricos obtidos no projeto generativo.	IX
	Anexo E - Sequência de processos de maquinagem CNC.	XI

Índice de Figuras

Figura 1 - Fases do processo de fabrico aditivo (adaptada de [6, 7]).....	4
Figura 2 - Processo de PBF genérico (adaptada de [9]).	5
Figura 3 – Publicações de fabrico aditivo no âmbito da aeronáutica (retirado de [12]).	7
Figura 4 – Exemplos de aplicação: a) Bocal GE Aviation; b), c) e d) Bracket do Eurostar 3000 [13, 14].....	8
Figura 5 - Invólucro metálico do sensor T25 [15].....	8
Figura 6 - Exemplo de aplicação de OT numa peça de suporte metálica (adaptada de [18]).	9
Figura 7 – Fluxograma do processo genérico de OT.....	10
Figura 8 - Exemplo PG: a) configuração inicial vs final; b) hipóteses de configurações [21].	11
Figura 9 - Fluxograma do processo genérico de PG.	11
Figura 10 - Setup de análise PG (adaptada de [21]).	12
Figura 11 - Peça de suporte (modelo CAD obtido através do SW2020).	15
Figura 12 - Configuração genérica de uma asa.....	15
Figura 13 – Furos relativos às fixações (Parafusos a vermelho e rebites a amarelo).	16
Figura 14 - Fluxograma relativo à definição das condições de carregamento.	18
Figura 15 - Solicitações de carregamento: a) Vertical; b) Horizontal; c) Inclinado (45°).	19
Figura 16 – Condições de fronteira: a) Fixações; b) Zonas de contacto.	22
Figura 17 – Resultados da análise de convergência da malha com singularidades.	23
Figura 18 - Singularidade do caso de carga horizontal (indicada com um círculo vermelho). ...	23
Figura 19 - Resultados da análise de convergência da malha sem singularidades.....	24
Figura 20 - Deformação e zona de tensão máxima do caso vertical: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.	25
Figura 21 - Deformação e zona de tensão máxima do caso horizontal: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.	26
Figura 22 - Deformação e zona de tensão máxima do caso inclinado: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.	26
Figura 23 - Zonas preservadas: a) parafusos; b) rebites.....	27
Figura 24 - Eixo de simetria.	28
Figura 25 - Representação geométrica obtida no resultado com restrição de tensão.	29
Figura 26 - Representação geométrica obtida com redução de massa de 50%.	29
Figura 27 - Geometria preservada: a) Zonas preservadas inseridas no componente b) Zonas preservadas.....	31
Figura 28 - Geometria obstáculo - Placas de fuselagem (cor vermelha).	32
Figura 29 - Geometria obstáculo - Interior e exterior de fixações (cor vermelha).	32
Figura 30 - Geometria obstáculo - Pins para carregamento (cor vermelha).	32
Figura 31 - Domínio de projeto PG (Regiões preservadas a verde e obstáculo a vermelho). ...	33
Figura 32 - Carregamento e fixações na geometria preservada: setas azuis e cadeados brancos respetivamente.....	34

Figura 33 - Referencial para fabrico aditivo do Projeto Generativo.	35
Figura 34 – Proposta de configuração geométrica OT.	36
Figura 35 – Deformação e zona de tensão máxima do caso vertical da OT: a) Deformação; b) Tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.	37
Figura 36 - Deformação e zona de tensão máxima do caso horizontal da OT: a) Deformação; b) Tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.	37
Figura 37 - Deformação e zona de tensão máxima do caso inclinado da OT: a) Deformação; b) Tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.	38
Figura 38 - Gráfico de comparação de Outcomes do PG.	39
Figura 39 - Proposta de configuração geométrica PG.	40
Figura 40 – Deformação e zona de tensão máxima do caso vertical do PG: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima representada por um círculo vermelho.	41
Figura 41 - Deformação e zona de tensão máxima do caso horizontal do PG: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima representada por um círculo vermelho.	41
Figura 42 - Deformação e zona de tensão máxima do caso inclinado do PG: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima representada por um círculo vermelho.	42
Figura 43 - Bloco bruto de material com configuração inicial como referência – Fusion 360.	49
Figura 44 - Sequência de atividades do fabrico aditivo.	53
Figura 45 - Suportes gerados: Perspetiva_1 (Netfabb).	60
Figura 46 - Suportes gerados: a) Perspetiva_2; b) Perspetiva_3 (Netfabb).	60
Figura 47 - Distribuição de componentes na plataforma (Netfabb).	61
Figura 48 – Distribuição de custos por modelo.	66
Figura 49 – Comparação de custos: Maquinagem CNC vs Fabrico aditivo.	66
Figura 50 – Metodologia para o cálculo do potencial de redução de custos e emissões.	68
Figura 51 - Preço mensal do combustível a jato nos últimos 10 anos [45].	69

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tecnologias de fabrico aditivo (adaptada de [8]).	5
Tabela 2 - Métodos de PBF [10].	6
Tabela 3 - Especificações de projeto para fabrico aditivo (adaptada de [23, 24]).	13
Tabela 4 - Composição Química - Ti6Al4V - Grade 5 (adaptada de [29]).	17
Tabela 5 - Propriedades Mecânicas Ti-6Al-4V - Intervalos admissíveis (adaptada de [30]).	17
Tabela 6 - Propriedades Mecânicas Ti-6AL-4V (Grade 5) (adaptada de [29, 31]).	17
Tabela 7 - Especificações do componente original.	18
Tabela 8 - Cálculo do parâmetro ns_x (adaptada de [32]).	20
Tabela 9 - Cálculo do parâmetro ns_y (adaptada de [32]).	20
Tabela 10 - Classificação dos parâmetros de Pugsley.	21
Tabela 11 - Parâmetros de controlo da malha;	21
Tabela 12 - Carregamento para análise de convergência.	22
Tabela 13 – Especificações dos parâmetros da malha final.	24
Tabela 14 - Condições de carregamento finais.	25
Tabela 15 - Deslocamento máximo na configuração original.	26
Tabela 16 - Propriedades de fabrico aditivo para PG.	35
Tabela 17- Comparação de configurações para OT.	36
Tabela 18 – Comparação entre deslocamentos máximos – original vs OT.	38
Tabela 19 - Comparação de Outcomes do Projeto Generativo.	39
Tabela 20 – Configuração Original vs Configuração PG.	41
Tabela 21 – Comparação entre deslocamentos máximos - original vs PG.	42
Tabela 22 - Comparação entre propostas de configuração.	43
Tabela 23 - Variáveis relativas aos custos variáveis do setup.	45
Tabela 24 -Variáveis relativas aos custos fixos do setup.	46
Tabela 25 -Variáveis relativas aos custos variáveis da maquinagem do componente.	46
Tabela 26 - Variáveis relativas aos custos fixos da maquinagem do componente.	47
Tabela 27 – Resultados da simulação de maquinagem CNC.	49
Tabela 28 - Parâmetros da máquina CNC (com base em [34]).	50
Tabela 29 – Variáveis determinadas para os custos variáveis do setup.	50
Tabela 30 - Variáveis determinadas para os custos fixos do setup.	51
Tabela 31 – Variáveis determinadas para os custos variáveis da maquinagem.	51
Tabela 32 – Variáveis determinadas para os custos fixos da maquinagem.	52
Tabela 33 - Variáveis relativas aos custos variáveis do Setup.	54
Tabela 34 - Variáveis relativas aos custos fixos do setup.	54
Tabela 35 - Variáveis relativas aos custos variáveis da impressão.	55
Tabela 36 - Variáveis relativas aos custos fixos da impressão.	56
Tabela 37 - Variáveis relativas aos custos variáveis da remoção e limpeza.	57
Tabela 38 - Variáveis relativas aos custos variáveis do Shot Peening.	58

Tabela 39 - Variáveis relativas aos custos fixos do Shot Peening.	58
Tabela 40 - Parâmetros da máquina de impressão.	59
Tabela 41 - Dimensões da plataforma e componente.	61
Tabela 42 - Resultados da simulação de fabrico - Netfabb.	61
Tabela 43 – Variáveis determinadas para os custos variáveis do setup.	62
Tabela 44 - Variáveis determinadas para os custos fixos do setup.....	62
Tabela 45 - Variáveis determinadas para os custos variáveis da impressão.	63
Tabela 46 - Variáveis determinadas para os custos fixos da impressão.	64
Tabela 47 - Variáveis determinadas para os custos variáveis da remoção e limpeza.	64
Tabela 48 - Variáveis relativas aos custos variáveis do pós-processamento.	65
Tabela 49 - Variáveis determinadas para os custos fixos do pós-processamento.....	65
Tabela 50 - Parâmetros do percurso aéreo do caso de estudo [35].....	69
Tabela 51 - Resultados relativos aos custos operacionais e emissões.....	70

Nomenclatura

ALE – Análise Linear Estática

AM – *Additive Manufacturing*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAD – *Computer-Aided Design*

CAE – *Computer Aided Engineering*

CAM – *Computer Aided Manufacture*

CF – Condições de Fronteira

CNC – Controlo Numérico Computorizado

DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*

EBM – *Electron Beam Melting*

ISO – *International Organization for Standardization*

MEF – Método dos Elementos Finitos

OT – Otimização Topológica

PA – Poliamida

PBCM – *Process-Based Cost Model*

PBF – *Powder Bed Fusion*

PBT – Polibutileno Teleftalado

PC – Policarbonato

PG – Projeto Generativo

PP - Polipropileno

RP – *Rapid Prototyping*

SCE – *Specific Carbon Emissions*

SLM – *Selective Laser Melting*

SLS – *Selective Laser Sintering*

STL – Stereolitografia ou *Standard Tessellation Language*

TPU – Termoplástico Poliuretano

1. Introdução

1.1. Motivação

O fabrico aditivo é uma tecnologia de fabrico que tem crescido a um ritmo acelerado nas últimas décadas, sendo cada vez mais utilizado em diversas aplicações dos diferentes setores da indústria como a aeronáutica, automóvel, biomédica, entre outras. Este interesse comercial está associado a diferentes fatores, tais como: constante inovação tecnológica e capacidade de trabalhar com uma grande diversidade de materiais. Para além disso, o fabrico aditivo dá resposta às crescentes necessidades do mercado relacionadas com a customização, foco na sustentabilidade e redução de custos e tempos de fabrico, tirando partido da sua capacidade para produzir componentes de elevada complexidade geométrica [1].

No setor aeronáutico esta capacidade de customização do fabrico aditivo ganha especial importância pois, ao reduzir a massa de diversos componentes através da sua reconfiguração, otimizando a distribuição de material e quantidade de ligações, permite a redução de custos e emissões. Este facto é particularmente importante para o caso dos componentes metálicos estruturais e de suporte, presentes em elevado número numa aeronave. No entanto, devido aos regulamentos de segurança e necessidade de certificação associados ao risco de falha, o fabrico destes componentes por AM ainda se encontra limitado [2].

Posto isto, o trabalho desenvolvido nesta dissertação pretende avaliar o potencial da aplicação de diferentes métodos de projeto para fabrico aditivo a um caso de estudo de um componente metálico de suporte no âmbito da indústria aeronáutica.

1.2. Objetivos

Com este trabalho pretende-se aplicar duas ferramentas de projeto para fabrico aditivo (*Design for AM*) a um caso de estudo de um componente metálico do ramo da aeronáutica com vista a reduzir a sua massa sem comprometer o funcionamento e a resistência ao carregamento. Para além disso, procura-se avaliar o impacto económico e o potencial de redução de emissões associados a essa redução de massa.

Para tal, obtêm-se duas novas propostas de configuração geométrica do componente através de otimização topológica e projeto generativo numa ótica de projeto para fabrico aditivo e redução de massa (*Design for AM and Lightweight*).

Em seguida é efetuado um estudo que pretende avaliar e comparar os custos de fabrico de ambas as configurações, inicial e final, obtidas através de maquinaria CNC e fabrico aditivo, respetivamente.

Por último são realizados dois estudos que pretendem avaliar o potencial de redução de custos operacionais e emissões diretas associados à poupança de combustível.

1.3. Estrutura da Dissertação

A estrutura desta dissertação é descrita pelos seguintes pontos:

- **Capítulo 1** – *Introdução* – Breve descrição da motivação, tópicos, objetivos e estrutura que caracterizam a presente dissertação.
- **Capítulo 2** – *Revisão bibliográfica* – Revisão dos fundamentos teóricos que serviram de base para a realização deste trabalho, que inclui o fabrico aditivo, respetivos processos, métodos e limitações de projeto, a sua relação com o setor aeronáutico e o modelo de custo aplicado.
- **Capítulo 3** – *Caso de estudo* – Apresentação do componente do caso de estudo e descrição das considerações necessárias para a aplicação dos métodos de projeto pretendidos. Apresentação dos processos utilizados e resultados obtidos na aplicação dos respetivos métodos.
- **Capítulo 4** – *Análise de custos e emissões* – Descrição dos modelos e apresentação dos resultados obtidos relativos aos estudos de impacto económico e potencial de redução de emissões.
- **Capítulo 5** – *Discussão e Conclusão* – Discussão e resumo das conclusões obtidas neste trabalho e sugestões de trabalho futuro.

2. Estado da Arte

Neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica dos temas que serviram de base teórica para o desenvolvimento da presente dissertação.

Abordam-se temas como o projeto generativo e otimização topológica, que são importantes ferramentas de projeto para fabrico aditivo (*Design for AM*).

É também discutida a relação entre o fabrico aditivo e a aeronáutica, as suas vantagens, limitações e aplicações atuais no ramo.

E por último, é feita uma breve introdução ao modelo de custo PBCM.

2.1. Fabrico aditivo

Segundo a norma *ISO/ASTM 52900* [3], o termo fabrico aditivo refere-se a qualquer tecnologia que baseada numa representação geométrica ou modelo 3D, crie componentes físicos por sucessivas adições de camadas de material ao contrário dos processos convencionais de natureza subtrativa que assentam na remoção do mesmo. Esta definição é amplamente aplicável a todos os tipos de material, incluindo metais, polímeros, cerâmicos, compósitos e sistemas biológicos.

A origem deste método de fabrico está associada, de acordo com alguns autores, a *Chuck Hull*, quando em 1984 transformou fotopolímeros em configurações 3D utilizando lasers ultravioleta para o efeito [4, 5]. É usualmente referido como impressão 3D, AM, ou ainda *Rapid Prototyping*, pois uma das primeiras e principais aplicações desta tecnologia foi na produção rápida e económica de protótipos [4].

Uma das suas principais vantagens é a sua alta capacidade de obtenção de componentes de grande complexidade geométrica que, ou não eram possíveis de obter, ou exigiam a utilização de uma configuração elaborada e dispendiosa da máquina e/ou montagem de dois ou mais componentes. Para além disso, é bastante flexível, pois permite a produção de lotes de diferentes peças customizadas sem desperdício e sem custos adicionais, como seria expectável no caso de ser necessário um molde, ferramenta ou dispositivo de fixação diferente por componente como é recorrente no fabrico tradicional [6].

No entanto, atualmente esta tecnologia ainda apresenta um conjunto de limitações que por vezes colocam em causa a sua viabilidade. Entre outras, destacam-se: a necessidade de realizar pós processamento, a elevada exigência de investimento, as restrições relativas ao tamanho máximo do componente e a baixa capacidade para produção em massa [6].

2.1.1. Processo

O processo genérico do fabrico aditivo pode ser dividido em três fases principais: conceção, manufatura e pós-processamento [6, 7] (Figura 1, adaptada de [6, 7]).

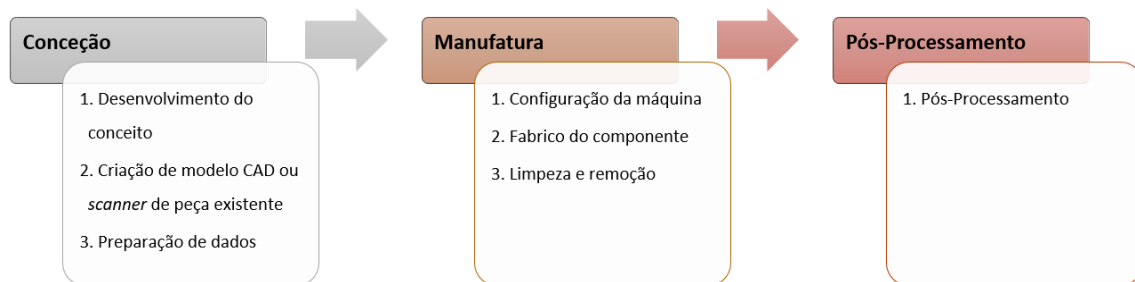


Figura 1 - Fases do processo de fabrico aditivo (adaptada de [6, 7]).

Conceção

A fase de conceção, inicia-se com o desenvolvimento do conceito e posterior modelação geométrica do componente através de um *software* CAD apropriado, ou caso a peça já exista, recorrendo a um equipamento de engenharia inversa adequado como um *scanner* de objetos 3D. Em seguida, de forma a possibilitar a interpretação geométrica do ficheiro pela máquina de impressão, é necessário converter os dados do modelo obtido para o formato STL¹.

Manufatura

Depois de fornecidos os dados do componente à máquina de impressão, dá-se início à fase de manufatura. Em primeiro lugar, é necessário configurar a máquina introduzindo todos os parâmetros necessários à realização da impressão, a máquina converte o ficheiro STL em formato NC ou *G-Code*, calcula o melhor trajeto de deposição das sucessivas camadas de material de forma a minimizar tempo e custo e procede à manufatura do componente. A impressão é realizada autonomamente pela máquina e sem influência do operador.

Depois de produzida a peça é necessário limpar e remover a mesma que, por vezes, dependendo do componente e tecnologia em questão, é necessário interagir com a peça, para serem retirados os suportes gerados na impressão.

Pós-Processamento

Depois de removidos da máquina de impressão, apesar de não ser necessário em todas as tecnologias, é usual os componentes serem sujeitos a algum tipo de pós-processamento de modo a cumprirem os requisitos exigidos. Processos de acabamento de forma a respeitar tolerâncias ou tratamentos térmicos para atingir determinadas propriedades mecânicas, são alguns dos mais comuns.

¹ Formato de ficheiro de dados do modelo 3D, que descreve a superfície geométrica do objeto como uma tesselação de triângulos, usado para comunicar as geometrias 3D a máquinas de impressão [3].

2.1.2. Tecnologias

Segundo a norma ISO/ASTM 52900 [3], o fabrico aditivo é classificado em sete distintas categorias ou famílias de tecnologias, representadas pela Tabela 1 (adaptada de [8]). Cada uma destas é composta por diferentes métodos (ou sub-tecnologias) e materiais utilizados, sendo selecionadas para a produção de uma determinada peça consoante os materiais, parâmetros e objetivos pretendidos para cada caso.

Tabela 1 - Tecnologias de fabrico aditivo (adaptada de [8]).

Tecnologia	Materiais	Aplicações comerciais típicas
<i>Powder Bed Fusion</i>	Metais, polímeros	Protótipos, Componentes
<i>Direct Energy Deposition</i>	Metais	Componentes, Reparações, Reforços
<i>Sheet Lamination</i>	Metais, papel	Protótipos, Componentes
<i>Binder Jetting</i>	Metais, polímeros, areia de fundição	Protótipos, Componentes, Moldes de fundição
<i>Material Jetting</i>	Polímeros, ceras	Protótipos, Moldes
<i>Material Extrusion</i>	Polímeros	Protótipos
<i>Vat photopolymerization</i>	Fotopolímeros	Protótipos

2.1.2.1. Powder Bed Fusion

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900 [3], *Powder Bed Fusion* corresponde a uma tecnologia de fabrico aditivo no qual é utilizada energia térmica para fundir seletivamente regiões de uma cama de material em pó. A sua configuração genérica encontra-se representada na Figura 2 (adaptada de [9]).

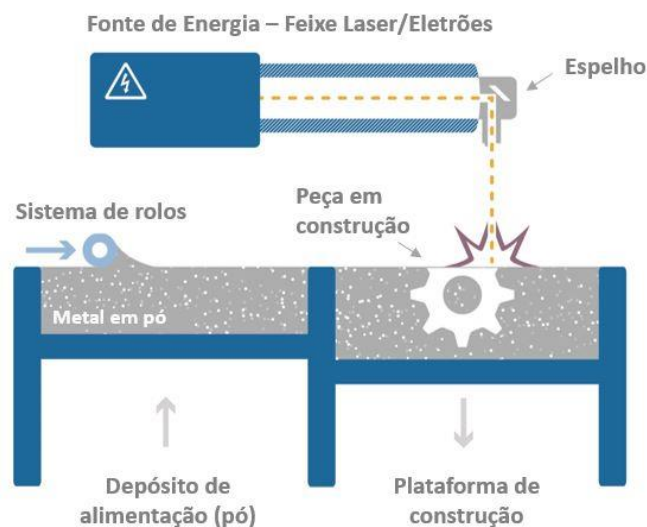


Figura 2 - Processo de PBF genérico (adaptada de [9]).

Processo

O processo inicia-se com a introdução do material pretendido na forma de pó num depósito de alimentação a partir do qual, através de um sistema de rolos ou outro, é gradualmente transportado camada a camada para um substrato colocado na plataforma de construção.

Neste substrato incide um feixe laser ou de eletrões refletido a partir de uma fonte de energia através de um sistema de espelhos ou *scanner xy*, que funde seletivamente regiões da cama de pó, depositando sucessivas camadas de material.

Depois de concluída a impressão, remove-se o componente fabricado e o restante pó do depósito de construção é reciclado para fabrico de um novo componente do mesmo material.

Métodos

A PBF é composta por quatro principais métodos, representados pela Tabela 2, que diferem entre si em dois principais fatores: materiais (pó) e fontes de energia utilizados.

Tabela 2 - Métodos de PBF [10].

Método	Fonte de energia	Materiais
Selective Laser Sintering (SLS)	Laser	Polímeros: PP, PA, PC, TPU, PBT
Selective Laser Melting (SLM) / Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Laser	Metais: Alumínio, Titânio, Crómio-Cobalto, Ligas de Ni, Aços
Electron Beam Melting (EBM)	Feixe de Eletrões	Metais: Titânio, Crómio-Cobalto

Os métodos de SLM e DMLS encontram-se agrupados, pois tanto recorrem à mesma fonte de energia, como são ambos utilizados para o fabrico de metais. A distinção entre eles reside no facto de no SLM o material em pó ser totalmente fundido enquanto no DMLS é apenas sinterizado², sendo exclusivamente aplicável a ligas metálicas [10].

2.2. Fabrico aditivo na aeronáutica

A capacidade do fabrico aditivo para produzir componentes de elevada complexidade geométrica sem necessitar de configurações elaboradas de máquinas, moldes e/ou ferramentas, permite a redução de tempos de ciclo de fabrico e possibilita a produção localizada, contribuindo para sistemas de cadeia de abastecimento mais eficientes. Para além disso, esta flexibilidade de projeto e de customização permite alcançar melhores condições de otimização de material e funcionamento em relação ao fabrico convencional, obtendo componentes mais leves e reduzindo a necessidade de montagem de várias peças para determinada função.

² Sinterização – Aquecimento do material em pó até temperaturas próximas da temperatura de fusão.

Estes atributos associados ao rápido desenvolvimento das diferentes tecnologias ao longo dos últimos anos, levaram a que o fabrico aditivo seja cada vez mais utilizado em diferentes aplicações do ramo da aeronáutica, deixando de ser exclusivamente recorrido para a obtenção de protótipos como inicialmente [11].

Os dados do gráfico da figura seguinte, baseado em [12], demonstram o crescente interesse e aumento da investigação de tecnologias de fabrico aditivo no âmbito da aeronáutica nos últimos anos, ilustrado através do número de publicações no ramo, sendo notório o elevado crescimento dos últimos 10 anos.

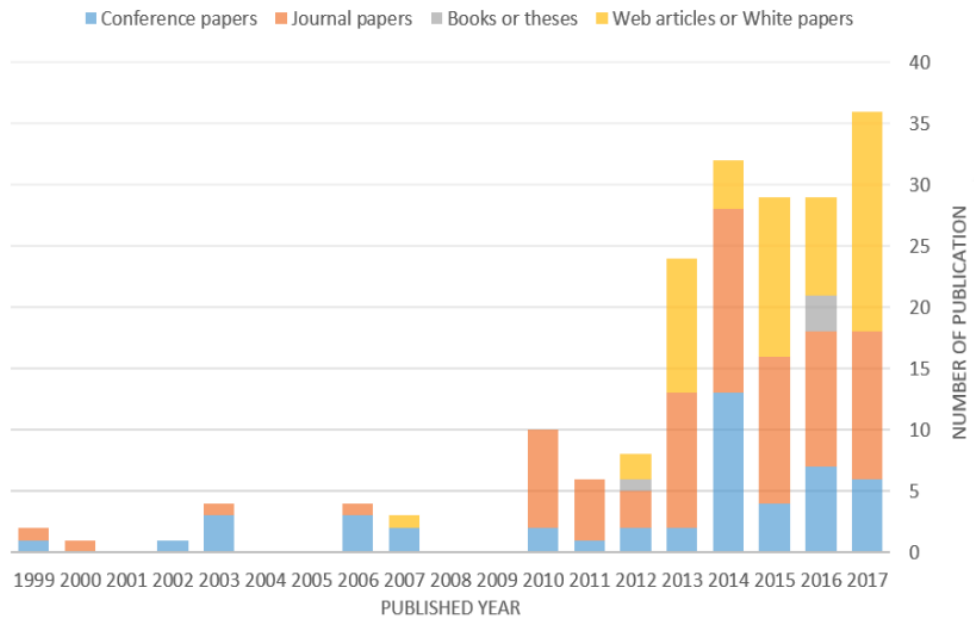


Figura 3 – Publicações de fabrico aditivo no âmbito da aeronáutica (retirado de [12]).

A redução da massa e da quantidade de componentes assembled adquirem especial interesse para este ramo, pois para além do potencial de redução de custos de fabrico associado, permitem uma maior eficiência de serviço. Por um lado, ao reduzir a massa exige-se uma quantidade menor de combustível para cada percurso, reduzindo os custos de funcionamento e as emissões de carbono associados. Por outro, ao reduzir a montagem de componentes reduz-se a quantidade de ligações e fixações necessárias como soldaduras, parafusos, rebites etc... o que reduz a mão de obra e manutenção necessárias e por consequência os custos associados às mesmas [12].

Em seguida, apresentam-se dois exemplos de aplicação do fabrico aditivo, no ramo da aeronáutica, que permitiram reduzir a massa e quantidade de componentes assembled:

- Em 2015, a *General Electric Aviation* desenvolveu um bocal de combustível para um motor a jato (*LEAP engine*), Figura 4, que permitiu reduzir a massa em 25 % e transformar uma montagem de 20 peças em apenas uma [13];

- A *Airbus Defence and Space* desenvolveu um *bracket* estrutural de alumínio para o *Eurostar 3000*, Figura 4, que permitiu reduzir 35 % da massa, aumentar 40 % da rigidez e reduzir uma assemblagem de 4 peças e 44 rebites para apenas uma [14].

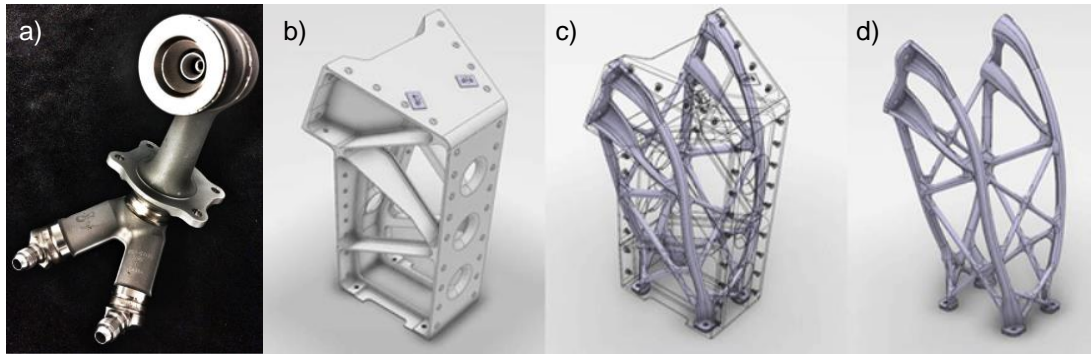


Figura 4 – Exemplos de aplicação: a) Bocal GE Aviation; b), c) e d) Bracket do Eurostar 3000 [13, 14].

Um dos maiores constrangimentos desta tecnologia para este ramo, especialmente para o fabrico de peças metálicas de suporte e estruturais, está relacionado com a elevada exigência das normas, certificação e controlo necessários cumprir para cada componente. Esta exigência é justificada pelo risco de segurança associado em caso de falha [12].

De qualquer forma, devido ao seu potencial, com a inovação tecnológica e crescente investigação o fabrico aditivo está gradualmente a ultrapassar essa barreira. Em 2015, a empresa *General Electric Aviation* desenvolveu um invólucro metálico para a introdução de um sensor de temperatura (*T25 sensor*), ilustrado pela Figura 5, sendo o primeiro componente produzido em AM a ser certificado pela *U.S. Federal Aviation Administration* (FAA) e a ser implementado nos aviões comerciais [15].



Figura 5 - Invólucro metálico do sensor T25 [15].

2.3. Projeto para fabrico aditivo (DfAM)

Tendo em conta que o componente do caso de estudo desta dissertação se enquadra no ramo da aeronáutica, é de especial interesse a aplicação de técnicas de projeto para fabrico aditivo numa ótica de projeto para redução de massa; isto é, projetar o componente de forma a reduzir ou minimizar a sua massa sem comprometer a rigidez e resistência às cargas a que é solicitado.

Posto isto, são abordados dois métodos distintos: otimização topológica e projeto generativo.

2.3.1. Otimização topológica

Otimização topológica refere-se a um método de otimização estrutural que através de simulações em *softwares* CAE calcula a melhor distribuição espacial de material num certo domínio, respeitando uma ou mais restrições, definidas *à priori*, e minimizando ou maximizando uma determinada função objetivo [10].

É usualmente aplicado no âmbito da engenharia mecânica ou civil com o objetivo de minimizar a massa ou minimizar a complacência/maximizar a rigidez de uma determinada estrutura ou componente [16]. Há cerca de dois anos, a empresa *General Motors* recorreu a este método que possibilitou a redução de aproximadamente 180 kg no desenvolvimento do SUV *Chevrolet Equinox*, sem comprometer as características de funcionamento [17].

A Figura 6 (adaptada de [18]) apresenta um exemplo genérico de reconfiguração de uma peça de suporte metálica através da aplicação do método de otimização topológica.

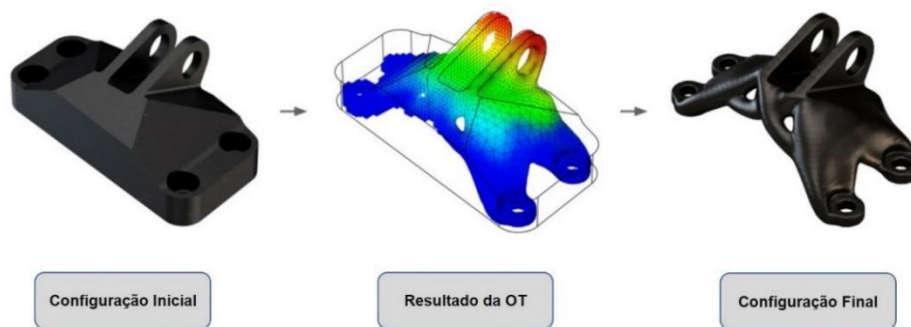


Figura 6 - Exemplo de aplicação de OT numa peça de suporte metálica (adaptada de [18]).

O processo genérico deste método é representado pelo fluxograma da Figura 7, sendo descrito em maior detalhe na secção 3.2.

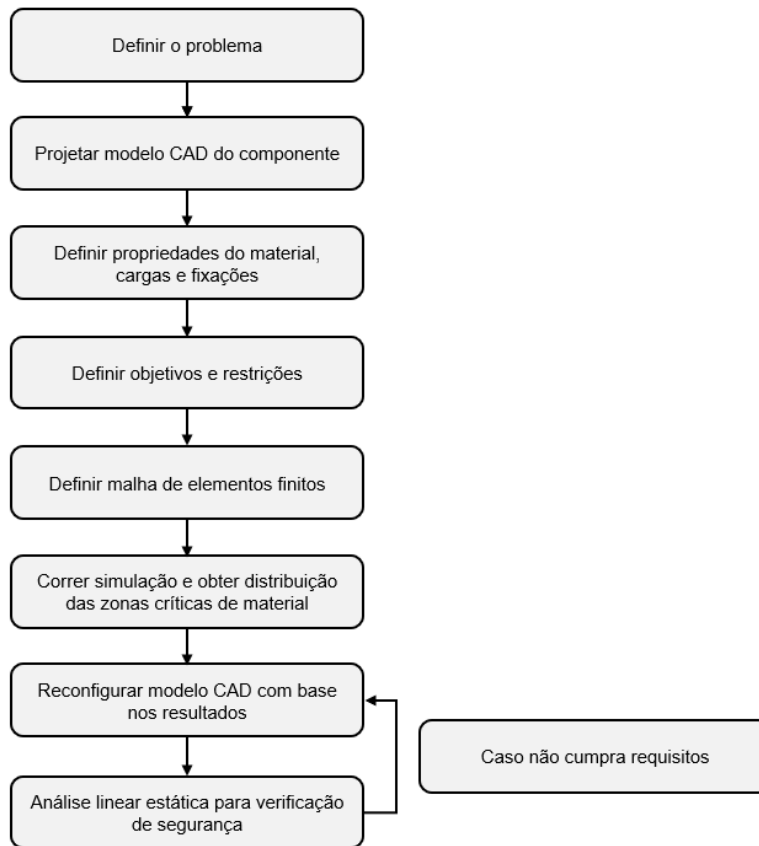


Figura 7 – Fluxograma do processo genérico de OT.

O resultado direto da simulação de otimização topológica não corresponde a uma geometria CAD final pronta para ser diretamente verificada ou produzida, mas sim a uma representação geométrica de uma possível solução. Tendo isso em conta, é necessário remodelar o componente inicial de acordo com as alterações sugeridas por esses mesmos resultados.

2.3.2. Projeto generativo

Generative design ou projeto generativo pode ser descrito como um método de otimização de projeto que, através da aplicação de diversos algoritmos em *softwares* de CAE, calcula um conjunto de configurações geométricas possíveis, através de um processo iterativo. Para tal, é necessário definir um conjunto de parâmetros, incluindo materiais, cargas solicitadas, domínio de projeto, tecnologias de fabrico, entre outros, assim como estabelecer os objetivos pretendidos que, há semelhança da OT, consideram-se duas principais possibilidades: minimizar massa ou minimizar complacência [17].

Este método é referido por alguns autores como um processo que replica a estratégia da evolução natural devido ao seu carácter iterativo, testando e reajustando a cada iteração. Para além disso, a maioria das configurações geométricas obtidas apresentam uma forma complexa e orgânica, sendo frequentemente impossíveis de obter através de técnicas convencionais de

produção. Este facto torna o fabrico aditivo no candidato mais adequado à produção das soluções obtidas através do projeto generativo [19, 20].

A Figura 8 (adaptada de [21]) apresenta um exemplo de aplicação deste método num dispositivo de fixação do cinto de um veículo, onde foi possível reduzir uma assemblagem de oito peças para apenas uma, tornando-o 40% mais leve e 20% mais resistente [21].

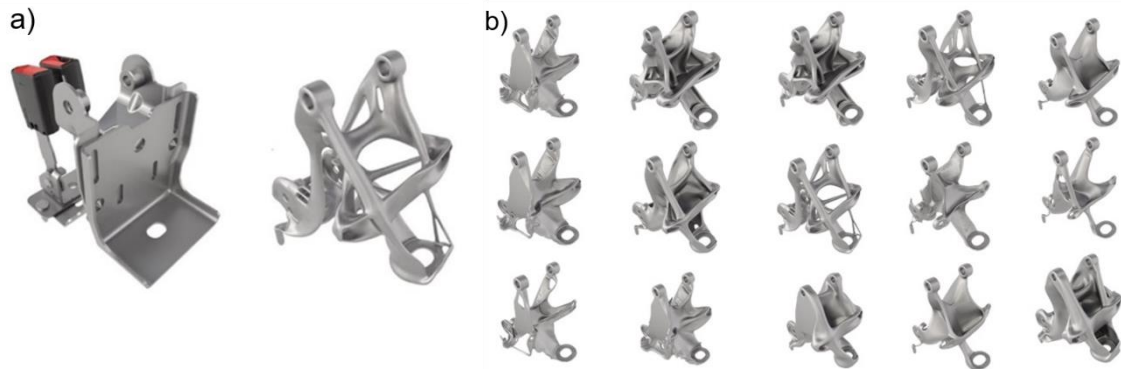


Figura 8 - Exemplo PG: a) configuração inicial vs final; b) hipóteses de configurações [21].

O processo genérico do PG é representado pelo fluxograma da Figura 9, sendo descrito em maior detalhe na secção 3.3.

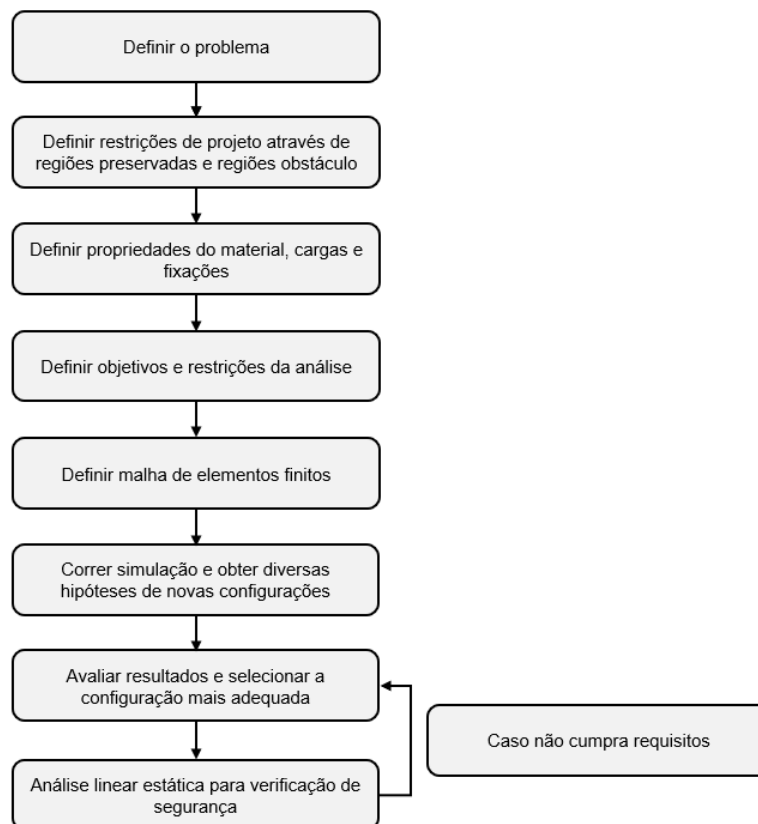


Figura 9 - Fluxograma do processo genérico de PG.

2.3.3.Otimização topológica vs Projeto generativo

Ao contrário da otimização topológica o projeto generativo é uma ferramenta bastante recente, pelo que na literatura disponível a sua definição ainda não é universal, sendo por vezes considerados o mesmo. No entanto, apesar do objetivo final ser igual, obter a configuração topológica otimizada para um determinado conjunto de requisitos, apresentam características essenciais que os distinguem:

Num processo de OT é estritamente necessário o desenvolvimento de um conceito original que atue como ponto de partida para a análise. Num caso de estudo de um componente já em funcionamento, usualmente o próprio componente assume esse papel, caso contrário é um processo inteiramente baseado na intuição do engenheiro. Para além disso, apresenta como resultado direto uma distribuição de tensões que é necessário ser interpretada pelo engenheiro, e que funciona como referência para a posterior remodelação da peça original e obtenção da nova configuração.

No caso do PG, o ponto de partida corresponde apenas aos parâmetros e limites definidos inicialmente, através de zonas preservadas e zonas obstáculo, fixações e cargas, e a análise computacional, depois de introduzidos os objetivos, apresenta como resultado direto um conjunto de configurações geométricas diferentes, catalogadas de acordo com as propriedades selecionadas (tensão, fator de segurança, massa etc...). Neste caso, o engenheiro necessita apenas de selecionar a hipótese mais adequada ao pretendido e exportar diretamente.

A Figura 10 ilustra um exemplo de *setup* de uma análise de projeto generativo, representado por zonas vermelhas correspondentes a zonas obstáculo onde não pode existir material e por zonas verdes correspondentes a zonas preservadas onde o material não pode ser removido, de onde resulta o componente do lado direito da figura. O exemplo apresentado pode ser comparado com o da Figura 6 (adaptada de [22]) correspondente à otimização topológica, onde o *setup* inicial, que serve de ponto de partida à análise, corresponde ao próprio componente.

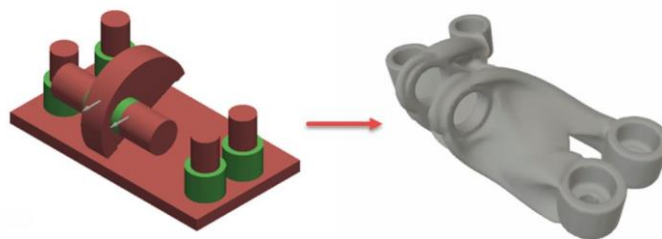


Figura 10 - Setup de análise PG (adaptada de [21]).

Para além disso, a OT é um método de origem académica, estabelecido na literatura, e bastante utilizado na indústria, estando fundamentado através dos respetivos algoritmos e modelos matemáticos que se encontram disponíveis para qualquer utilizador.

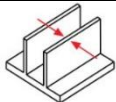
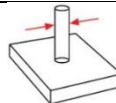
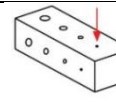
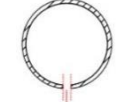

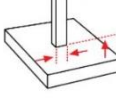

Por outro lado, o PG é uma ferramenta que surge como produto de vendas da empresa *Autodesk*, cujo algoritmo e modelo matemático são partes integrantes de uma “receita secreta” que é aplicada para a obtenção de determinadas soluções com base em determinados parâmetros.

2.3.4. Limitações de projeto

Apesar de se considerar o fabrico aditivo como uma tecnologia com “total liberdade de projeto”, pois permite a produção de peças de elevada complexidade geométrica que seriam impossíveis de fabricar por qualquer tecnologia de fabrico convencional ou máquina CNC, este apresenta uma série de limitações que é necessário ter em conta no projeto de um novo componente.

A Tabela 3, adaptada de [23, 24], apresenta um conjunto de especificações que servem de referência ou *guideline* para o projeto de componentes metálicos fabricados em SLM/DMLS.

Tabela 3 - Especificações de projeto para fabrico aditivo (adaptada de [23, 24]).

Especificação	Descrição
 <p>Espessura da parede</p>	A espessura da parede mínima para garantir uma boa impressão na maioria dos metais é 0.4 mm. No entanto é possível fabricar estruturas mais finas, dependendo do material, orientação e parâmetros de impressão.
 <p>Diâmetro dos pins</p>	O diâmetro mínimo de pins razoável corresponde a 1 mm. Diâmetros mais pequenos são possíveis de obter, mas implicam contornos sem qualidade.
 <p>Diâmetro dos Furos</p>	Furos com diâmetro entre 0.5 e 6 mm são passíveis de obter sem a necessidade de suportes. Furos entre 6 e 10 mm sem utilização de suporte depende da orientação da impressão. Furos horizontais superiores a 10 mm requerem suportes.
 <p>Furo extrator</p>	Furos extratores são necessário para evacuar o pó de estruturas ocas. Recomendam-se furos com diâmetros de 2 a 5 mm.
 <p>Ângulo de projeção</p>	O ângulo entre superfícies salientes e a horizontal, para não necessitar de estruturas de suporte tem de ser > 45 graus.
 <p>Fator de forma</p>	O rácio máximo entre a altura e a largura de uma estrutura é de 8:1.
 <p>Tolerâncias</p>	A tolerância no sentido da impressão é $\pm (1 - \text{espessura da camada})$ mm. No plano XY as tolerâncias mínimas são ± 0.127 mm.

2.4. Process-Based Cost Model (PBCM)

Para a realização do estudo de impacto económico relativo aos custos de fabrico pretendido neste trabalho, adotou-se um modelo que como o nome indica, avalia o custo baseado nos processos, o *Process-Based Cost Model* (PBCM).

Este modelo de custo surge com o intuito de contrariar a discrepância entre os modelos físicos e financeiros do mercado, sendo desenvolvido com base na ideia de que o custo é resultado da síntese do projeto, propriedades do material e condições de operação, dados pelos parâmetros físicos associados à realidade da tecnologia de cada processo [25].

Assim sendo, este modelo aborda a produção de um determinado componente, dividindo o processo em diferentes tarefas ou atividades sequenciais e avaliando o custo associado a cada uma. O custo total de produção é dado pela soma dos custos de cada atividade.

Para tal, segundo *Kirchain* e *Field* [25], o modelo é descrito em três passos principais:

- Identificar elementos de custo relevantes;
- Catalogar os fatores de contribuição;
- Relacionar as atividades do processo ao fator de custo.

Posto isto, e considerando um processo genérico de fabrico:

O primeiro passo, é realizado através da definição dos custos fixos e custos variáveis associados a cada atividade, divididos em elementos de custo relevantes ao processo, como o material, mão de obra, energia entre outros.

O segundo passo, refere-se aos fatores de produção que contribuem para a determinação dos elementos de custo estabelecidos, dados pelos tempos de ciclo, propriedades da máquina, áreas ocupadas, entre outros.

E por fim, obtém-se o custo por elemento, por atividade, multiplicando pelos respetivos fatores de custo dados por um preço (preço da eletricidade, preço do material em bruto, preço do operador, entre outros).

3. Caso de estudo

Neste capítulo, é apresentado o componente do caso de estudo e respetiva informação disponível, assim como as suposições e simulações necessárias para definir parâmetros e possibilitar a aplicação dos métodos de projeto para fabrico aditivo pretendidos.

Em seguida, são descritos os processos utilizados na aplicação desses mesmos métodos e apresentam-se os respetivos resultados, obtendo duas novas propostas de configuração geométrica, uma primeira através da otimização topológica e uma segunda através do projeto generativo.

3.1. Definição do problema

O componente de aeronáutica em questão, apresentado na Figura 11, corresponde a uma peça de suporte da fuselagem (ou *bracket*) fabricada em liga de Titânio (*Ti-6Al-4V Grade 5*) que se encontra no bordo de fuga das asas de um avião, representado pelo retângulo a vermelho da Figura 12. O desenho técnico do componente com todas as especificações geométricas, encontra-se disponível no Anexo A.

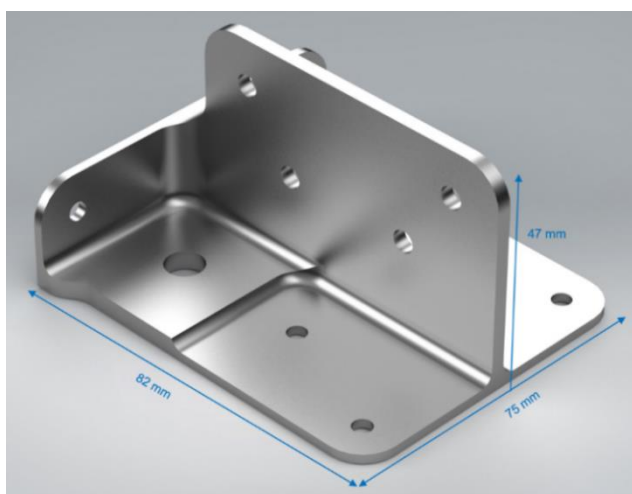


Figura 11 - Peça de suporte (modelo CAD obtido através do SW2020).

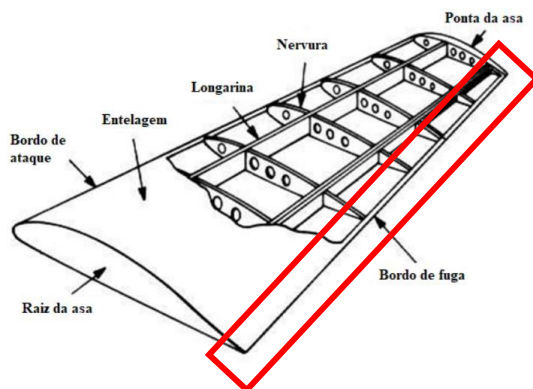


Figura 12 - Configuração genérica de uma asa.

A peça metálica é fixa às estruturas circundantes através da aplicação de seis rebites com 4,1 mm de diâmetro e dois parafusos M8, os furos correspondentes são representados pela Figura 13.

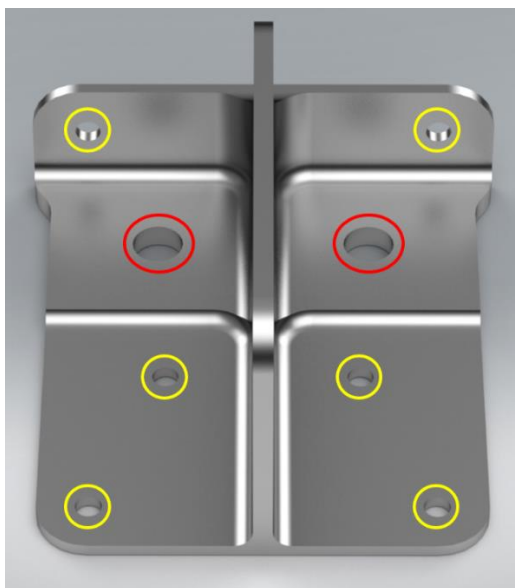


Figura 13 – Furos relativos às fixações (Parafusos a vermelho e rebites a amarelo).

A informação disponível a respeito do componente refere-se às características geométricas da peça, material da mesma, região genérica do avião onde se encontra e modo de fixação. Assim, de forma a possibilitar a aplicação de ambos os métodos de projeto para fabrico aditivo pretendidos neste estudo, resta-nos definir três parâmetros:

- Propriedades mecânicas da liga;
- Massa da configuração inicial do componente;
- Condições de carregamento.

3.1.1. Propriedades mecânicas da liga

Ti-6Al-4V Grade 5 é a liga de titânio alfa beta mais utilizada na indústria, sendo amplamente aplicada em diversos setores como o automóvel, biomédico, petroquímico e principalmente no setor aeronáutico. Isto deve-se maioritariamente à sua excelente relação resistência/peso³ e à sua elevada resistência à corrosão a temperaturas elevadas [26, 27].

Na Tabela 4 com base em [29], encontra-se representada a composição química da liga.

³ A liga Ti-6Al-4V tem uma densidade que corresponde a metade do valor da densidade das ligas de níquel e alumínio [28]

Tabela 4 - Composição Química - Ti6Al4V - Grade 5 (adaptada de [29]).

	C	Fe	N	O	Al	V	H	Ti
Fração mássica [%]	< 0.08	< 0.25	< 0.05	< 0.2	[5.5, 6.76]	[3.5, 4.5]	< 0.0125	Balanço

As propriedades mecânicas desta liga estão dependentes do tratamento térmico aplicado e da condição metalúrgica em que a mesma se encontra. A Tabela 5 apresenta os intervalos de valores admissíveis de cada parâmetro com base no artigo de C.Veiga, J.P. Davim e A.J.R Loureiro [30].

Tabela 5 - Propriedades Mecânicas Ti-6Al-4V - Intervalos admissíveis (adaptada de [30]).

Material	Dureza [HV]	Tensão de cedência σ_y [MPa]	Tensão de rotura σ_{UTS} [MPa]	Módulo de elasticidade E [GPa]
Ti-6Al-4V (Grade 5)	[300, 400]	[800, 1100]	[900, 1200]	[110, 140]

A seleção final representada pela Tabela 6, é dada pelos valores típicos apresentados em [29, 31] que estão de acordo com os intervalos definidos pela Tabela 5.

Tabela 6 - Propriedades Mecânicas Ti-6Al-4V (Grade 5) (adaptada de [29, 31]).

Material	Dureza [HV]	Tensão de cedência σ_y [MPa]	Tensão de rotura σ_{UTS} [MPa]	Módulo de elasticidade E [GPa]	Coefficiente de Poisson ν	Densidade ρ [g/cm^3]
Ti-6Al-4V (Grade 5)	345	910	1000	114	0.35	4.42

3.1.2. Massa do componente

Com as especificações de geometria e material do componente definidas, tem-se informação suficiente para calcular a respetiva massa. Esta propriedade toma especial importância para este estudo, visto que é aquela que se pretende reduzir com a aplicação dos métodos de projeto para fabrico aditivo e que servirá de referência para os resultados obtidos.

Posto isto, recorrendo às especificações geométricas do componente fornecidas foi efetuada a respetiva modelação CAD através do *Solidworks 2020* (representada anteriormente na Figura 11), que permite obter o volume e área de superfície do mesmo. Multiplicando o volume obtido pela densidade da liga apresentada na Tabela 6, tem-se a massa do componente. O volume, área de superfície e massa do componente são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações do componente original.

Componente	Material	Massa [g]	Volume [mm ³]	Área de superfície [mm ²]
	Ti-6Al-4V (Grade 5)	127.7	28888.7	21474.27

3.1.3. Definição do carregamento

Para viabilizar a obtenção de novas configurações geométricas através da aplicação dos métodos de projeto para fabrico aditivo, é estritamente necessário definir as condições de carregamento a que o componente estaria sujeito. Não sendo disponibilizada essa informação, as solicitações de carga são definidas seguindo uma metodologia descrita pela série de passos apresentada no fluxograma da Figura 14.

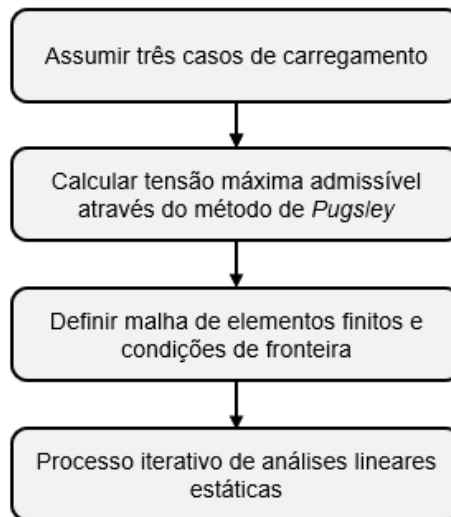


Figura 14 - Fluxograma relativo à definição das condições de carregamento.

3.1.3.1. Casos de carregamento

Considerando a geometria da peça, assumiram-se três possíveis casos de carregamento: um carregamento de direção vertical, outro horizontal e um último inclinado com ângulo de 45 graus relativamente à horizontal, representados pela Figura 15.

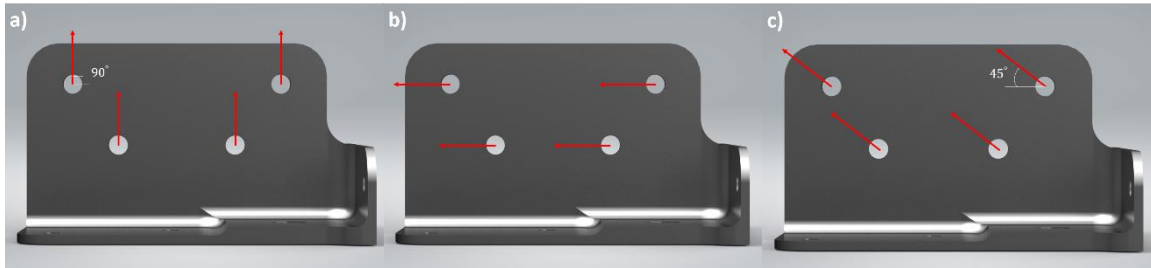


Figura 15 - Solicitações de carregamento: a) Vertical; b) Horizontal; c) Inclinado (45°).

Como é possível constatar através da análise da figura anterior, as três solicitações são caracterizadas pelos mesmos pontos de aplicação da força, sendo esta aplicada uniformemente ao longo da secção interior dos quatro furos da aba central da peça. Para facilitar o entendimento, basta imaginar a existência de quatro pins a atravessar os respectivos furos que seriam puxados nas três direções indicadas.

3.1.3.2. Método de Pugsley

Com a direção e pontos de aplicação de cada caso de carregamento estabelecidos, resta definir a intensidade de cada um dos diferentes casos de carregamento. Para tal, é necessário definir um critério universal e aplicável a todas as configurações geométricas (inicial e finais) que estabeleça um limite de tensão de segurança e permita efetuar comparações entre as mesmas.

Assim sendo, recorreu-se ao método de *Pugsley* [32] que consiste na definição de dois termos provenientes da Tabela 8 e Tabela 9, n_{sx} e n_{sy} , respetivamente. Aplicando os termos obtidos na equação (3.1), define-se um fator de segurança de projeto.

Em seguida, com o fator de projeto calculado, aplica-se a equação (3.2) [33] e obtém-se um valor de tensão limite de segurança (ou tensão máxima admissível).

$$n_{proj} = n_{sx} \cdot n_{sy} \quad (3.1)$$

$$n_{proj} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{adm}} \Leftrightarrow \sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{n_{proj}} \quad (3.2)$$

Onde σ_y corresponde à tensão de cedência definida pela Tabela 6.

Tabela 8 - Cálculo do parâmetro n_{sx} (adaptada de [32]).

		B			
A	C	vg	g	f	p
vg	vg	1,1	1,3	1,5	1,7
	g	1,2	1,45	1,7	1,95
	f	1,3	1,6	1,9	2,2
	p	1,4	1,75	2,1	2,45
g	vg	1,3	1,55	1,8	2,05
	g	1,45	1,75	2,05	2,35
	f	1,6	1,95	2,3	2,65
	p	1,75	2,15	2,55	2,95
f	vg	1,5	1,8	2,1	2,4
	g	1,7	2,05	2,4	2,75
	f	1,9	2,3	2,7	3,1
	p	2,1	2,55	3	3,45
p	vg	1,7	2,15	2,4	2,75
	g	1,95	2,35	2,75	3,15
	f	2,2	2,65	3,1	3,55
	p	2,45	2,95	3,45	3,95
Legenda					
vg	muito bom	A	Qualidade dos materiais, manufatura, manutenção e inspeção.		
g	bom				
f	razoável	B	Controlo sobre a carga aplicada ao componente.		
p	fraco				
		C	Precisão das análises de tensão, dados experimentais ou experiências com componentes semelhantes.		

Tabela 9 - Cálculo do parâmetro n_{sy} (adaptada de [32]).

		D		
		ns	s	vs
E	ns	1	1,2	1,4
	s	1	1,3	1,5
	vs	1,2	1,4	1,6
Legenda				
ns	não severo	D	Perigo para pessoas	
s	severo			
vs	muito severo	E	Impacto económico	

Considerando os parâmetros apresentados, atribuiu-se a classificação apresentada na Tabela 10, obtendo um fator n_{sx} de 1.9 e fator n_{sy} de 1.6. Substituindo na equação (3.1), conclui-se que o fator de segurança de projeto (n_{proj}) adquire o valor de 3.04 (aproximadamente 3).

Aplicando a equação (3.2), obtém-se uma tensão máxima admissível (σ_{adm}) de 303 MPa.

Tabela 10 - Classificação dos parâmetros de Pugsley.

Parâmetro	A	B	C	D	E
Classificação	vg	f	f	vs	vs






3.1.3.3. Definição dos parâmetros da Análise Linear Estática

Tendo um valor de tensão limite estabelecido, determina-se a intensidade da carga aplicada em cada caso através de um processo iterativo de sucessivas análises lineares estáticas, que recorrendo ao MEF, apresentam como resultado a distribuição de tensões de *Von-Mises* do componente. Quando a tensão de *Von-Mises* máxima corresponder à tensão limite de segurança, obtêm-se os valores dos carregamentos pretendidos.

No entanto, para garantir a qualidade dos resultados obtidos é essencial assegurar que estes não variam com o refinamento da malha do componente, realizando-se uma análise de convergência para o efeito. Posto isto, recorre-se novamente ao *software* de CAE *Solidworks 2020*, onde são realizadas sucessivas análises lineares estáticas cujos valores de intensidade das forças são mantidos constantes à medida que se aumenta o número de elementos da malha, variando os seus parâmetros.

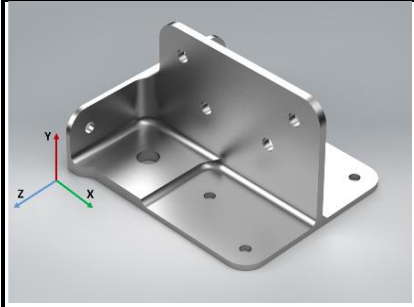
O tipo de malha selecionado para o processo corresponde ao *curvature-based mesh* que, recorrendo a elementos do tipo tetraédrico descritos por uma série de parâmetros de controlo apresentados na Tabela 11, reduz automaticamente o tamanho dos mesmos em zonas de curvatura mais acentuada.

Tabela 11 - Parâmetros de controlo da malha;

Parâmetros de Controlo	
	Tamanho máximo dos elementos h_{max} [mm]
	Tamanho mínimo dos elementos h_{min} [mm]
	Rácio de crescimento dos elementos
	Número mínimo de elementos por círculo [un]
	Número total de elementos [un]

Os valores das cargas de cada caso, representados pela Tabela 12, são assumidos, uma vez que apenas nos interessa interpretar a influência da alteração dos parâmetros da malha nos resultados.

Tabela 12 - Carregamento para análise de convergência.

Referencial	Solicitação	x	y	z
	Vertical (F_y) [N]	0	2000	0
	Horizontal (F_x) [N]	2000	0	0
	Inclinada ($F_y + F_x$) [N]	2000	2000	0

As condições de fronteira da análise linear estática são de dois tipos: fixações e zonas de contacto.

As fixações representadas pelas setas azuis da Figura 16 a), são definidas pelos furos referentes aos seis rebites e aos dois parafusos, seleccionando a secção interior de cada um deles como fixa relativamente às três direções do referencial.

As zonas de contacto representadas na Figura 16 b), correspondem às secções exteriores das superfícies que contêm as fixações onde se encontrariam as placas da fuselagem ao qual o componente é fixo, a vermelho a secção vertical e a verde a secção horizontal. Estas definem-se através de um contacto do tipo *Virtual Wall* que simula a existência das placas de fuselagem como paredes virtuais infinitamente rígidas, não sofrendo qualquer tipo de deformação.

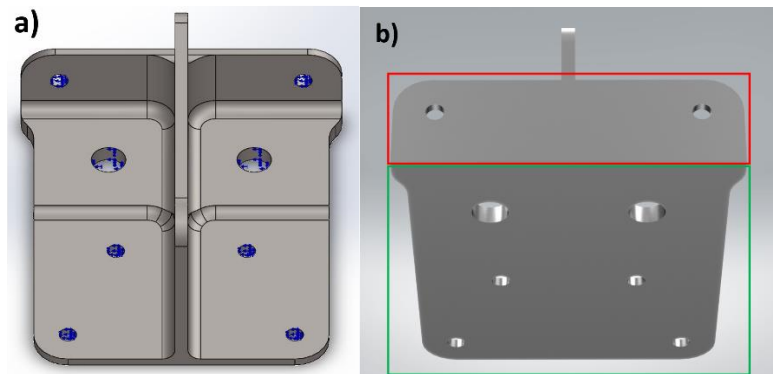


Figura 16 – Condições de fronteira: a) Fixações; b) Zonas de contacto.

De acordo com os resultados da análise de convergência inicial representados pelo gráfico da Figura 17, nenhum dos casos de carregamento aplicados parece convergir, aumentando a tensão máxima no componente à medida que aumenta o número de elementos da malha.

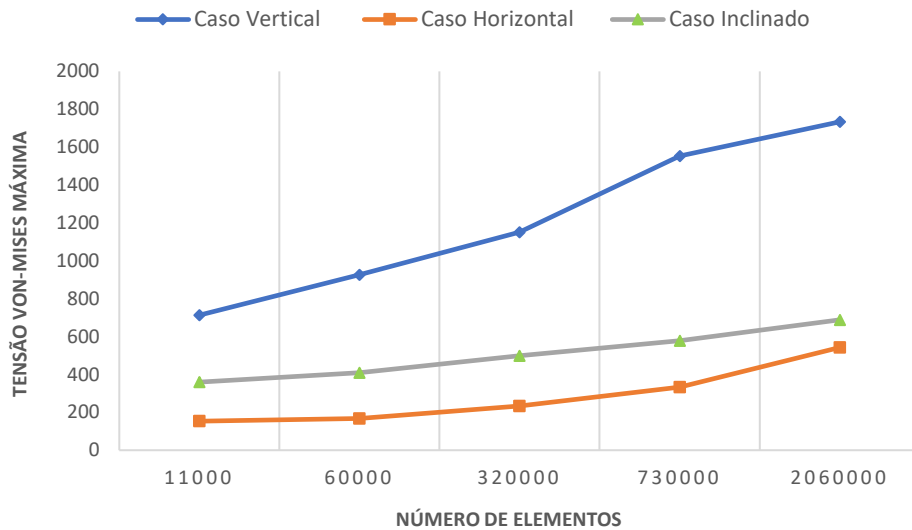


Figura 17 – Resultados da análise de convergência da malha com singularidades.

Este fenómeno deve-se ao facto de os valores de tensão máxima do componente serem dados pelas zonas de concentração de tensões em torno dos furos, que constituem uma singularidade, aumentando infinitamente o valor da tensão com o refinamento da malha. A Figura 18 ilustra uma das singularidades verificada na análise para o caso de carregamento horizontal.

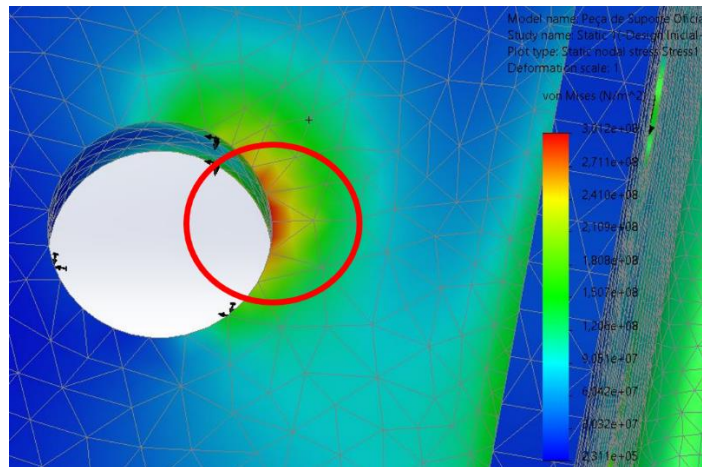


Figura 18 - Singularidade do caso de carga horizontal (indicada com um círculo vermelho).

Posto isto, ignoraram-se os valores das tensões provenientes das singularidades, obtendo os resultados de tensão máxima representados pelo gráfico da Figura 19.

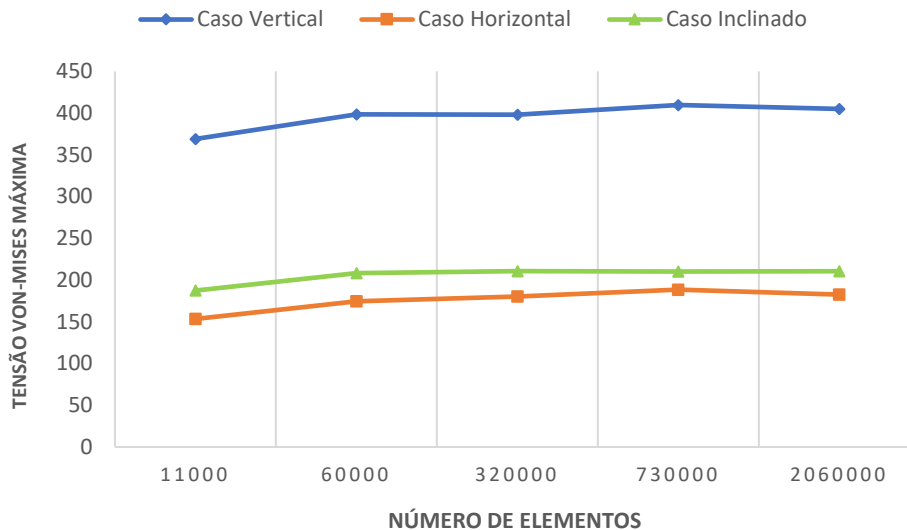


Figura 19 - Resultados da análise de convergência da malha sem singularidades.

Pela análise do gráfico da Figura 19, é possível constatar que já se verifica uma convergência em todos os casos de carregamento e atentando ao compromisso entre convergência e exigência computacional⁴, selecionou-se a malha com as especificações apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Especificações dos parâmetros da malha final.

Parâmetros de Controlo		
	Tamanho máximo dos elementos h_{max} [mm]	2
	Tamanho mínimo dos elementos h_{min} [mm]	1
	Rácio de crescimento dos elementos	1.4
	Número mínimo de elementos por círculo [un]	18
	Número total de elementos [un]	61185

3.1.3.4. Processo iterativo de obtenção de cargas

Com as CF e parâmetros da malha definitivamente estabelecidos, realizou-se um processo iterativo final para a obtenção do valor das cargas. Para tal, correram-se sucessivas análises lineares estáticas onde os parâmetros da malha correspondem aos obtidos na análise de convergência, dados pela Tabela 13, e as condições de fronteira são idênticas às da secção anterior, variando apenas a intensidade das cargas de cada caso até o valor de tensão máximo⁵

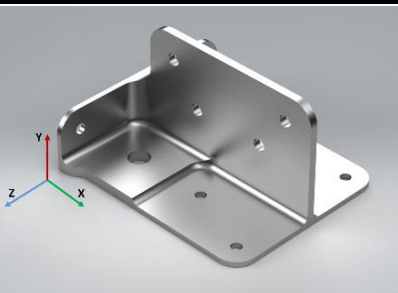
⁴ Quanto maior o refinamento da malha, maior o número de elementos, requerendo uma maior capacidade de computação.

⁵ Ignorando as singularidades novamente.

induzido pelas mesmas ser aproximadamente o mesmo do valor da tensão máxima admissível, definido na secção 3.1.3.2.

Assumindo como aceitável um desvio da tensão de *Von-Mises* máxima em relação à tensão máxima admissível inferior a 2%, obtiveram-se as condições de carregamento finais representadas pela Tabela 14. Os dados referentes a esta análise encontram-se descritos no Anexo C.

Tabela 14 - Condições de carregamento finais.

Referencial	Solicitação	x	y	z
	Vertical (F_y) [N]	0	1500	0
	Horizontal (F_x) [N]	3600	0	0
	Inclinada (F_y + F_x) [N]	2900	2900	0

As deformações causadas por cada caso de carregamento definido, ilustradas na Figura 20, Figura 21 e Figura 22, são apresentadas segundo uma escala exagerada, visto que a deformação à escala real seria demasiado reduzida para efeitos de visualização. Para além disso, é também indicada através de um círculo vermelho a zona de tensão máxima de cada caso, excluindo as singularidades.

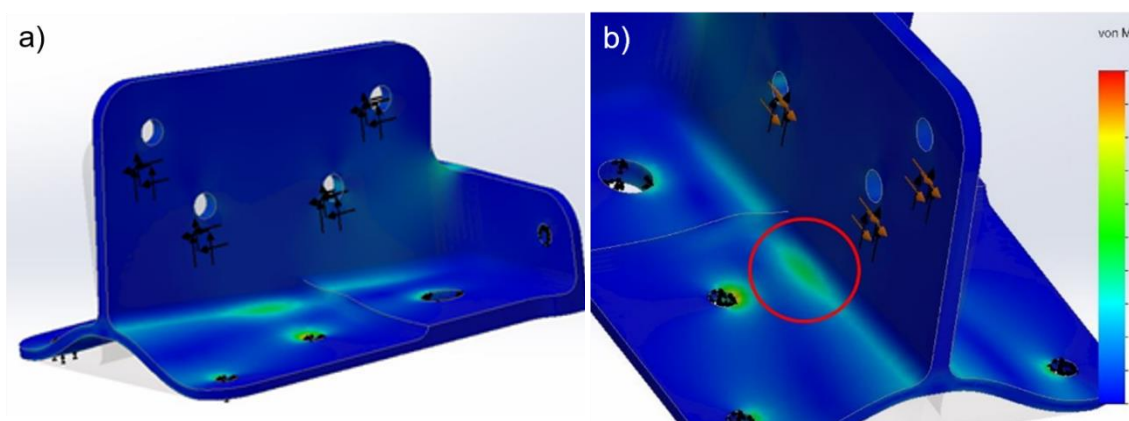


Figura 20 - Deformação e zona de tensão máxima do caso vertical: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.

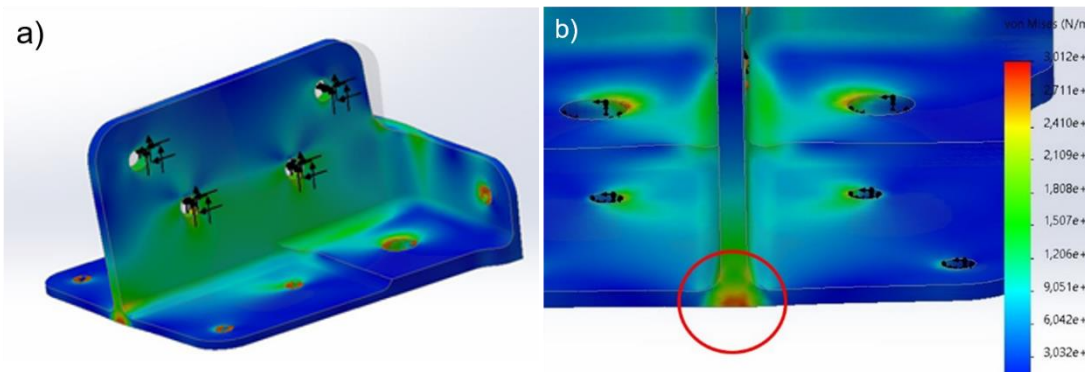


Figura 21 - Deformação e zona de tensão máxima do caso horizontal: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.

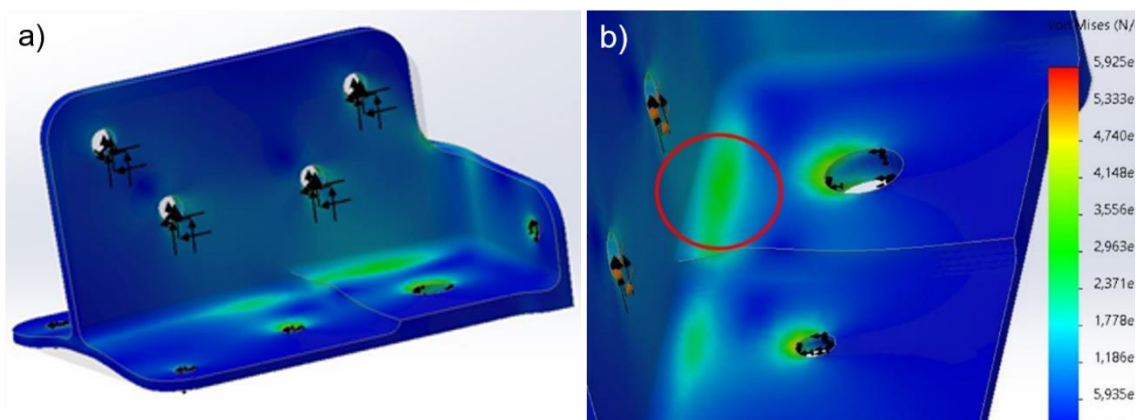


Figura 22 - Deformação e zona de tensão máxima do caso inclinado: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.

Os deslocamentos máximos induzidos pelas condições de carregamento definidas são obtidos através da distribuição de deslocamento ao longo do componente, que se obtém como resultado da análise linear estática há semelhança da distribuição de tensões e encontram-se representados pela Tabela 15.

Tabela 15 - Deslocamento máximo na configuração original.

Solicitação	$d_{m\acute{a}x_{original}}$ [mm]
Vertical	0.178
Horizontal	0.097
Inclinada	0.087

3.2. Otimização topológica

Numa ótica de fabrico aditivo e de modo a obter uma nova proposta de configuração geométrica do componente, mais leve e igualmente resistente, realizou-se um estudo de otimização topológica recorrendo novamente ao *Software CAE Solidworks 2020* para efetuar os procedimentos computacionais necessários ao processo.

Posto isto, realizaram-se diversas simulações do tipo *Topology Study*, que são caracterizadas pelas seguintes especificações:

- Domínio de projeto;
- Propriedades do material;
- Características da malha;
- Condições de carregamento;
- Condições de fronteira;
- Parâmetros de controlo.

Tendo em conta, que a simulação topológica recorre a especificações em tudo semelhantes às da análise linear estática, parte destas já se encontram definidas pela secção 3.1:

- ✓ As propriedades do material são as apresentadas na Tabela 6;
- ✓ As características da malha correspondem às apresentadas na Tabela 13;
- ✓ O carregamento aplicado encontra-se definido na Tabela 14;
- ✓ As condições de fronteira, que correspondem às fixações e zonas de contacto, encontram-se estabelecidas na secção 3.1.3.3.

Restando apenas definir o domínio de projeto, a condição de fronteira correspondente ao eixo de simetria e os parâmetros de controlo.

3.2.1. Domínio de projeto

O domínio de projeto em questão corresponde ao volume ocupado pelo próprio componente, com exceção das zonas preservadas (ou *non-design regions*) onde não é removido material ao componente, encontrando-se representadas a vermelho pela Figura 23.

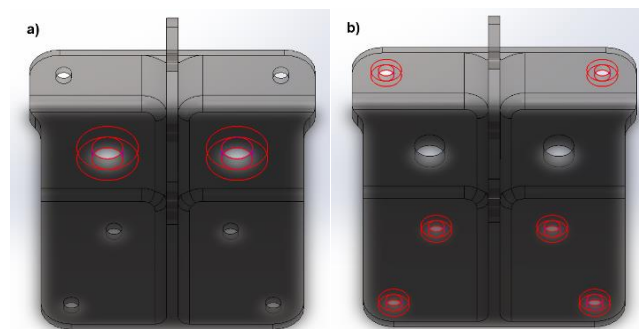


Figura 23 - Zonas preservadas: a) parafusos; b) rebites.

Pela análise da figura anterior, é de simples entendimento que as zonas preservadas correspondem às regiões em torno dos furos onde são aplicados os diferentes dispositivos de fixação, sujeitos a aperto. Para além disso, são também consideradas por predefinição do programa, as regiões em torno dos furos correspondentes aos pontos de aplicação do carregamento.

Para o presente caso de estudo, definiu-se um raio de segurança (ou *clearance radius*) para as regiões dos furos de fixação e carregamento correspondente ao dobro do raio dos mesmos, sendo de 4.2 mm para os furos de rebite, 8.2 mm para os furos de parafuso e 4.8 mm para as regiões em torno dos furos de aplicação de carregamento.

3.2.2. Condições de fronteira

Definiu-se como condição de fronteira, para além das fixações e zonas de contacto já referidas, o eixo de simetria longitudinal representado a azul na Figura 24, que é característica base da topologia do componente original que se pretende manter na nova configuração.

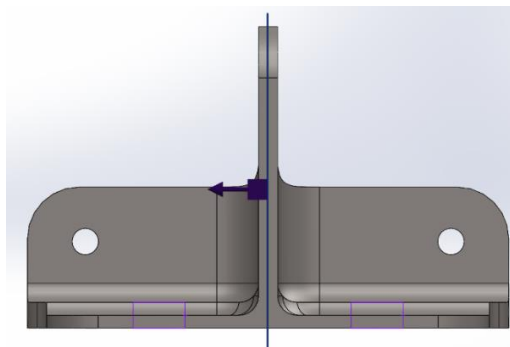


Figura 24 - Eixo de simetria.

3.2.3. Parâmetros de controlo

Os parâmetros de controlo deste tipo de estudo são caracterizados pela definição de objetivos e restrições.

Os objetivos dividem-se em duas principais possibilidades: minimização da massa ou minimização da complacência/maximização da rigidez, sendo sujeitos a três hipóteses de restrições:

- Restrição de deslocamento – definindo um valor ou fator máximo;
- Restrição de massa – definindo uma percentagem de redução de massa máxima relativamente à original;
- Restrição de tensão – definindo um valor de tensão máxima admissível ou fator de segurança máximo.

Para o presente caso de estudo, em contexto teórico a abordagem mais adequada seria definir como objetivo a minimização da massa e estabelecer uma restrição de segurança de tensão definida através do fator de segurança obtido pelo método de *Pugsley* em 3.1.3.2, garantindo uma remoção máxima de material sem induzir tensões de valor superior ao da tensão máxima admissível. Inicialmente para efeitos de simulação foram os parâmetros selecionados, no entanto, ao analisar os resultados obtidos foi possível verificar que a quantidade de material removida era bastante reduzida em relação ao esperado, como se pode verificar pela análise da Figura 25.

Este fenómeno foi causado pelos valores elevados de tensão provenientes das singularidades em torno dos furos, descritas em 3.1.3.3, que são tidos em conta na restrição de tensão definida para os parâmetros selecionados.

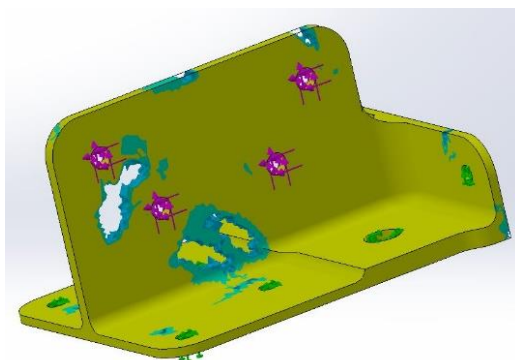


Figura 25 - Representação geométrica obtida no resultado com restrição de tensão.

De forma a evitar este problema, procedeu-se a uma abordagem diferente através de um processo iterativo de estudos topológicos de minimização de complacência, sujeitos a diferentes restrições de percentagem de redução de massa.

Em cada estudo realizado foi obtida uma nova hipótese de configuração, remodelando o componente original com base na representação geométrica obtida nos resultados, apresentada no exemplo da Figura 26.

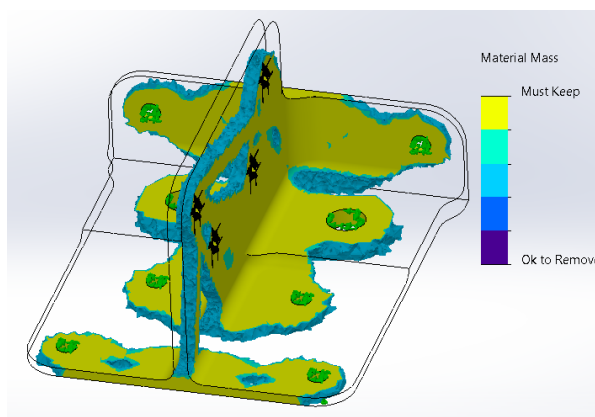


Figura 26 - Representação geométrica obtida com redução de massa de 50%.

Cada nova configuração obtida foi submetida a uma análise linear estática para verificação da distribuição de tensões ao longo do material. O processo iterativo terminou quando a tensão máxima admissível foi ultrapassada e assumiu um desvio percentual superior aos 5%.

Os dados da análise efetuada assim como as diferentes configurações obtidas, podem ser consultados no Anexo C.

3.3. Projeto generativo

Mantendo a ótica de fabrico aditivo e a liberdade geométrica que o caracteriza, aplicou-se o método de projeto generativo para a obtenção de uma nova proposta de configuração geométrica com massa inferior sem comprometer a resistência ao carregamento solicitado.

Para tal, recorreu-se ao software *Fusion 360* da *Autodesk*⁶ para o processo, que tem como hipótese de simulação a realização de um estudo de *Generative Design*.

Antes de mais, foi necessário importar o ficheiro da modelação 3D do componente com configuração original de *Solidworks* para *Fusion 360*, convertendo o mesmo para o formato universal *.STEP* para possibilitar o processo.

Em seguida, procedeu-se à definição de todas as especificações necessárias à realização do estudo pretendido, descritas pelos seguintes pontos:

- Domínio de projeto;
- Propriedades dos materiais;
- Condições de carregamento;
- Condições de fronteira;
- Parâmetros de controlo.

Para a aplicação deste método, as características da malha não são incluídas nas especificações necessárias definir pois o próprio software ajusta os parâmetros da malha através de um processo iterativo, tomando em conta as especificações geométricas do componente e as capacidades computacionais do computador em questão.

3.3.1. Domínio de projeto

Num estudo de projeto generativo, o domínio de projeto é definido apenas por dois parâmetros: geometria preservada e geometria obstáculo.

⁶ Empresa de venda de diferentes tipos de *software* responsável pelo aparecimento e desenvolvimento do Projeto Generativo ou *Generative Design*. Atualmente este método já se encontra disponível em *softwares* de mais empresas.

Geometria preservada

A geometria preservada, representada pela Figura 27, refere-se às zonas onde se pretende garantir a existência ou a não-remoção de material, que para o presente caso de estudo e há semelhança da otimização topológica, refere-se às zonas em torno dos furos onde vão ser realizados os apertos das respetivas fixações e onde existem pontos de aplicação do carregamento.

Definiu-se novamente um raio de segurança correspondente ao dobro do raio dos furos, com 4.2 mm para os rebites. 8.2 mm para os parafusos e 4.8 mm para os furos do carregamento.

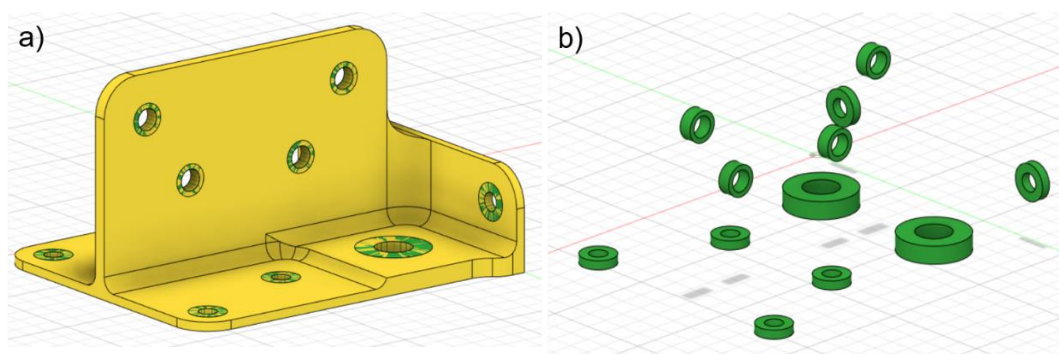


Figura 27 - Geometria preservada: a) Zonas preservadas inseridas no componente b) Zonas preservadas.

Geometria obstáculo

A geometria obstáculo refere-se às zonas onde se pretende que não exista material, servindo como o nome indica de obstáculo à expansão do mesmo, usualmente definidas pelas zonas de interface com o componente. Para o presente caso, definiram-se zonas obstáculo de diferentes tipos:

- Em primeiro lugar, definiram-se as regiões correspondentes às zonas de contacto com as placas de fuselagem onde o componente é fixo, que se encontram representadas pela Figura 28. Estas são descritas por dois paralelepípedos, um horizontal e outro vertical, com comprimentos e larguras que contêm toda a superfície de contacto. Para a espessura assumiu-se um valor arbitrário para efeitos de visualização, pois não tem influência nos resultados;
- Em seguida, definiram-se as zonas relativas às secções interiores e exteriores dos furos de rebite e parafuso, para garantir que não existe material em nenhuma zona de interface com as fixações e dispositivos de aperto que impossibilite a sua aplicação. Representadas pelos pins e cilindros da Figura 29. Os pins ocupam a secção interior total dos furos desde a base da peça até a uma distância de 10 mm, que corresponde à altura dos cilindros exteriores;

- Por último, definiram-se as zonas relativas às secções interiores dos furos onde são aplicados os diferentes tipos de carregamento, assumindo a possibilidade de o carregamento ser efetuado através de pinos. Representadas pelos pins da Figura 30 que se encontram a uma distância de 30 mm de cada lado da aba da peça.

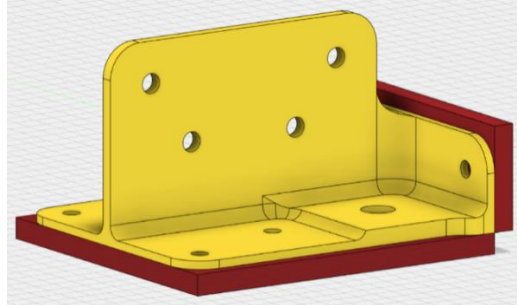


Figura 28 - Geometria obstáculo - Placas de fuselagem (cor vermelha).

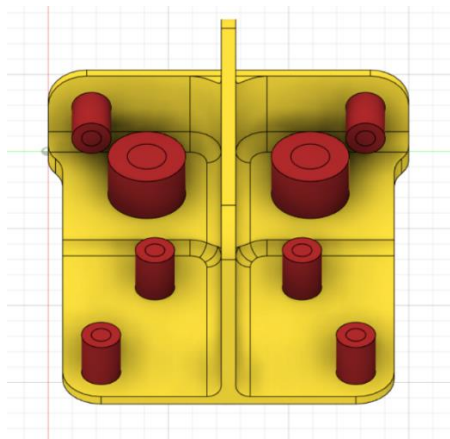


Figura 29 - Geometria obstáculo - Interior e exterior de fixações (cor vermelha).

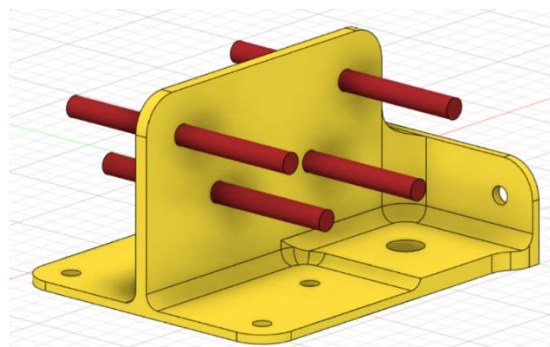


Figura 30 - Geometria obstáculo - Pins para carregamento (cor vermelha).

Para efeitos de simulação, o componente original apresentado a amarelo nas figuras anteriores, serve apenas como referência para a definição das geometrias preservadas e obstáculo. No final, o domínio de projeto considerado para a realização do estudo, é apresentado pela Figura 31.

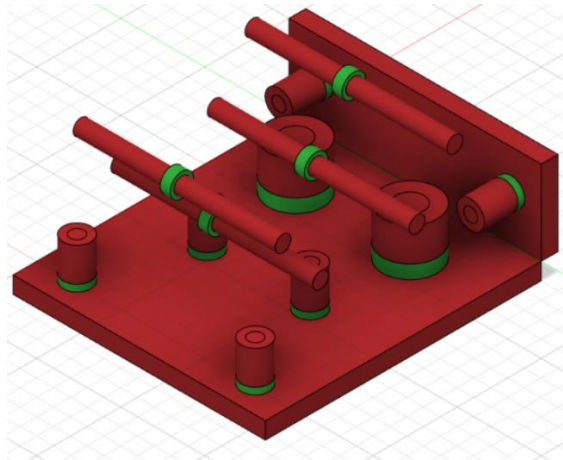


Figura 31 - Domínio de projeto PG (Regiões preservadas a verde e obstáculo a vermelho).

Este facto, confere a este tipo de estudo um universo de possibilidades de configuração maior, não estando restringido pela configuração geométrica original.

3.3.2. Propriedades dos materiais

Num estudo de projeto generativo existe a possibilidade de introduzir como condição inicial diferentes tipos de material, que é algo bastante vantajoso no caso de se pretender estudar a melhor solução de projeto para uma determinada função onde não exista restrição de material.

No presente caso de estudo, pretendendo-se obter uma nova configuração geométrica considerando apenas o material original do componente, definiram-se novamente as propriedades da liga de Titânio Ti-6Al-4V (Grade 5) apresentadas na Tabela 6 da secção 3.1.1.

3.3.3. Condições de carregamento e fronteira

Para efeitos de comparação e aplicabilidade dos resultados, é de fácil entendimento que as condições de carregamento e fronteira de ambos os métodos de projeto são idênticos, apenas alterando a forma como são definidos.

O carregamento caracterizado pelas propriedades estabelecidas na Tabela 14, no caso da simulação de OT foi definido diretamente no componente, ao passo que neste caso, tendo em conta que a configuração original do componente não integra o domínio de projeto, este é definido na geometria preservada, ilustrado com setas azuis na Figura 32.

O mesmo se verifica nas condições de fronteira referentes às fixações associadas a cada furo de rebite e parafuso, sendo diretamente definidas na geometria preservada, ilustrado com símbolos de cadeado na Figura 32.

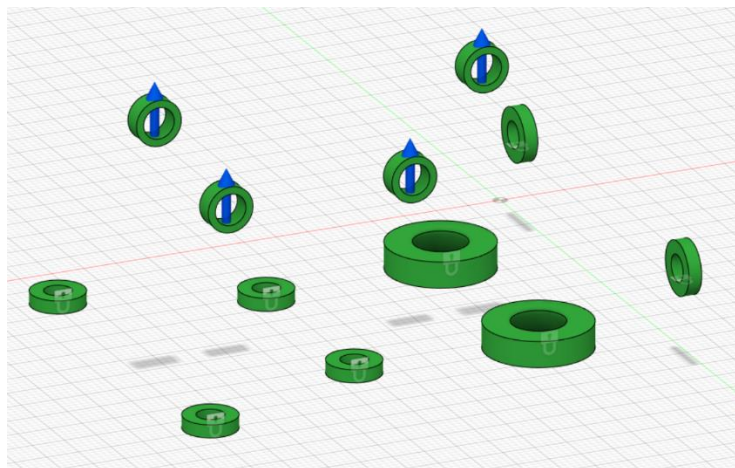


Figura 32 - Carregamento e fixações na geometria preservada: setas azuis e cadeados brancos respetivamente.

As condições de fronteira relativas às zonas de contacto, que no caso do estudo de OT se definem com uma ferramenta do programa específica, aqui são impostas pela definição da geometria obstáculo anterior.

3.3.4. Parâmetros de controlo

Para finalizar a caracterização do estudo de projeto generativo pretendido, restou definir dois critérios de projeto⁷ necessários: Objetivos e Manufatura.

Objetivos

Em semelhança aos parâmetros de controlo estabelecidos no estudo de otimização topológica, este critério é caracterizado pela aplicação de dois parâmetros: objetivos e restrições da análise. Os primeiros são caracterizados pela definição de uma de duas possibilidades, minimização da massa ou maximização da rigidez. No entanto, estes estão sujeitos a uma única hipótese de restrição relativa à tensão, definida através do fator de segurança mínimo segundo o critério de *Von-Mises*.

Para este caso de estudo, pretendendo obter uma nova configuração mais leve e igualmente resistente, definiu-se como objetivo a minimização de massa sujeita a uma restrição de tensão

⁷ Descrição utilizada no software para parâmetros de controlo.

estabelecida com um fator de segurança igual a 3, obtido pela aplicação do método de *Pugsley* apresentado anteriormente na secção 3.1.3.2.

Manufatura

Este segundo critério, permite definir especificações de manufatura relativas a diferentes tipos de tecnologia, incluindo fabrico aditivo, fresagem CNC, fundição, entre outros. O utilizador tem a possibilidade de incluir uma ou várias tecnologias de fabrico da lista disponível no *software*. No caso de se selecionarem uma ou mais tecnologias, o *software* permite sempre seleccionar a hipótese “sem restrições”, catalogando os diferentes resultados de novas configurações sujeitos e não-sujeitos a restrições de fabrico.

Para o presente caso de estudo, considerando a ótica de fabrico aditivo, seleccionaram-se as hipóteses “sem restrições” e fabrico aditivo, definindo para a segunda as propriedades apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades de fabrico aditivo para PG.

Propriedade	Especificação
Orientação	X+, Y+ e Z+
Ângulo de Projeção ⁸	45 graus
Espessura mínima	0.4 mm

A orientação refere-se à orientação da impressão da máquina, tendo sido seleccionadas três hipóteses de acordo com a origem do referencial representado na Figura 33. O ângulo de projeção e espessura mínima foram definidos de acordo com os valores mínimos habitualmente aplicados para garantir uma boa impressão, de acordo com a informação contida na Tabela 3.

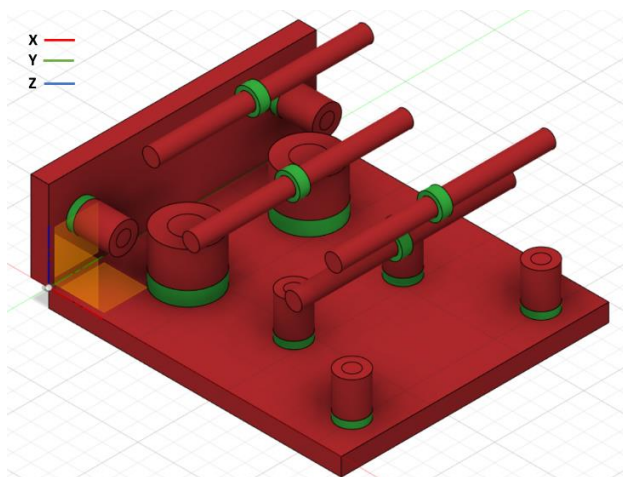


Figura 33 - Referencial para fabrico aditivo do Projeto Generativo.

⁸ Ou “Overhang Angle”

3.4. Resultados e Discussão

Nesta secção, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos na aplicação de cada um dos métodos de projeto seguindo todas as considerações anteriores, em primeiro lugar é apresentada a proposta resultado da otimização topológica, e em seguida a proposta resultado do projeto generativo. No final é efetuada uma comparação entre os dois.

3.4.1. Otimização topológica

A proposta de configuração final obtida através deste método, apresentada pela Figura 34, obteve-se através da aplicação da restrição de percentagem de redução de massa máxima de 50%, e é resultado da remodelação do componente original baseada na representação apresentada na Figura 26. As especificações geométricas correspondentes podem ser consultadas no Anexo A.

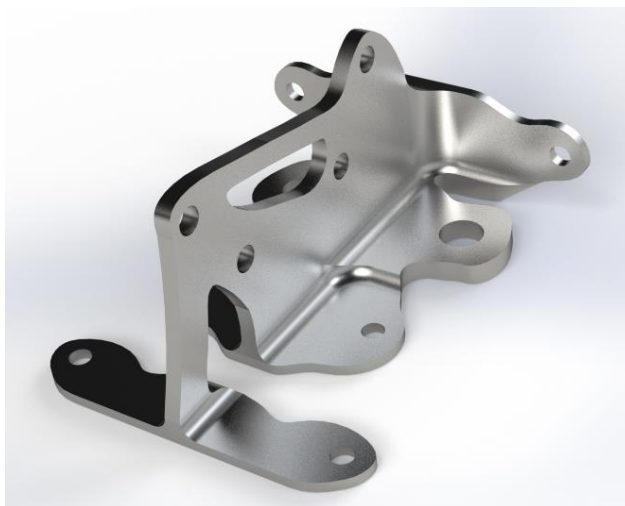


Figura 34 – Proposta de configuração geométrica OT.

A comparação das características da configuração geométrica obtida em relação à original, é representada pela informação contida na Tabela 17 incluindo os valores de tensão de *Von-Mises* máximos de cada caso de carga, vertical (σ_{max_1}), horizontal (σ_{max_2}) e inclinado (σ_{max_3}).

Tabela 17- Comparação de configurações para OT.

Parâmetros	Configuração Original	Configuração da OT	Desvio [%]
Massa [g]	127,7	74,13	- 41,94
Volume [cm ³]	28,89	16,77	- 41,94
σ_{max_1} [MPa]	306,20	310,70	1,47
σ_{max_2} [MPa]	307,40	313,40	1,95
σ_{max_3} [MPa]	306,30	308,80	0,82

Pela análise da Tabela 17, é possível concluir que através da aplicação do método de otimização topológica anterior obteve-se uma proposta de configuração geométrica que permitiu reduzir cerca de 42% da massa e volume sem comprometer a resistência às três solicitações de carga, assumindo como aceitável um desvio menor ou igual a 2 %. O valor de redução de massa obtido corresponde a aproximadamente 54 g.

As deformações provenientes de cada solicitação de carregamento são apresentadas nas Figura 35, Figura 36 e Figura 37, sendo indicada com um círculo vermelho a zona de tensão máxima para cada caso, ignorando novamente as singularidades em torno dos furos. Aplicou-se há semelhança da secção 3.1.3.4, uma escala de exagero para efeitos de visualização.

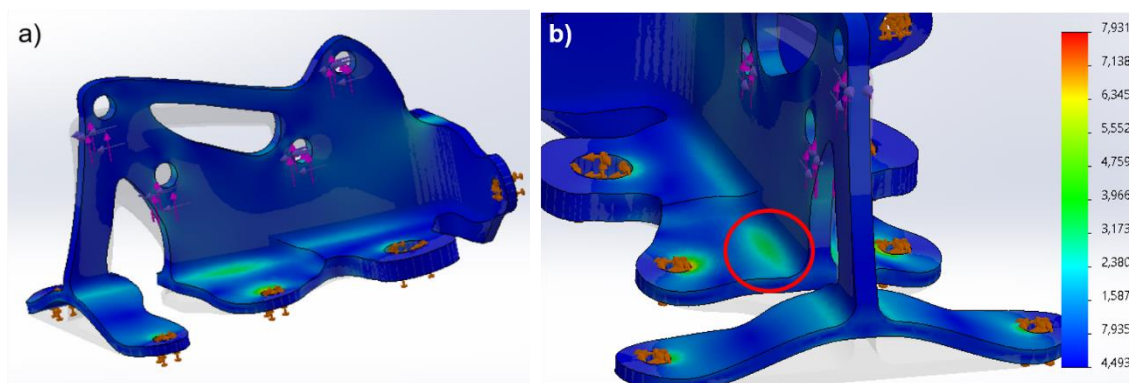


Figura 35 – Deformação e zona de tensão máxima do caso vertical da OT: a) Deformação; b) Tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.

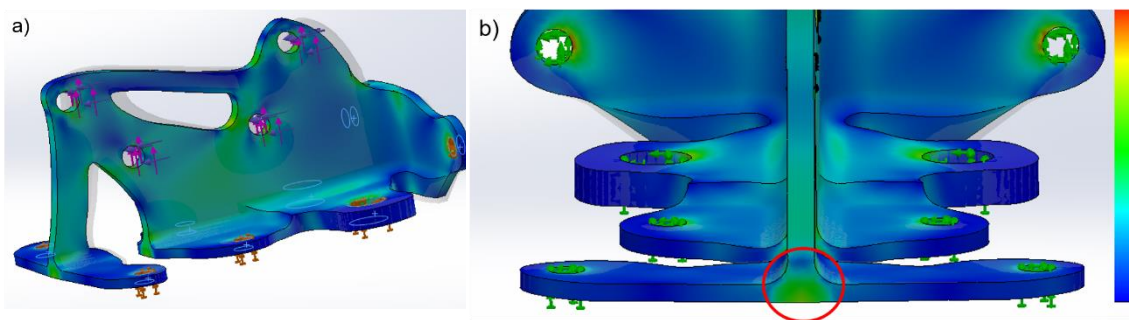


Figura 36 - Deformação e zona de tensão máxima do caso horizontal da OT: a) Deformação; b) Tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.

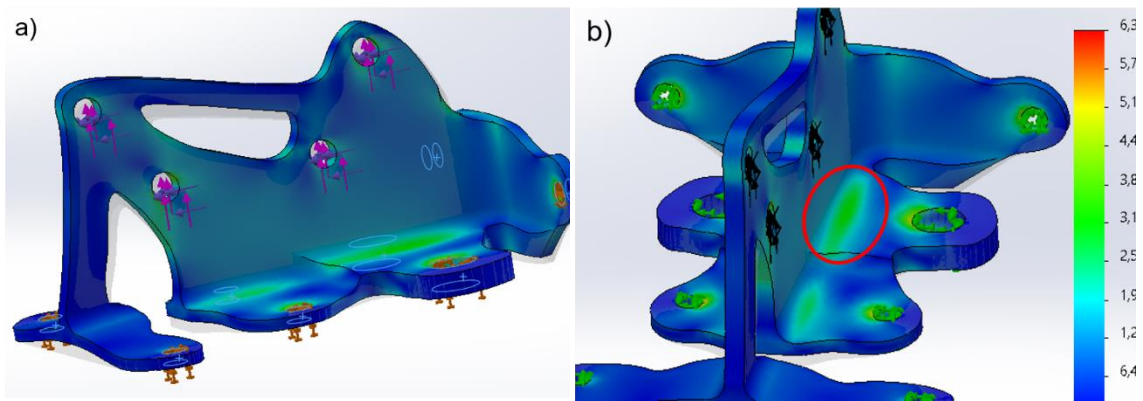


Figura 37 - Deformação e zona de tensão máxima do caso inclinado da OT: a) Deformação; b) Tensão máxima indicada pelo círculo vermelho.

Para efeitos de comparação, a Tabela 17 apresenta os valores de deslocamento máximo obtidos para cada caso de carregamento relativos à configuração original e proposta de OT.

Tabela 18 – Comparação entre deslocamentos máximos – original vs OT.

Solicitação	$d_{máx_{original}}$ [mm]	$d_{máx_{OT}}$ [mm]	Desvio [%]
Vertical	0.178	0.223	25.4
Horizontal	0.097	0.159	64.24
Inclinada	0.087	0.116	33.14

Pela análise da tabela anterior, verifica-se que os deslocamentos máximos relativos a todos os casos de carga aumentaram para a proposta da OT, especialmente para o caso horizontal com um aumento na ordem dos 64 %.

3.4.2. Projeto generativo

Os resultados obtidos podem ser apresentados em diferentes formatos, numa lista com os diferentes modelos de configuração geométrica e respetivas propriedades, ou catalogados num gráfico com eixos editáveis de acordo com os diferentes parâmetros, como massa, tensão, fator de segurança ou deslocamentos. Esta flexibilidade torna a análise de resultados mais prática e permite uma comparação entre configurações mais eficiente.

Para a simulação efetuada, considerando as restrições de domínio de projeto, material e fator de segurança impostas, obtiveram-se cinco possibilidades de configurações geométricas (ou *outcomes*) como resultado, com as propriedades descritas pela Tabela 19, onde d se refere ao deslocamento, n ao fator de segurança e σ à tensão.

Para efeitos de comparação, o gráfico de resultados apresentado na Figura 38 adaptado do *Fusion 360* apresenta os diferentes *outcomes* segundo duas propriedades: massa e tensão de

Von-Mises máxima, representadas pelos eixos vertical e horizontal, respectivamente. Para além disso, acrescentou-se uma linha horizontal vermelha que representa a massa da configuração original do componente como referência.

O aspeto visual e geométrico de cada modelo obtido pode ser consultado no conjunto de figuras apresentado no Anexo D.

Tabela 19 - Comparação de Outcomes do Projeto Generativo.

Configurações	Propriedades				
	Massa [g]	Volume [cm ³]	$d_{m\acute{a}x}$ [mm]	$\sigma_{VM_{m\acute{a}x}}$ [MPa]	$n_{m\acute{i}n}$
Original	127,7	28,89	-	-	3
Outcome1	47.71	10,79	0,16	301,6	3,02
Outcome2	108.87	24,75	0,10	302,7	3,01
Outcome3	140.32	31,73	0,09	303	3
Outcome4	107.63	24,45	0,10	303,2	3
Outcome5	191.03	43,22	0,13	303,2	3

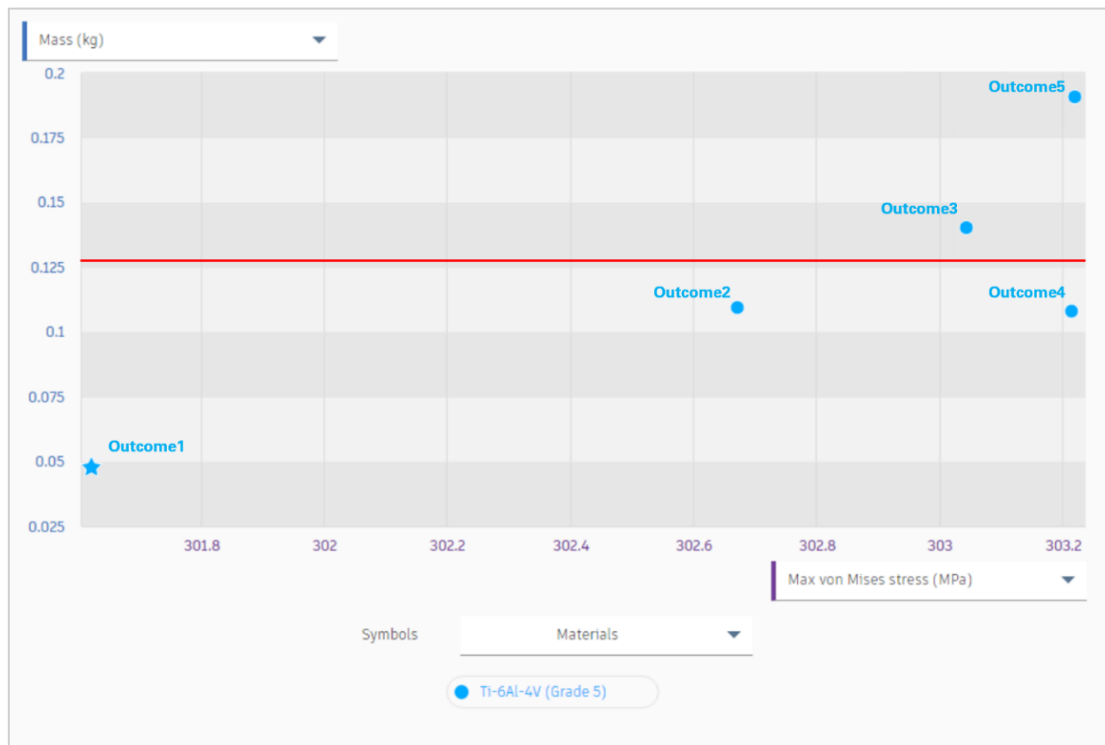


Figura 38 - Gráfico de comparação de Outcomes do PG.

Pela análise do gráfico da Figura 38 e Tabela 19, facilmente se conclui que relativamente à massa existem três configurações que cumprem o objetivo pretendido, encontrando-se abaixo

da linha vermelha no gráfico da Figura 38 (*Outcome1*, *Outcome2* e *Outcome4*), sendo que o *Outcome1* é claramente o candidato favorito com tensão máxima e massa inferiores. No entanto, atentando à coluna de deslocamentos máximos da tabela, o *Outcome 1* é a proposta de configuração com maior valor associado, mas visto que ainda assim o valor é reduzido, despreza-se a influência deste parâmetro na seleção. Posto isto e de uma perspectiva estética e visual, consultando o Anexo D, também o *Outcome1* seria o modelo intuitivamente selecionado como o mais apropriado.

Assim sendo, o modelo selecionado como a proposta final de acordo com o método de projeto generativo é o *Outcome1*, sublinhado a verde na Tabela 19 e apresentado pela Figura 39. Pela análise da Figura 39, verifica-se que a configuração geométrica obtida é de caráter mais orgânico relativamente à proposta de otimização topológica.

As especificações geométricas podem ser consultadas no Anexo A.



Figura 39 - Proposta de configuração geométrica PG.

Depois de selecionada a configuração, efetuou-se uma verificação através de uma análise linear estática para garantir o cumprimento das restrições impostas em relação ao fator de segurança.

Para tal, recorreu-se novamente ao software *Autodesk Fusion 360* e realizou-se uma simulação do tipo *Static Stress*, sujeitando a nova configuração às mesmas solicitações de carregamento e fixações.

As propriedades da proposta de projeto generativo, incluindo os valores de tensão máximos obtidos na análise linear estática de verificação, são apresentadas pela Tabela 20 em conjunto com as da configuração original para efeitos de comparação.

Tabela 20 – Configuração Original vs Configuração PG.

Parâmetros	Configuração Original	Configuração PG	Desvio [%]
Massa [g]	127,7	47,71	- 62,64
Volume [cm ³]	28,89	10,79	- 62,64
σ_{max_1} [MPa]	306,20	158,50	- 48,24
σ_{max_2} [MPa]	307,40	301,30	- 1,98
σ_{max_3} [MPa]	306,30	302,60	- 1,21

Pela análise da Tabela 20, é possível concluir que a aplicação deste método de projeto não só permitiu obter uma redução de massa e volume relativamente à configuração original na ordem dos 63 %, como melhorou a resistência às condições de carregamento solicitadas. Especialmente no caso de carga vertical, onde a tensão de *Von-Mises* máxima reduziu para quase metade. O valor de redução de massa obtido, corresponde a aproximadamente 80 g.

As deformações resultantes de cada solicitação de carregamento assim como as regiões de tensão máxima, são apresentadas nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42. A escala de deformação foi ajustada para efeitos de visualização.

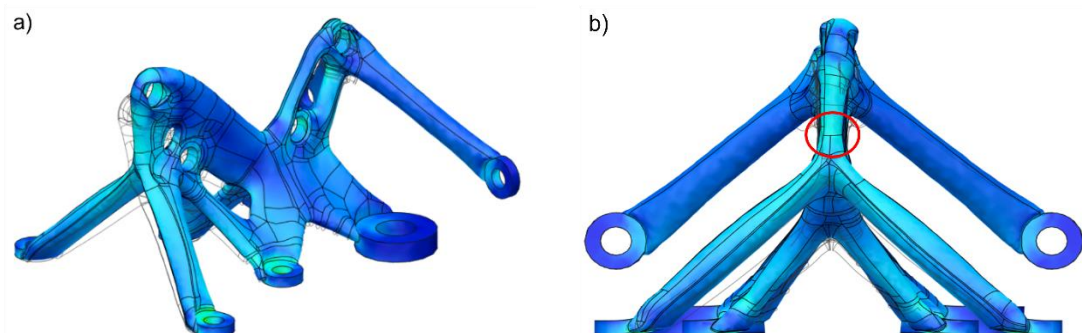


Figura 40 – Deformação e zona de tensão máxima do caso vertical do PG: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima representada por um círculo vermelho.

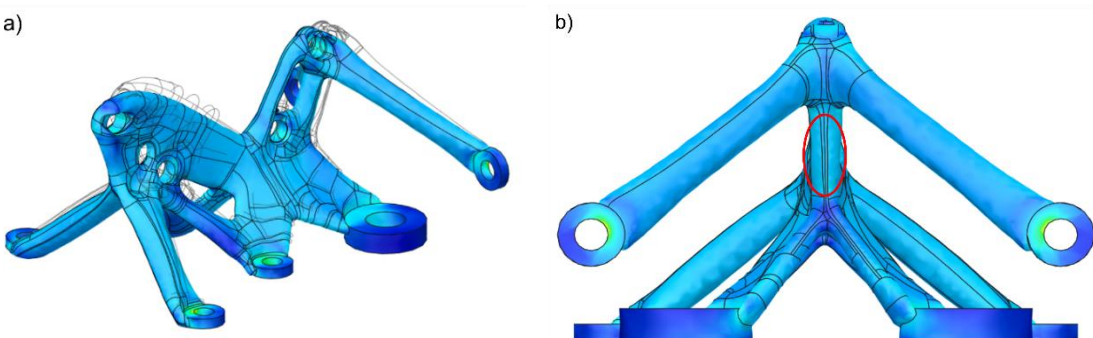


Figura 41 - Deformação e zona de tensão máxima do caso horizontal do PG: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima representada por um círculo vermelho.

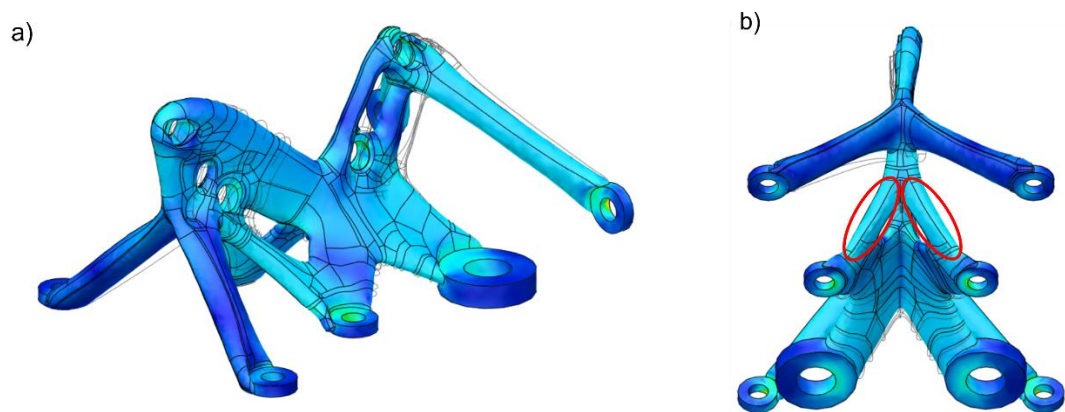


Figura 42 - Deformação e zona de tensão máxima do caso inclinado do PG: a) Deformação; b) Zona de tensão máxima representada por um círculo vermelho.

Para efeitos de comparação, os valores de deslocamento máximo para cada caso de carga relativos à configuração original e proposta de PG são apresentados pela Tabela 21.

Tabela 21 – Comparação entre deslocamentos máximos - original vs PG.

Solicitação	$d_{m\acute{a}x_{original}}$ [mm]	$d_{m\acute{a}x_{PG}}$ [mm]	Desvio [%]
Vertical	0.178	0.064	- 63.91
Horizontal	0.097	0.170	75.38
Inclinada	0.087	0.094	7.63

Pela análise da Tabela 21, verifica-se que o deslocamento máximo aumenta consideravelmente no caso horizontal, mantém-se aproximadamente constante no caso inclinado e reduz-se consideravelmente no caso vertical, na ordem dos 64 %. Comparando este resultado com o resultado obtido para as tensões de cada proposta, apresentado na Tabela 20, conclui-se que em relação ao caso de carga vertical esta proposta não só permitiu reduzir a tensão máxima como também reduziu o deslocamento máximo.

3.4.3. Comparação de resultados

Os resultados obtidos em ambos os métodos de projeto para fabrico aditivo são apresentados na informação contida na Tabela 22, incluindo os deslocamentos máximos associados a cada uma das duas propostas. Acrescentou-se uma coluna com o desvio percentual entre os valores obtidos para cada proposta de configuração para efeitos de comparação, há semelhança do que foi feito anteriormente relativamente à configuração original.

Tabela 22 - Comparação entre propostas de configuração.

Parâmetros	Proposta OT	Proposta PG	Desvio [%]
Massa [g]	74,13	47,71	- 35,64
Volume [cm^3]	16,77	10,79	- 35,64
$\sigma_{m\acute{a}x_1}$ [MPa]	310,70	158,50	- 48,99
$\sigma_{m\acute{a}x_2}$ [MPa]	313,40	301,30	- 3,86
$\sigma_{m\acute{a}x_3}$ [MPa]	308,80	302,60	- 2,01
$d_{m\acute{a}x_1}$ [mm]	0,223	0,064	- 71,22
$d_{m\acute{a}x_2}$ [mm]	0,159	0,170	6,78
$d_{m\acute{a}x_3}$ [mm]	0,116	0,094	- 19,16

Pela análise da Tabela 22 e tendo em conta os objetivos de redução de massa pretendidos, conclui-se que a proposta final a ser selecionada corresponde à obtida pelo método de projeto generativo, sendo caracterizada por uma massa inferior em cerca de 36 % relativamente à da otimização topológica.

Numa ótica de resistência ao carregamento solicitado, também a proposta do PG obteve melhores resultados. Pois apesar de serem equiparáveis para os casos de carga horizontal e inclinado, no caso vertical o valor de tensão de *Von-Mises* máximo reduz-se para praticamente metade.

Em relação à distribuição de deslocamentos, a proposta do PG tem deslocamento máximo consideravelmente inferior em relação aos casos de carga vertical e inclinado, enquanto no horizontal consideram-se equiparáveis.

Ou seja, enquanto na otimização topológica se reduziu a massa cumprindo os requisitos de segurança, no projeto generativo não só se reduziu a massa em maior percentagem como se aumentou a resistência ao carregamento solicitado. Para além disso, os deslocamentos máximos associados à proposta do PG apresentam valores inferiores em relação à otimização topológica.

Para além disso, é importante referir que esta comparação não pretende provar que o método de projeto generativo é transversalmente superior ao método de otimização topológica, mas apenas que para este caso específico de estudo os resultados obtidos o foram.

4. Análise de custos e emissões

Neste capítulo são apresentados dois estudos de impacto económico e uma análise adicional às emissões diretas associadas ao consumo de combustível.

Em primeiro lugar, avaliam-se os custos de fabrico por unidade produzida associados a cada uma das configurações geométricas, configuração inicial obtida através de maquinaria CNC e configuração final obtida através de fabrico aditivo.

Em seguida, avalia-se o potencial de redução de custos operacionais e emissões diretas de carbono associados à queima de combustível, obtido através da redução de massa do componente sugerida pelo caso de estudo anterior.

A configuração final selecionada para o efeito corresponde à proposta obtida através do método de projeto generativo, pois como referido anteriormente em 3.4, é caracterizada por uma redução de massa superior em relação à proposta da otimização topológica, cumprindo os objetivos pretendidos de forma mais eficaz.

4.1. Custos de fabrico

Nesta secção são avaliados os custos de fabrico por unidade produzida associados à maquinaria CNC do componente com configuração geométrica inicial e ao fabrico aditivo com configuração geométrica final, assumindo uma linha de produção não dedicada em ambos os casos.

De modo a possibilitar a realização do estudo pretendido desenvolveu-se um modelo PBCM que divide o processo de fabrico correspondente em diferentes atividades, utilizando como referência os modelos de custo desenvolvidos em 3 dissertações de mestrado [34, 35, 36].

Cada atividade é caracterizada por dois tipos de custo: custos variáveis e custos fixos.

O custo total de fabrico obtém-se somando os custos variáveis e custos fixos das n atividades, como ilustrado pela equação (4.1).

$$C_{total\ fabrico} = (C_{v_1} + C_{f_1}) + \dots + (C_{v_n} + C_{f_n}) \quad (4.1)$$

4.1.1. Modelo de custo - Maquinagem CNC

Para o caso do fabrico da configuração inicial por maquinaria CNC, considera-se a divisão do processo em apenas duas atividades: *setup* (ou configuração da máquina) e maquinaria do componente, ambas necessitando a presença de um operador para desempenhar as tarefas necessárias embora com taxas de ocupação diferentes.

O *setup* ou configuração da máquina é descrito pela introdução do componente na máquina, colocação e aperto dos respetivos dispositivos de fixação, controlos dimensionais e colocação das ferramentas apropriadas às tarefas pretendidas.

A maquinagem do componente é descrita pelas tarefas desempenhadas pela própria máquina, que incluem a fresagem, furação e respetivas trocas de ferramenta, e pelas tarefas desempenhadas pelo operador, que incluem as alterações necessárias associadas aos dispositivos de fixação, orientação do componente e controlo dimensional.

Os custos variáveis correspondem aos custos associados ao material, energia e mão-de-obra necessários à produção.

Os custos fixos correspondem aos custos associados à máquina, ferramenta, edifício e manutenção.

4.1.1.1.Custos por atividade

Setup

O *setup* é definido pelos dois tipos de custo, custos fixos e custos variáveis.

Os custos variáveis estão associados à mão-de-obra do operador que são facilmente calculados através da equação 4.2, recorrendo às variáveis representadas na Tabela 23.

Tabela 23 - Variáveis relativas aos custos variáveis do *setup*.

Variável	Descrição	Unidades
t_{setup}	Duração da atividade de <i>setup</i>	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	[€/h]

$$C_{m\tilde{a}o\ de\ obra_{set}} = C_{operador} \times t_{setup} \quad (4.2)$$

A taxa de ocupação do operador não é incluída na tabela e equação anteriores pois é de 100 %, o que corresponde a multiplicar pela unidade.

Os custos fixos referem-se apenas aos custos de aquisição da máquina, pois apesar desta não se encontrar em funcionamento e a tarefa ser inteiramente desempenhada pelo operador, está impedida de ser utilizada durante esse período de tempo. Os custos de edifício associados à área ocupada pela máquina são desprezados para esta atividade devido ao reduzido valor.

As variáveis necessárias ao cálculo dos custos da máquina são apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 - Variáveis relativas aos custos fixos do setup.

Variável	Descrição	Unidades
t_{setup}	Duração da atividade de <i>setup</i>	[h]
$Pr_{máquina}$	Preço da máquina	[€]
$n_{máquina}$	Vida da máquina	[anos]
r	Custo de oportunidade do capital	[%]
$t_{p\text{anual}}$	<i>Uptime</i> de produção anual	[h/ano]

Antes de mais, obtém-se o investimento da máquina para a atividade pretendida através da aplicação da equação (4.3) que multiplica o preço de aquisição pela respetiva percentagem de utilização e em seguida, recorrendo à definição de anuidade dada pela equação (4.4), calcula-se o custo da máquina por unidade.

$$Inv_{máquina_{setup}} = Pr_{máquina} \times \frac{t_{setup}}{t_{p\text{anual}}} \quad (4.3)$$

$$Inv_{máquina_{setup}} = C_{máquina_{setup}} \times \left[\frac{(1+r)^{n_{máquina}} - 1}{r(1+r)^{n_{máquina}}} \right] \quad (4.4)$$

Maquinagem

A maquinagem do componente é definida pelos dois tipos de custo, fixos e variáveis.

Os custos variáveis, correspondem à mão-de-obra do operador da máquina CNC, à energia consumida pelo funcionamento da máquina e aos custos de material associados ao bloco em bruto necessário. Na Tabela 25 encontram-se as variáveis necessárias para o cálculo desses mesmos custos.

Tabela 25 - Variáveis relativas aos custos variáveis da maquinagem do componente.

Variável	Descrição	Unidades
$t_{maquinagem}$	Duração da atividade de maquinagem	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	[€/h]
$Tx_{ocupação}$	Taxa de ocupação do operador da máquina	[%]
$P_{máquina}$	Potência da máquina	[kW]
$Pr_{eletricidade}$	Preço da eletricidade	[€/kWh]
$Pr_{material}$	Preço do material	[€/kg]
m_{bloco}	Massa do bloco de material necessário por peça	[kg]

O cálculo dos custos de mão-de-obra é similar ao definido anteriormente para a atividade de *setup*, sendo definido pela equação (4.5).

$$C_{m\tilde{a}o\ de\ obra_{maq}} = t_{maquinagem} \times C_{operador} \times Tx_{ocupação} \quad (4.5)$$

Os custos de energia são obtidos tendo em consideração o preço da eletricidade, a potência da máquina utilizada e a duração da maquinaria, como ilustrado pela equação (4.6). Este cálculo é uma simplificação, pois assume que a máquina trabalha constantemente na sua potência máxima o que não corresponde à realidade.

$$C_{energia_{maq}} = t_{maquinagem} \times P_{m\tilde{a}quina} \times Pr_{eletricidade} \quad (4.6)$$

Os custos associados ao material, ilustrados pela equação (4.7), calculam-se multiplicando a massa do bloco bruto de maquinaria necessária pelo preço do material do mesmo.

$$C_{material_{maq}} = m_{bloco} \times Pr_{material} \quad (4.7)$$

Os custos fixos dividem-se em: custos da máquina e edifício, ambos associados à sua aquisição, custos da ferramenta definidos pelos custos em ferramentas de corte provenientes do desgaste das mesmas e custos de manutenção associados à máquina e ferramentas de corte.

As variáveis necessárias aos cálculos pretendidos, encontram-se representadas pela informação contida na Tabela 26.

Tabela 26 - Variáveis relativas aos custos fixos da maquinaria do componente.

Variável	Descrição	Unidades
$t_{maquinagem}$	Duração da atividade de maquinaria	[h]
$C_{hferramenta}$	Custo por hora da ferramenta	[€/h]
$Pr_{m\tilde{a}quina}$	Preço da máquina	[€]
$n_{m\tilde{a}quina}$	Vida da máquina	[anos]
r	Custo de oportunidade do capital	[%]
$n_{edificio}$	Vida do edifício	[anos]
$A_{eocupada}$	Área do edifício ocupada	[m ²]
C_{earea}	Custo do edifício por área	[€/m ²]
t_{panual}	Uptime de produção anual	[h/ano]
$\%manutenção$	Percentagem do custo para manutenção	[%]

Os custos da máquina são calculados da mesma forma que para o *setup*. Define-se o investimento da máquina alocado à atividade através da aplicação da equação (4.8) e em seguida, obtém-se o custo da máquina por unidade, aplicando a equação (4.9).

$$Inv_{máquina_{maq}} = Pr_{máquina} \times \frac{t_{maquinagem}}{t_{p_{anual}}} \quad (4.8)$$

$$Inv_{máquina_{maq}} = C_{máquina_{maq}} \times \left[\frac{(1+r)^{n_{máquina}} - 1}{r(1+r)^{n_{máquina}}} \right] \quad (4.9)$$

O cálculo dos custos do edifício, definido pelas equações seguintes, é realizado de forma similar ao cálculo anterior, à exceção do preço que é necessário ser calculado antes de acordo com a área ocupada, representado pela equação (4.10).

$$Pr_{edifício_{maq}} = A_{ocupada} \times C_{e_{area}} \quad (4.10)$$

$$Inv_{edifício_{maq}} = Pr_{edifício} \times \frac{t_{maquinagem}}{t_{p_{anual}}} \quad (4.11)$$

$$Inv_{edifício_{maq}} = C_{edifício_{maq}} \times \left[\frac{(1+r)^{n_{edifício}} - 1}{r(1+r)^{n_{edifício}}} \right] \quad (4.12)$$

Os custos das ferramentas definem-se de forma bastante direta, multiplicando o custo à hora da ferramenta pelo tempo de utilização como representado pela equação (4.13).

$$C_{ferramenta_{maq}} = C_{h_{ferramenta}} \times t_{maquinagem} \quad (4.13)$$

Por fim, os custos de manutenção são calculados de forma aproximada, definindo uma percentagem de custo que é multiplicada pelos custos da máquina e ferramenta, ilustrado pela equação (4.14).

$$C_{manutenção_{maq}} = \%_{manutenção} \times (C_{máquina_{maq}} + C_{ferramenta_{maq}}) \quad (4.14)$$

4.1.1.2. Cálculo de variáveis

Antes de mais, de modo a calcular as variáveis pretendidas é necessário estipular o tempo de duração da maquinagem de um componente assim como a massa do bloco bruto de material necessário à operação.

Tendo isso em conta, recorreu-se à ferramenta CAM do software *Autodesk Fusion 360* onde se efetuou uma simulação do processo de fabrico que permitiu: em primeiro lugar, definir as dimensões do bloco de material necessário utilizando o modelo 3D da configuração como referência, ilustrado pela Figura 43, e em segundo lugar, obter o tempo de maquinagem como resultado da simulação dos diferentes processos de maquinagem necessários para obter a configuração desejada, com o bloco bruto de material como ponto de partida.

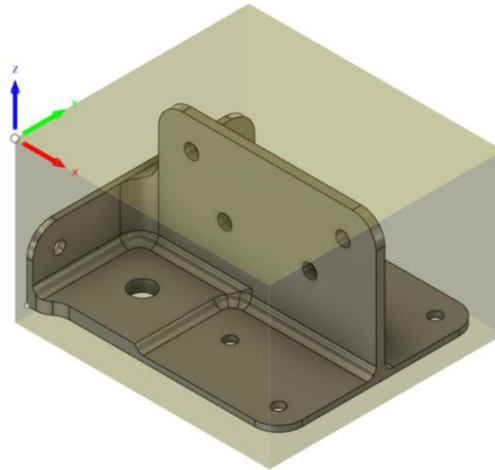


Figura 43 - Bloco bruto de material com configuração inicial como referência – Fusion 360.

Todas as ferramentas e respectivos parâmetros definidos na simulação foram selecionados a partir da biblioteca do programa disponível para maquinagem de liga de titânio.

A sequência de processos com respectivas durações encontra-se descrita pela tabela do Anexo E.

Os resultados diretos da simulação associados às dimensões do bloco de material e tempo de maquinagem são apresentados pela Tabela 27.

Tabela 27 – Resultados da simulação de maquinagem CNC.

Parâmetro	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Altura [mm]	$t_{ferramenta}$ [min]	$t_{dferramenta}$ [min]	$t_{aferramenta}$ [min]
Valor	86	79	54	187.2	1.33	5

Os tempos apresentados na Tabela 27, correspondem à duração do funcionamento da ferramenta ($t_{ferramenta}$), duração da deslocação da ferramenta ($t_{dferramenta}$) e duração da alteração de ferramenta ($t_{aferramenta}$). O tempo de maquinagem total calcula-se através da soma dos três tempos anteriores como ilustrado pela equação (4.15).

$$t_{maquinagem} = t_{ferramenta} + t_{dferramenta} + t_{aferramenta} \quad (4.15)$$

Substituindo valores obtém-se um tempo de maquinagem de 3.22 horas.

Com as dimensões do bloco apresentadas na Tabela 27 e considerando a densidade da liga, ρ , apresentada na Tabela 6, calcula-se a respetiva massa através da aplicação das equações (4.16) e (4.17).

$$Vol_{bloco} = Comprimento \times Largura \times Altura \quad (4.16)$$

$$m_{bloco} = Vol_{bloco} \times \rho \quad (4.17)$$

Obtendo uma massa do bloco, m_{bloco} , de 1.622 kg.

Com a massa do bloco bruto e tempo de maquinagem definidos, seleciona-se a máquina de fresagem CNC para a realização do processo com base em [34] e caracterizada pelos parâmetros apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Parâmetros da máquina CNC (com base em [34]).

Parâmetro	Máquina CNC	Potência [kW]	Preço [€]
Valor	Mikron UCP 600 Vario ITNC 530	30	270 000

Em seguida, apresentam-se as variáveis determinadas para cada atividade do processo que são utilizadas no cálculo dos custos totais de fabrico.

Setup

As variáveis determinadas relativas aos custos variáveis do *setup* são apresentadas na Tabela 29.

A duração do *setup* é obtida a partir de [34], o custo hora do operador é estimado, assumindo um salário base de 1200 €, mais impostos e benefícios.

Tabela 29 – Variáveis determinadas para os custos variáveis do *setup*.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
t_{Setup}	Duração da atividade de <i>Setup</i>	0.33	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	16	[€/h]

As variáveis determinadas relativas aos custos fixos do *setup* são apresentadas na Tabela 30.

O tempo de *setup* já se encontra definido, o *uptime* anual é calculado assumindo 12 horas de *uptime* diário e 260 dias úteis por ano. O preço e vida da máquina são definidos com base em [34] e o custo de oportunidade do capital é assumido.

Tabela 30 - Variáveis determinadas para os custos fixos do setup.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
t_{setup}	Duração da atividade de <i>setup</i>	0.33	[h]
$Pr_{máquina}$	Preço da máquina	270 000	[€]
$n_{máquina}$	Vida da máquina	10	[anos]
r	Custo de oportunidade do capital	10	[%]
$t_{p\text{anual}}$	<i>Uptime</i> de produção anual	3120	[h/ano]

Maquinagem

As variáveis determinadas relativas aos custos variáveis da maquinagem são apresentadas na Tabela 31.

O tempo de maquinagem e massa do bloco são calculados no início desta secção. O custo hora do operador já se encontra definido pela atividade anterior. A potência da máquina encontra-se apresentada na Tabela 28. O preço da eletricidade definiu-se segundo a tarifa simples portuguesa da EDP, em 2021, para uma potência contratada de 20.7 kVA [37], que apesar de ser inferior à potência da máquina, assume-se como suficiente para o efeito de cálculo de custos sendo o valor encontrado mais elevado. O preço do material é definido com base no preço europeu apresentado em [38] e a taxa de ocupação é assumida.

Tabela 31 – Variáveis determinadas para os custos variáveis da maquinagem.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
$t_{maquinagem}$	Duração da atividade de maquinagem	3.22	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	16	[€/h]
$Tx_{ocupação}$	Taxa de ocupação do operador da máquina	60	[%]
$P_{máquina}$	Potência da máquina	30	[kW]
$Pr_{eletricidade}$	Preço da eletricidade	0.0786	[€/kWh]
$Pr_{material}$	Preço do material	39	[€/kg]
m_{bloco}	Massa do bloco bruto de maquinagem	1.62	[kg]

As variáveis determinadas relativas aos custos fixos de maquinagem são apresentadas na Tabela 32.

O *uptime* anual, preço e vida da máquina e custo de oportunidade do capital já se encontram definidos. Os dados relativos ao edifício, ferramenta e manutenção são baseados nos valores apresentados nos modelos de custo de [34, 35].

Tabela 32 – Variáveis determinadas para os custos fixos da maquinagem.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
$t_{maquinagem}$	Duração da atividade de maquinagem	3.22	[h]
t_{panual}	Uptime de produção anual	3120	[h/ano]
$C_{hferramenta}$	Custo por hora da ferramenta	2.86	[€/h]
$Pr_{máquina}$	Preço da máquina	260 000	[€]
$n_{máquina}$	Vida da máquina	10	[anos]
$n_{edificio}$	Vida do edifício	30	[anos]
$A_{eocupada}$	Área do edifício ocupada	12	[m ²]
C_{earea}	Custo do edifício por área	800	[€/m ²]
r	Custo de oportunidade do capital	10	[%]
$\%_{manutenção}$	Percentagem do custo para manutenção	2	[%]

4.1.2. Modelo de custo - Fabrico aditivo

Antes de efetuar a divisão do processo de fabrico aditivo do componente em diferentes atividades de modo a possibilitar o cálculo dos custos pretendidos, é de relevada importância referir que foram tidos em conta dois pressupostos essenciais:

- Considerando as propriedades do material do componente do caso de estudo e os dados disponíveis em [35], assumiu-se como processo de fabrico aditivo o método de SLM do *Powder Bed Fusion*, apresentados anteriormente em 2.1.2.1;
- Tendo em conta o processo de PBF selecionado, assumiu-se a necessidade de pós-processamento através da aplicação de um *Shot Peening* que consiste num processo a frio onde pequenas partículas esféricas são “bombardeadas” contra a superfície do componente, induzindo tensões de compressão residuais ao longo da mesma, o que resulta num aumento da resistência à fadiga e corrosão, prolongando o ciclo de vida do componente [39].

Atentando às considerações anteriores e baseado no modelo apresentado em [35], para o caso da produção da configuração final através de fabrico aditivo efetuou-se a divisão do processo numa sequência de quatro diferentes atividades, ilustrada pelo fluxograma da Figura 44.



Figura 44 - Sequência de atividades do fabrico aditivo.

A primeira atividade do processo, o *setup* da máquina, é descrita pela preparação da máquina com tudo o que é necessário à operação, garantindo o devido abastecimento de pó, gás e filtros limpos, controlo dimensional da plataforma e limpeza das lentes do laser.

Em seguida, a impressão que ao contrário das duas atividades anteriores não requer a presença de operador, sendo realizada pela máquina de forma 100% autónoma. Esta é composta por diferentes passos: em primeiro lugar a máquina aquece a plataforma, em seguida introduz o gás inerte (*Árgon*) na câmara e por último, dá início à impressão do lote fundindo o pó e depositando sucessivas camadas de material.

A limpeza e remoção é efetuada novamente pelo operador que depois de arrefecida a máquina, limpa o excesso de pó da mesma, retira o lote de componentes da plataforma, garante a qualidade geométrica da impressão e remove os suportes. O desperdício de filtros utilizados é recolhido por uma empresa especializada após determinado número de impressões.

O pós-processamento é descrito pelo processo de *Shot Peening* já referido.

Os custos variáveis dividem-se em quatro tipos de custo:

- Custos de material;
- Custos de mão-de-obra;
- Custos de energia;
- Custos de recolha de resíduos.

Os custos fixos são caracterizados pelos custos associados à máquina, edifício e manutenção.

Os tempos de duração de cada atividade definidos em seguida, incluindo os que são com base em [35], estão associados à impressão de um lote de peças e não apenas a uma unidade como para a maquinagem, pelo que foi necessário otimizar a distribuição de peças na plataforma de modo a obter o número máximo de componentes por lote.

Tendo isso em conta, os cálculos seguintes são efetuados de forma a obter os custos por lote ou por impressão, sendo que no final é necessário dividir os custos calculados pelo número de componentes do lote de modo a obter o custo por unidade. Isto é válido para todas as atividades à exceção do pós-processamento que é realizado peça a peça, obtendo diretamente o custo por unidade pretendido.

4.1.2.1. Custos por atividade

Setup

O *setup*, é caracterizado por custos fixos e variáveis.

Os custos variáveis estão associados à mão-de-obra do operador necessária, sendo facilmente obtidos aplicando a equação (4.18) que recorre às variáveis disponíveis na informação da Tabela 33.

Tabela 33 - Variáveis relativas aos custos variáveis do Setup.

Variável	Descrição	Unidades
t_{setup}	Duração da atividade de <i>setup</i>	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	[€/h]

$$C_{m\tilde{a}o\ de\ obra_{setup}} = t_{setup} \times C_{operador} \quad (4.18)$$

Os custos fixos referem-se ao custo da máquina que, há semelhança da maquinagem, está associado ao facto de esta estar impedida de funcionar durante o respetivo *setup*. Os custos do edifício desprezam-se novamente pois apresentam reduzido valor. O cálculo do custo da máquina é realizado pelas equações seguintes, recorrendo às variáveis da Tabela 34.

Tabela 34 - Variáveis relativas aos custos fixos do setup.

Variável	Descrição	Unidades
t_{setup}	Duração da atividade de <i>setup</i>	[h]
$Pr_{m\tilde{a}quina}$	Preço da máquina	[€]
$n_{m\tilde{a}quina}$	Vida da máquina	[anos]
r	Custo de oportunidade do capital	[%]
$t_{p\tilde{a}nual}$	<i>Uptime</i> de produção anual	[h/ano]

$$Inv_{m\tilde{a}quina_{set}} = Pr_{m\tilde{a}quina} \times \frac{t_{setup}}{t_{p\tilde{a}nual}} \quad (4.19)$$

$$Inv_{m\tilde{a}quina_{set}} = C_{m\tilde{a}quina_{imp}} \times \left[\frac{(1+r)^{n_{m\tilde{a}quina}} - 1}{r(1+r)^{n_{m\tilde{a}quina}}} \right] \quad (4.20)$$

Impressão

Os custos de impressão do componente caracterizam-se pelos dois tipos de custo, fixos e variáveis.

Tendo em conta que a máquina funciona autonomamente, os custos variáveis correspondem aos custos de energia associados ao funcionamento da máquina e aos custos de material associados ao gasto de pó, gás e filtros utilizados na impressão, não existindo custos associados à mão-de-obra.

A tabela seguinte, Tabela 35, apresenta as variáveis necessárias aos cálculos seguintes.

Tabela 35 - Variáveis relativas aos custos variáveis da impressão.

Variável	Descrição	Unidades
$t_{impressão}$	Duração da impressão de um lote	[h]
N_{lote}	Número de peças por lote	[un]
$P_{máquina}$	Potência da máquina	[kW]
$Pr_{eletricidade}$	Preço da eletricidade	[€/kWh]
$Pr_{material}$	Preço do material em pó	[€/kg]
$X_{perda\ material}$	Fator perda de material	[%]
$m_{componente}$	Massa de um componente	[kg]
$m_{suportes}$	Massa dos suportes	[kg]
$Pr_{gás}$	Preço de um cilindro de gás inerte	[€]
$N_{cilindro}$	Número de impressões que dura um cilindro	[un]
Pr_{filtro}	Preço de um filtro	[€]
t_{filtro}	Duração de um filtro	[h]

Os custos de energia são obtidos através da multiplicação do tempo de impressão do lote, potência da máquina e preço da eletricidade, representada pela equação (4.21)

$$C_{energia_{imp}} = t_{impressão} \times P_{máquina} \times Pr_{eletricidade} \quad (4.21)$$

Os custos de material dividem-se em três parcelas: custos do pó, custos do gás e custos dos filtros, representado pela equação (4.22)

$$C_{material_{imp}} = C_{pó} + C_{gás} + C_{filtros} \quad (4.22)$$

Os custos do pó referem-se ao custo da quantidade de material em pó necessário à impressão do lote, que inclui componentes e respetivos suportes. Para além disso, cada impressão é caracterizada por uma perda de pó que é queimado no processo, sendo representada por um fator de perda de material que é acrescentado ao cálculo.

Tendo isso em conta, o custo é calculado multiplicando o preço do material em pó pela massa requerida numa impressão, representado pela equação (4.23).

$$C_{pó} = Pr_{material} \times m_{lote} \quad (4.23)$$

Sendo que a massa de pó requerida é dada pela equação (4.24).

$$m_{lote} = (N_{lote} \cdot m_{componente} + m_{suportes}) \times (1 + X_{perda\ material}) \quad (4.24)$$

Os custos do gás referem-se ao custo associado ao gasto de gás inerte por impressão, fornecido através de um cilindro. Posto isto, o cálculo do respetivo custo é efetuado dividindo o preço de um cilindro de gás pelo número de impressões que o cilindro dura, representado pela equação (4.25).

$$C_{gás} = \frac{Pr_{gás}}{N_{cilindro}} \quad (4.25)$$

Os custos associados à utilização dos filtros obtêm-se aplicando a equação (4.26) que multiplica o preço de um filtro pelo rácio de utilização numa impressão, dado pelo tempo de duração de um filtro a dividir pelo tempo de uma impressão.

$$C_{filtros} = Pr_{filtro} \times \frac{t_{filtro}}{t_{impressão}} \quad (4.26)$$

Os custos fixos da atividade de impressão são dados pelos custos da máquina e edifício associados à sua aquisição e custos de manutenção associados à manutenção da máquina de impressão necessária.

As variáveis relativas a este tipo de custos, encontram-se descritas pela Tabela 36.

Tabela 36 - Variáveis relativas aos custos fixos da impressão.

Variável	Descrição	Unidades
$t_{impressão}$	Duração da atividade de impressão	[h]
$Pr_{máquina}$	Preço da máquina	[€]
$n_{máquina}$	Vida da máquina	[anos]
r	Custo de oportunidade do capital	[%]
$n_{edifício}$	Vida do edifício	[anos]
$A_{ocupada}$	Área do edifício ocupada	[m ²]
$A_{segurança}$	Área de segurança	[m ²]
C_{earea}	Custo do edifício por área	[€/m ²]
$t_{p anual}$	Uptime de produção anual	[h/ano]
%manutenção	Percentagem do custo para manutenção	[%]

O cálculo dos custos da máquina e do edifício é realizado de forma semelhante ao efetuado para a maquinagem CNC na secção anterior, sendo obtidos pela aplicação das seguintes equações:

$$Inv_{máquina_{imp}} = Pr_{máquina} \times \frac{t_{impressão}}{t_{p_{anual}}} \quad (4.27)$$

$$Inv_{máquina_{imp}} = C_{máquina_{imp}} \times \left[\frac{(1+r)^{n_{máquina}} - 1}{r(1+r)^{n_{máquina}}} \right] \quad (4.28)$$

Para o cálculo dos custos do edifício, para além da área ocupada pela máquina, é também considerada uma área de segurança em torno da mesma.

$$Pr_{edifício_{imp}} = (A_{e_{ocupada}} + A_{e_{segurança}}) \times C_{e_{area}} \quad (4.29)$$

$$Inv_{edifício_{imp}} = Pr_{edifício_{imp}} \times \frac{t_{impressão}}{t_{p_{anual}}} \quad (4.30)$$

$$Inv_{edifício_{imp}} = C_{edifício_{imp}} \times \left[\frac{(1+r)^{n_{máquina}} - 1}{r(1+r)^{n_{máquina}}} \right] \quad (4.31)$$

Os custos de manutenção, são novamente obtidos de forma aproximada, considerando uma percentagem dos custos da máquina, como representado pela equação (4.32).

$$C_{manutenção_{imp}} = \%_{manutenção} \times C_{máquina_{imp}} \quad (4.32)$$

Remoção e limpeza

A remoção e limpeza, pós-impressão, é apenas descrita por custos variáveis associados à mão-de-obra do operador necessária e à contratação do serviço de recolha dos desperdícios gerados.

A Tabela 37 apresenta as variáveis necessárias aos cálculos seguintes.

Tabela 37 - Variáveis relativas aos custos variáveis da remoção e limpeza.

Variável	Descrição	Unidades
$t_{impressão}$	Duração da atividade de impressão	[h]
$t_{limpeza}$	Duração média da limpeza de componentes	[h]
$t_{remoção}$	Duração média da remoção de suportes	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	[€/h]
$Pr_{recolha}$	Preço da recolha de produtos	[€]
t_{filtro}	Duração de um filtro	[h]
$N_{f_{recolha}}$	Número de filtros usados até à recolha	[un]

Os custos associados à mão-de-obra calculam-se multiplicando o custo hora do operador pelo tempo médio despendido nas tarefas de remoção de suportes e limpeza dos componentes, representado pela equação (4.33).

$$C_{m\tilde{a}o\ de\ obra_{rp}} = (t_{limpeza} + t_{remo\c{c}ao}) \times C_{operador} \quad (4.33)$$

Os custos associados à recolha são calculados multiplicando o rácio de utilização dos filtros numa impressão pelo custo da recolha por filtro como apresentado na equação (4.34).

$$C_{recolha_{rp}} = \left(\frac{t_{filtro}}{t_{impress\c{a}o}} \right) \times \left(\frac{Pr_{recolha}}{N_{f_{recolha}}} \right) \quad (4.34)$$

Pós-Processamento

Os custos de pós-processamento referem-se aos custos do processo de *Shot Peening*, considerando que o tratamento é efetuado internamente com máquina própria e não-subcontratado.

Posto isto, os custos considerados são: custos variáveis associados à mão-de-obra e custos fixos associados à máquina e manutenção da mesma. Os custos relacionados com o edifício e energia, tendo em conta que têm baixa influência no cálculo devido ao reduzido valor, são desprezados.

As variáveis necessárias ao cálculo dos custos variáveis e fixos seguintes são apresentadas na Tabela 38 e Tabela 39, respetivamente.

Tabela 38 - Variáveis relativas aos custos variáveis do Shot Peening.

Variável	Descrição	Unidades
t_{setup}	Duração da configuração da máquina	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	[h]

Tabela 39 - Variáveis relativas aos custos fixos do Shot Peening.

Variável	Descrição	Unidades
$t_{funcionamento}$	Duração do funcionamento da máquina	[h]
$Pr_{m\tilde{a}quina}$	Preço da máquina	[€]
$n_{m\tilde{a}quina}$	Vida da máquina	[anos]
r	Custo de oportunidade do capital	[%]
$t_{p_{anual}}$	<i>Uptime</i> de produção anual	[h/ano]
$Pr_{manuten\c{c}ao}$	Preço da manutenção	[€]

Os custos de mão-de-obra obtêm-se multiplicando o custo hora do operador pelo tempo da tarefa, neste caso o *Setup* da máquina, representado pela equação (4.35).

$$C_{m\tilde{a}o\ de\ obra_{sp}} = C_{operador} \times t_{setup} \quad (4.35)$$

Os custos associados à máquina, calculam-se de forma semelhante às atividades de impressão e *setup* anteriores, sendo obtidos através das equações (4.36) e (4.37).

$$Inv_{m\tilde{a}quina_{sp}} = Pr_{m\tilde{a}quina} \times \frac{(t_{funcionamento} + t_{setup})}{t_{p\tilde{a}nual}} \quad (4.36)$$

$$Inv_{m\tilde{a}quina_{sp}} = C_{m\tilde{a}quina_{sp}} \times \left[\frac{(1 + r)^{n_{m\tilde{a}quina}} - 1}{r (1 + r)^{n_{m\tilde{a}quina}}} \right] \quad (4.37)$$

Os custos de manutenção para o caso do *Shot Peening* não são definidos por uma percentagem dos custos da máquina, como definido anteriormente na impressão, mas sim por um preço de manutenção da máquina fixo que é necessário converter em custo de forma semelhante ao efetuado para os custos da máquina, representado pelas seguintes equações.

$$Inv_{manuten\c{c}ao_{sp}} = Pr_{manuten\c{c}\tilde{a}o} \times \frac{t_{funcionamento}}{t_{p\tilde{a}nual}} \quad (4.38)$$

$$Inv_{manuten\c{c}ao_{sp}} = C_{manuten\c{c}\tilde{a}o_{sp}} \times \left[\frac{(1 + r)^{n_{m\tilde{a}quina}} - 1}{r (1 + r)^{n_{m\tilde{a}quina}}} \right] \quad (4.39)$$

4.1.2.2. Cálculo de variáveis

De modo a possibilitar o cálculo do tempo e material necessários à impressão de um lote de configurações finais, realizou-se uma simulação de fabrico aditivo recorrendo ao software CAM da Autodesk denominado *Autodesk Netfabb Premium*. Os passos necessários à realização da simulação são descritos em baixo.

Em primeiro lugar é necessário selecionar a máquina de impressão tendo em conta a tecnologia de fabrico e propriedades do material. Assim sendo, com base na informação disponibilizada pela empresa Hypermetal⁹ em [35] e visto que inclui a lista de máquinas disponibilizadas pelo próprio *software*, selecionou-se a máquina de impressão descrita pela informação da Tabela 40.

Tabela 40 - Parâmetros da máquina de impressão.

Parâmetro	Máquina de impressão	Potência [kW]	Preço [€]
Valor	Renishaw AM 400	0.4	500 000

⁹ Empresa localizada em Vila Nova de Gaia, dedicada à produção de componentes metálicos através de fabrico aditivo.

Cada máquina de impressão disponibilizada no programa é descrita por diferentes conjuntos de parâmetros dependentes do tipo de configuração selecionada. Para o presente caso de estudo, selecionou-se a configuração de SLM para Titânio Ti-6Al-4V com feixe de laser de 60 μm de diâmetro.

Em seguida, é necessário definir o tipo e quantidade de suportes necessários, para tal importa-se o ficheiro de modelação 3D da configuração final para o programa e este gera os suportes de forma automática, considerando as características do componente e a configuração da máquina selecionada.

Os suportes gerados encontram-se representados a azul em diferentes perspetivas pelas Figura 45 e Figura 47, retiradas do *Netfabb*.



Figura 45 - Suportes gerados: Perspetiva_1 (Netfabb).

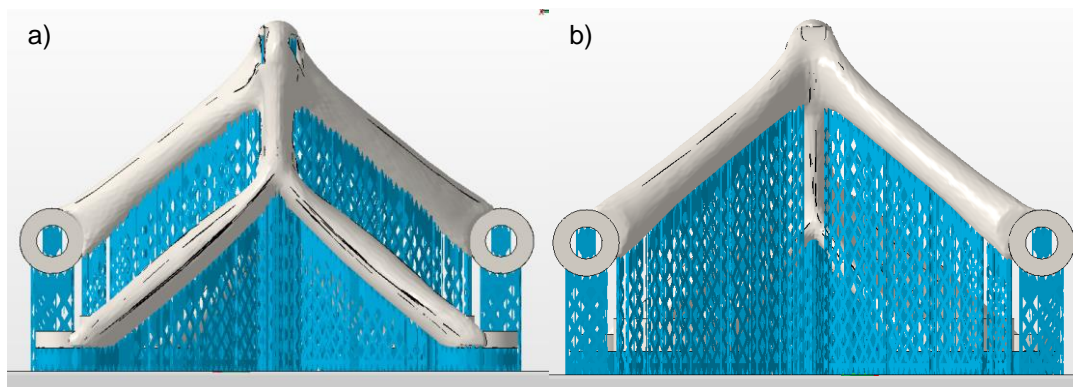


Figura 46 - Suportes gerados: a) Perspetiva_2; b) Perspetiva_3 (Netfabb).

Depois de definidos os suportes, é necessário otimizar a distribuição das peças na plataforma de maneira a maximizar o número de peças do lote. Posto isto e tendo em conta as dimensões máximas da peça e tamanho da plataforma, apresentados pela Tabela 41, definiu-se a

distribuição representada pela Figura 47, retirada do *Netfabb*, onde a cor azul representa a área projetada de cada componente.

Tabela 41 - Dimensões da plataforma e componente.

	Comprimento [mm]	Largura [mm]
Plataforma	248	248
Componente	79.03	65.2

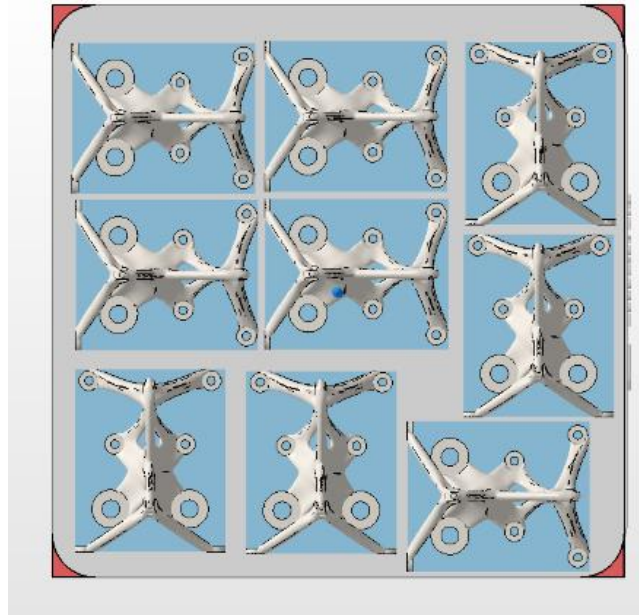


Figura 47 - Distribuição de componentes na plataforma (*Netfabb*).

Pela análise da figura anterior, é de fácil entendimento que o número máximo de peças por lote de impressão são 9 unidades.

Com os parâmetros anteriores definidos, efetuou-se a simulação de fabrico que apresenta como resultados diretos o tempo de impressão, volume de material dos componentes e volume de material dos suportes gerados, do lote, apresentados na tabela seguinte.

Tabela 42 - Resultados da simulação de fabrico - *Netfabb*.

Parâmetro	$t_{\text{impressão}}$ [h]	Volume componentes lote [cm ³]	Volume suportes lote [cm ³]
Valor	20.55	97.11	15.74

De modo a possibilitar o cálculo de material necessário à impressão e tendo em conta que a massa de componentes do lote é calculada multiplicando o número de unidades do lote pela

massa de cada componente obtida como resultado do projeto generativo, em 3.4.2, resta-nos calcular a massa de material necessário à impressão dos suportes.

Para tal, com base na informação da tabela anterior, multiplica-se o volume de suportes do lote pela densidade do material retirada da Tabela 6, representado pela equação (4.40).

$$m_{suportes} = Vol_{suportes} \times \rho \quad (4.40)$$

Substituindo valores, obtém-se uma massa de suportes de 69.6 g.

Em seguida apresentam-se as variáveis determinadas para cada atividade do processo que são utilizadas no cálculo dos custos totais de fabrico.

Setup

As variáveis determinadas relativas aos custos variáveis do *setup* são apresentadas na Tabela 43.

O tempo de *setup* é definido com base no modelo de custo apresentado em [35], o custo hora do operador é definido da mesma forma que para a maquinagem, assumindo um salário base de 1200 €, mais impostos e benefícios.

Tabela 43 – Variáveis determinadas para os custos variáveis do setup.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
t_{setup}	Duração da atividade de <i>setup</i>	0.75	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	16	[€/h]

As variáveis determinadas relativas aos custos fixos do *setup* são apresentadas na Tabela 44.

O tempo de *setup* já se encontra definido, o preço e vida da máquina de impressão são definidos com base no modelo de custo de [35], o *uptime* anual determinou-se da mesma forma que para a maquinagem CNC, assumindo 12 horas de *uptime* diário e 260 dias uteis por ano e o custo de oportunidade de capital é assumido.

Tabela 44 - Variáveis determinadas para os custos fixos do setup.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
t_{setup}	Duração da atividade de <i>setup</i>	0.75	[h]
$Pr_{máquina}$	Preço da máquina	500 000	[€]
$n_{máquina}$	Vida da máquina	10	[anos]
r	Custo de oportunidade do capital	10	[%]
$t_{p\text{anual}}$	<i>Uptime</i> de produção anual	3120	[h/ano]

Impressão

As variáveis determinadas relativas aos custos variáveis da impressão são apresentadas na Tabela 45.

A duração da impressão, número de componentes do lote e massa de suportes do lote, obtêm-se como resultado da simulação de fabrico efetuada. O preço da eletricidade é obtido da mesma forma que para a maquinagem CNC, com base na tarifa simples portuguesa. O preço do material em pó foi determinado pelo valor médio do intervalo apresentado em [40]. A potência da máquina é fornecida pelo *software* da simulação. As restantes variáveis associadas à perda de material, gás e filtros foram determinadas com base na informação disponibilizada pela *Hypermetal* no modelo de custo de [35].

Tabela 45 - Variáveis determinadas para os custos variáveis da impressão.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
$t_{impressão}$	Duração da impressão de um lote	20.55	[h]
N_{lote}	Número de peças por lote	9	[un]
$P_{máquina}$	Potência da máquina	0.4	[kW]
$Pr_{eletricidade}$	Preço da eletricidade	0.0786	[€/kWh]
$Pr_{material}$	Preço do material em pó	450	[€/kg]
$X_{perda\ material}$	Fator perda de material	8	[%]
$m_{componente}$	Massa de um componente	0.0477	[kg]
$m_{suportes}$	Massa dos suportes	0.0700	[kg]
$Pr_{gás}$	Preço de um cilindro de gás inerte	60	[€]
$N_{cilindro}$	Número de impressões que dura um cilindro	6	[un]
Pr_{filtro}	Preço de um filtro	30	[€]
t_{filtro}	Duração de um filtro	100	[h]

As variáveis determinadas relativas aos custos fixos da impressão são apresentadas na Tabela 46.

O tempo de impressão já se encontra definido, o *uptime* anual determinou-se da mesma forma que para a maquinagem CNC, assumindo 12 horas de *uptime* diário e 260 dias uteis por ano. A percentagem de manutenção e as restantes variáveis associadas à máquina e edifício são definidas com base nos valores apresentados no modelo de custo de [35]. O custo de oportunidade do capital foi assumido.

Tabela 46 - Variáveis determinadas para os custos fixos da impressão.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
$t_{impressão}$	Duração da atividade de impressão	20.55	[h]
$Pr_{máquina}$	Preço da máquina	500 000	[€]
$n_{máquina}$	Vida da máquina	10	[anos]
r	Custo de oportunidade do capital	10	[%]
$n_{edifício}$	Vida do edifício	30	[anos]
$A_{ocupada}$	Área do edifício ocupada	4.5	[m ²]
$A_{segurança}$	Área de segurança do edifício	18	[m ²]
C_{earea}	Custo do edifício por área	800	[€/m ²]
$t_{p anual}$	Uptime de produção anual	3120	[h/ano]
$\%_{manutenção}$	Percentagem do custo para manutenção	2	[%]

Remoção e limpeza

As variáveis determinadas relativas aos custos variáveis da remoção e limpeza são apresentadas na Tabela 47.

A duração de impressão e custo hora do operador já se encontram definidos. As restantes variáveis associadas aos tempos médios de remoção e limpeza e à recolha de filtros são definidas com base nos valores apresentados no modelo de custo de [35].

Tabela 47 - Variáveis determinadas para os custos variáveis da remoção e limpeza.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
$t_{impressão}$	Duração da atividade de impressão	20.55	[h]
$t_{limpeza}$	Duração média da limpeza de componentes	1	[h]
$t_{remoção}$	Duração média da remoção de suportes	0.45	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	16	[€/h]
$Pr_{recolha}$	Preço da recolha de produtos	70	[€]
t_{filtro}	Duração de um filtro	100	[h]
$N_{frecolha}$	Número de filtros usados até à recolha	9	[un]

Pós-Processamento

Tendo em conta que o tratamento de *Shot Peening* é realizado peça a peça e não através de um lote como na impressão, os tempos de duração apresentados para o cálculo dos custos referem-se apenas a um componente, não sendo necessário dividir o custo pelo número de componentes do lote como para as restantes atividades.

As variáveis determinadas relativas aos custos variáveis do pós-processamento são apresentadas na Tabela 48.

O custo hora do operador já se encontra definido. A duração da configuração da máquina é definida com base no valor apresentado no modelo de custo de [36].

Tabela 48 - Variáveis relativas aos custos variáveis do pós-processamento.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
t_{setup}	Duração da configuração da máquina	0.25	[h]
$C_{operador}$	Custo hora do operador	16	[h]

As variáveis determinadas, relativas aos custos fixos do pós-processamento, são apresentadas na Tabela 49.

O custo de oportunidade do capital, o *uptime* anual e o tempo de *setup* foram definidos anteriormente. As restantes variáveis são definidas tomando novamente como referência os valores apresentados no modelo de custo de [36].

Tabela 49 - Variáveis determinadas para os custos fixos do pós-processamento.

Variável	Descrição	Valor	Unidades
$t_{funcionamento}$	Duração do funcionamento da máquina	0.5	[h]
t_{setup}	Duração da configuração da máquina	0.25	[h]
$Pr_{máquina}$	Preço da máquina	9990	[€]
$n_{máquina}$	Vida da máquina	8	[anos]
r	Custo de oportunidade do capital	10	[%]
$t_{p\text{anual}}$	<i>Uptime</i> de produção anual	3120	[h/ano]
$Pr_{manutenção}$	Preço da manutenção	4995	[€]

4.1.3. Resultados e discussão

Nesta secção, apresentam-se os resultados obtidos pela aplicação dos modelos de custo anteriores relativos à maquinaria CNC e ao fabrico aditivo, recorrendo às variáveis já determinadas.

Para efeitos de comparação e como referido anteriormente, para o caso do fabrico aditivo os custos calculados por lote de impressão foram convertidos em custos por unidade, dividindo os valores obtidos pelo número de componentes do lote.

Na figura seguinte, Figura 48, são apresentados dois gráficos de distribuição onde é possível verificar a percentagem de cada tipo de custo para ambos os modelos aplicados.

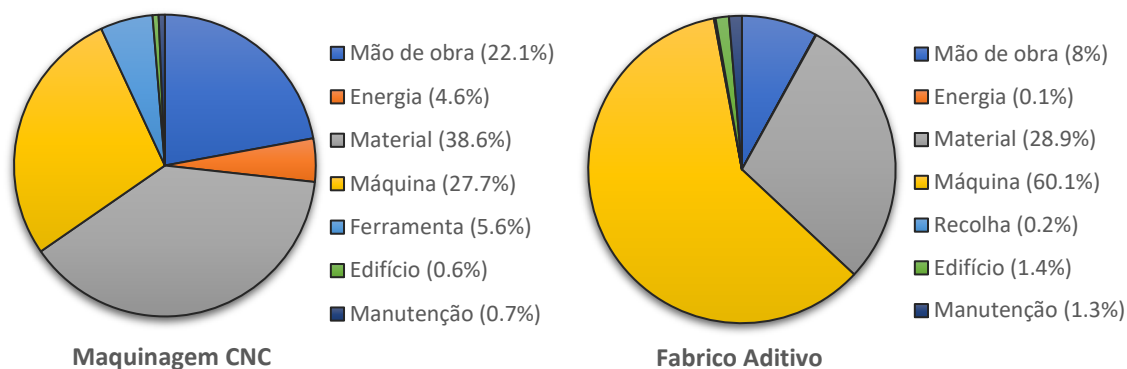


Figura 48 – Distribuição de custos por modelo.

Os resultados obtidos para cada tipo de custo associado a cada modelo são apresentados no gráfico de barras da Figura 49, incluindo o custo total de fabrico dado pela soma das restantes rúbricas.

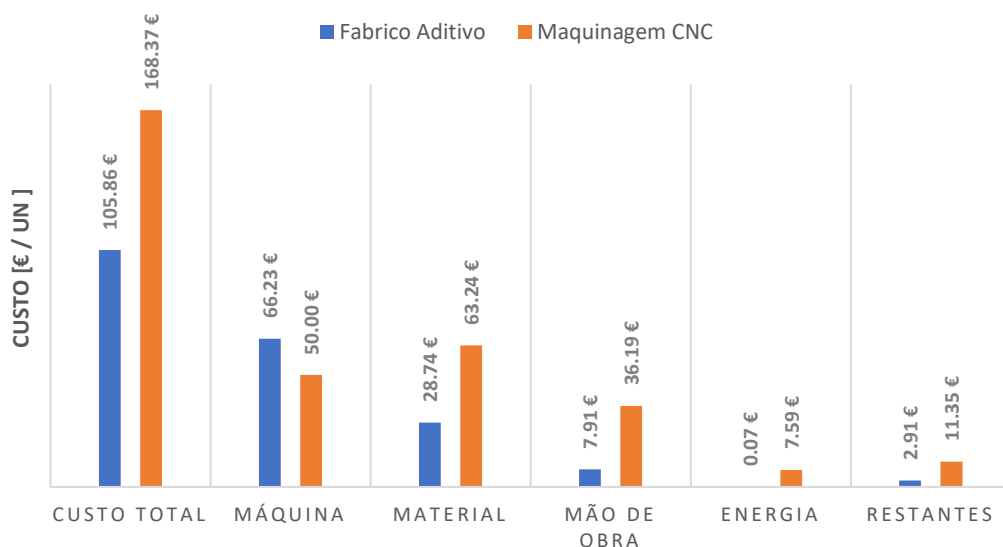


Figura 49 – Comparação de custos: Maquinagem CNC vs Fabrico aditivo.

Pela análise do gráfico anterior, rapidamente se verifica que para este caso de estudo a produção de uma unidade da nova proposta de configuração através de fabrico aditivo, tem um custo total associado consideravelmente mais reduzido em relação a uma unidade da configuração inicial obtida por maquinagem CNC, com uma diferença de 62.51 €, que corresponde a um desvio de cerca de 37 %.

Esta diferença deve-se a vários fatores associados a cada tipo de custo e discutidos em seguida:

Em primeiro lugar, é necessário notar que o fabrico aditivo apenas tem custo superior à maquinagem CNC numa das rúbricas de custo associada ao custo de aquisição da máquina.

Este facto deve-se ao preço da máquina de impressão ser consideravelmente mais elevado que o preço da máquina de fresagem CNC, sendo 1.8 vezes superior. Esta exigência de investimento justifica a elevada percentagem associada ao custo da máquina na distribuição do fabrico aditivo do gráfico da Figura 48.

Em seguida, verifica-se também que o tipo de custo com maior discrepância entre modelos refere-se ao custo de material necessário, onde para a maquinagem é mais do dobro que para o fabrico aditivo. Esta diferença está relacionada com a geometria do componente em dois aspetos: por um lado a redução de massa e volume obtidos no projeto para fabrico aditivo do caso de estudo, levam a que a configuração final obtida em AM exija menos material, e por outro, devido ao carácter subtrativo da maquinagem a configuração inicial exige um bloco bruto de material de elevadas dimensões.

Em relação aos custos de mão de obra, tendo em conta que no caso do processo de maquinagem CNC, como a máquina não é caracterizada por cinco eixos de atuação, assume-se a necessidade da presença do operador, enquanto que na impressão da configuração final assume-se 100 % de autonomia da máquina, sem necessidade de existência de operador, sendo perceptível a diferença verificada entre eles. No entanto, para o caso da maquinagem, a presença do operador em todas as atividades do processo contribui para o facto da percentagem de custo da máquina e mão-de-obra serem equiparáveis, como se verifica no gráfico da Figura 48.

Os custos de energia de cada modelo dependem da potência requerida pela máquina e tempo de fabrico por componente, visto que a maquinagem CNC tem mais uma hora de duração que o fabrico aditivo e a potência da máquina tem um valor consideravelmente superior ao da máquina de impressão, justifica-se a diferença apresentada no resultado do gráfico anterior.

A diferença obtida entre os restantes tipos de custo, deve-se principalmente à influência do custo associado ao desgaste da ferramenta de corte no processo de maquinagem CNC, tendo um custo superior.

Assim sendo, conclui-se que apesar de para a produção da configuração final através de fabrico aditivo o investimento na máquina ser superior, para o presente caso de estudo com a redução de massa obtida, os custos totais de fabrico são inferiores em 37 % em relação à produção da configuração inicial através de maquinagem CNC. Este facto vem reforçar a importância do projeto para fabrico aditivo na redução de custos de fabrico, pois no caso de não existir redução de massa como resultado da reconfiguração, os custos de fabrico possivelmente seriam idênticos ou mesmo superiores. Este potencial para redução de custos de fabrico verificado neste caso de estudo, contribui para que o fabrico aditivo seja cada vez mais um forte candidato à produção de componentes metálicos de suporte e estruturais no setor aeronáutico, tomando partido da grande capacidade de customização.

4.2. Custos operacionais e emissões de carbono

Ao longo das últimas décadas, têm sido cada vez mais discutidos os diferentes aspetos do impacto ambiental do homem que têm contribuído para as alterações climáticas e aquecimento global do planeta, estando maioritariamente associado às emissões de carbono geradas pelos diferentes setores, como o da energia e transportes. Um dos principais ramos do setor de transportes que contribui para esse impacto, é o ramo da aeronáutica devido às elevadas emissões de carbono resultantes da queima de combustível a jato dos aviões. Tome-se como exemplo o caso da União Europeia em que contribui com 3.8 % das emissões totais de CO_2 [41].

Tendo isso em conta é realizada uma análise ao potencial de redução de emissões diretas associadas à queima de combustível, obtido pela reconfiguração do componente proposta pelo caso de estudo anterior.

Para além disso, visto que no setor aeronáutico o custo associado ao gasto de combustível ocupa cerca de 33 % dos custos totais [12], neste subcapítulo é ainda apresentado uma análise onde é avaliado o potencial de redução de custos operacionais apenas associados ao gasto de combustível, pelo que não se incluem os custos de manutenção, taxas de carbono etc...

Para possibilitar a realização de ambos os estudos pretendidos, seguiu-se a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 50.

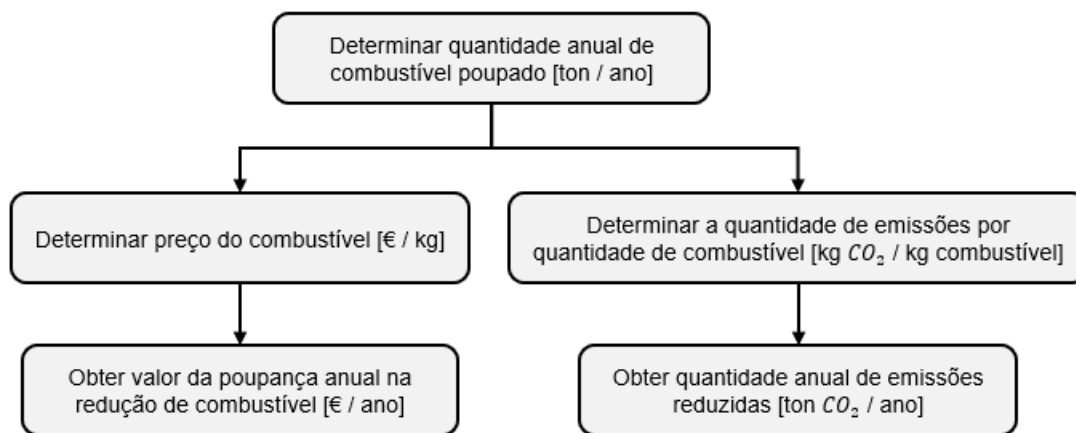


Figura 50 – Metodologia para o cálculo do potencial de redução de custos e emissões.

Determinar quantidade de combustível poupado

Segundo Roca et al. [42], Huang et al. [43] estimam que existam cerca de 250-500 kg em componentes metálicos “auxiliares” por avião com características que possibilitam a sua substituição por componentes equivalentes mais leves e produzidos em AM. Consideram-se auxiliares pois não são de suporte ou funcionais, sendo classificados pela FAA como componentes de Categoria 3, estando dispensados dos pesados processos de certificação.

Assim sendo, assumindo o valor máximo de 500 kg em componentes metálicos “auxiliares” e um potencial de redução de massa de 63 %, baseado no resultado obtido no caso de estudo do componente, obtém-se uma redução de massa de 321.3 kg por aeronave.

Em seguida, com base no artigo “*Fuel economy as function of weight and distance*” de R. Steinegger [44] determina-se o rácio de redução de combustível em [kg/km] associado à redução de 1 kg de peso da aeronave, assumindo o valor médio do intervalo apresentado de 2.5×10^{-5} [kg/km]. Multiplicando este rácio pela redução de massa anterior, obtém-se a redução de combustível em [kg/km].

Considerando para o presente caso de estudo, o percurso aéreo Lisboa - Berlim com os parâmetros apresentados na Tabela 50 e retirados de [35], calcula-se o número de quilómetros percorridos num ano multiplicando o número de percursos anual pela distância de um percurso. Sendo que o número de percursos anual obtém-se dividindo o número de horas de voo anuais pela duração de um voo.

Tabela 50 - Parâmetros do percurso aéreo do caso de estudo [35].

Percurso	Lisboa - Berlim
Aeronave	A319
Distância [km]	2309
Duração [h]	3.5
Horas de voo anuais [h]	4900

Com as considerações anteriores, obtém-se o valor da quantidade anual de combustível poupado, apresentado na tabela de resultados no final da secção.

Determinar preço do combustível

Para determinar o preço do combustível recorreu-se à informação disponível *online* pelo *Index mundi* em [45] que apresenta os valores mensais do preço do combustível a jato dos últimos 10 anos, ilustrado pelo gráfico da Figura 51.

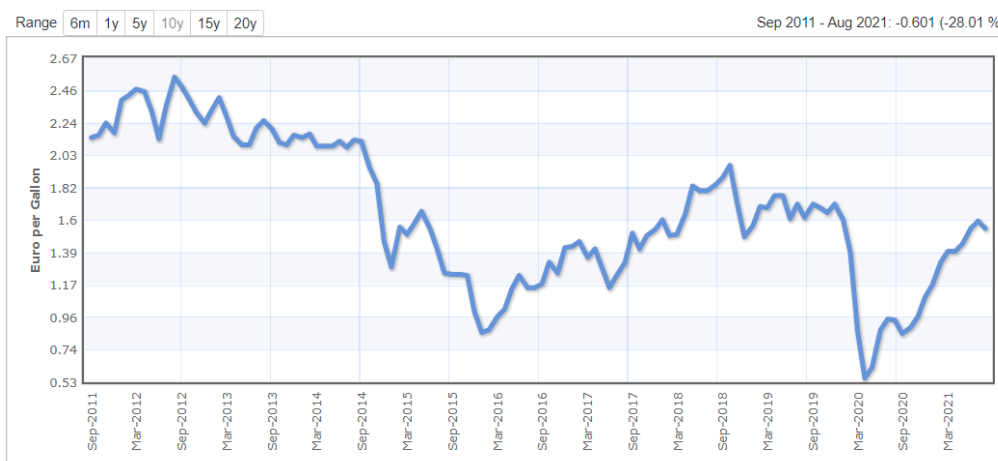


Figura 51 - Preço mensal do combustível a jato nos últimos 10 anos [45].

Assumindo o valor médio dos valores apresentados no gráfico anterior e convertendo de [€/gallon] para [€/kg], considerando a conversão de 3.04 [kg/gallon] de [46], obteve-se o preço do combustível dado por 0.543 [€/kg].

Determinar quantidade de emissões por quantidade de combustível

De acordo com o modelo apresentado no trabalho de *Apffelstaedt* em [47], a quantidade de CO_2 emitida pelo motor de um avião a jato (W_{CO_2}) é uma função da produção específica de CO_2 do combustível (SCE) e a quantidade total de combustível queimado (W_{comb}), dada pela equação seguinte:

$$W_{CO_2} = SCE \times W_{comb} \quad (4.41)$$

Onde a SCE para o querosene é dada por 3.15 [kg CO_2 / kg combustível] [47].

Aplicando a equação anterior, considerando a quantidade de combustível poupado ao invés do queimado, obtém-se a quantidade anual de emissões reduzidas pela poupança de combustível, apresentada na tabela em seguida.

Resultados

Os resultados obtidos são apresentados na informação contida na Tabela 51.

Tabela 51 - Resultados relativos aos custos operacionais e emissões.

Redução combustível [ton / ano]	Poupança combustível [€ / ano]	Redução emissões [ton CO_2 / ano]
25.9	14,063.7	81.6

Pela análise dos resultados anteriores é possível concluir que através da redução de massa obtida pelo projeto para fabrico aditivo do caso de estudo do componente, obtém-se um potencial de poupança em custos operacionais relacionados com a queima de combustível na ordem dos 14 000 €.

Para além disso, para efeitos de referência assume-se como válida a estimativa de emissões equivalentes por hora de voo de 250 [kg CO_{2eq} /h] apresentada no estudo de [48]. Assim, considerando as horas de voo anuais apresentadas na tabela de parâmetros do percurso, obtém-se 1225 [ton CO_{2eq} /ano] por aeronave. Posto isto, pela análise da tabela anterior verifica-se que o potencial de redução de emissões obtido apenas relacionado com a queima de combustível da aeronave corresponde a 6.7 % das emissões anuais.

Esta análise vem reforçar a importância da aplicação do projeto para fabrico aditivo numa ótica de redução de massa, pois não só permite reduzir custos de fabrico como pode reduzir consideravelmente os custos de funcionamento e ter relevada importância para a sustentabilidade e redução de emissões no setor.

5. Discussão e Conclusão

A presente dissertação teve como objetivo a avaliação do potencial da aplicação de diferentes métodos de projeto para fabricação aditiva (*Design for AM*) numa ótica de projeto para redução de massa (*Design for Lightweight*) a um componente metálico do ramo da aeronáutica sem comprometer a resistência ao carregamento. Para tal, foram aplicadas duas ferramentas de projeto, otimização topológica e projeto generativo, onde se obtiveram duas novas propostas de configuração do componente. Em seguida, selecionou-se uma das propostas e avaliaram-se os custos de fabricação de cada configuração. A configuração inicial através de maquinagem CNC e a configuração final através de fabricação aditiva. Por último, foi avaliado o potencial de redução de custos operacionais e emissões de carbono associados à queima de combustível.

Assim sendo, através dos resultados obtidos conclui-se:

- A capacidade de customização do fabricação aditiva permite reconfigurar componentes pré-existentes incluindo componentes metálicos de suporte no âmbito da indústria aeronáutica, existindo diferentes ferramentas (ou métodos) para tal. Para o presente caso de estudo reconfigurou-se um *bracket* de suporte em liga de Titânio presente na asa de um avião através da aplicação de dois métodos: otimização topológica e projeto generativo.
- Para tomar partido da customização foi necessária a aplicação de diferentes *softwares* de simulação para o desenvolvimento dos métodos de projeto: *Solidworks 2020* – modelação CAD do componentes, análises lineares estáticas e otimização topológica; *Autodesk Fusion 360* – análise linear estática, projeto generativo e simulação de fabricação em maquinagem CNC; *Autodesk Netfabb* – simulação de fabricação em AM.
- Através da reconfiguração foi possível otimizar a distribuição de material e reduzir a massa de um componente sem comprometer a resistência às condições de carregamento. Nalguns casos de carga até o deslocamento se reduziu e a resistência aumentou. Para o presente caso de estudo obteve-se uma redução de massa de cerca de 63 % para o projeto generativo e 42 % para a otimização topológica. Para o caso de carga vertical, na proposta de projeto generativo o deslocamento reduziu 64 % e a tensão máxima reduziu 48 %.
- É necessário ter em atenção as zonas do componente sujeitas a concentrações de tensões, pois existe a possibilidade de constituírem singularidades e afetarem os resultados obtidos. Para o presente caso de estudo as singularidades foram identificadas nas zonas em torno dos furos do componente.

- É do maior interesse conhecer as condições de carregamento reais do objeto, no entanto a definição de três possibilidades de carga permitiu avaliar o potencial de redução de massa sem comprometer a resistência ao carregamento para diferentes cenários.
- A redução de massa obtida pela reconfiguração permite reduzir custos de fabrico. Para o presente caso de estudo os custos de fabrico em AM da nova proposta foram inferiores em 37 % relativamente à configuração inicial por maquinagem CNC. Importante notar que o investimento necessário para a aquisição da máquina de fabrico aditivo é consideravelmente superior ao da maquinagem CNC e que a maior diferença nos custos totais de fabrico de cada tecnologia está associada ao custo de material. Este facto vem reforçar a importância da capacidade de customização do fabrico aditivo, pois no caso de não se reduzir a massa através da reconfiguração os custos de fabrico poderiam ser similares ou até superiores.
- A aplicação de métodos de projeto para fabrico aditivo e respetiva reconfiguração do componente tem um potencial de redução de custos operacionais e emissões diretas que pode fazer a diferença, não só de uma perspetiva económica, mas também ecológica e sustentável. O presente caso de estudo estima um potencial anual de poupança de combustível e redução de emissões diretas, de cerca de 14 000 € e 82 ton por aeronave, respetivamente. Importante ter em conta que na análise efetuada apenas se considerou o potencial associado às peças metálicas “auxiliares” que não estão limitadas pela certificação. No caso de se incluir os componentes metálicos de suporte e estruturais, o potencial é ainda superior. Este facto vem reforçar a importância da pesquisa e inovação tecnológica no sentido de ultrapassar as barreiras de certificação necessárias.

Em perspetivas de trabalho futuro:

- Sugere-se a realização do mesmo estudo através da aplicação dos métodos de projeto para fabrico aditivo com vista a reduzir a massa, mas mantendo a distribuição de deslocamento ao invés das tensões, avaliando o potencial do fabrico aditivo para a rigidez.
- Para além disso é de relevada importância a realização de outros tipos de estudo com vista a contribuir para ultrapassar a barreira da certificação. Sugere-se a realização de análises de fadiga ou outros tipos de estudo do comportamento dos materiais, de modo a conhecer melhor as implicações associadas a esta tecnologia e no futuro tomar mais partido da sua aplicação.

Bibliografia

- [1] M. Pérez, D. Carou, E. Rubio and R. Teti, "Current advances in additive manufacturing", *Procedia CIRP*, 2020.
- [2] X. Zhang and E. Liang "Metal additive manufacturing in aircraft: current application, opportunities and challenges", Shanghai Aircraft Design and Research Institute, 2019.
- [3] ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing - General principles - Terminology. ISO/ASTM 2018.
- [4] I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker, "Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing", 2nd edition, 2015.
- [5] John O. Milewski, "Additive Manufacturing of Metals from Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry", vol. 258, 2017.
- [6] M. Jiménez, L. Romero, I. Dominguez et al. "Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects", *Complexity* vol.2019, 2019.
- [7] F. Calignano, M. Galati, L. Iuliano, "A metal powder bed fusion process in industry: Qualification considerations", Department of Management and Production Engineering, Politecnico di Torino, 2019.
- [8] Roland Berger Strategy Consultants, "Additive Manufacturing: a game changer for the manufacturing industry?", 2013.
- [9] E. Feldbaum, "PBF – Process, Parameters and Hardware", AACHEN Center of Additive Manufacturing Webinar, 2020.
- [10] A. Monteiro, "Topology Optimization of Microstructures with Constraints on Average Stress and Material Properties" Instituto Superior Técnico, 2017.
- [11] M. Pant, P. Pidge, L. Nagdeve and H. Kumar "A Review of Additive Manufacturing in Aerospace Application", Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Delhi, December 2020.
- [12] S. Singamneni, L.V. Yifan, A. Hewitt, R. Chalk, W. Thomas and D. Jordinson "Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review", Department of Aerospace Engineering, Auckland University of Technology, February 2019.
- [13] "Transformation in 3D: How a walnut-sized part changed the way GE Aviation builds jet engines", General Electric, 2015 [Online] Available: <https://www.ge.com/news/reports/transformation-3d-walnut-sized-part-changed-way-ge-aviation-builds-jet-engines>. [Accessed: 07-Jun-2021].

- [14] “Airbus Defence and Space develops aluminium bracket for new Eurostar 3000 satellite platforms”, Metal AM, 2015 [Online] Available: <https://www.metal-am.com/airbus-defence-and-space-develops-aluminium-bracket-for-new-eurostar-e3000-satellite-platforms/>. [Accessed: 07-Jun-2021].
- [15] T. Kellner “The FAA cleared the first 3D printed part to fly in a commercial jet engine from GE”, General Electric, 2015 [Online] Available: <https://www.ge.com/news/reports/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly-2>. [Accessed: 07-Jun-2021].
- [16] A. Kentli “Topology Optimization Applications on Engineering Structures, Truss and Frames - Recent Advances and New Perspectives”, Intech Open, 2019.
- [17] “The next wave of intelligent design automation”, Harvard Business Review Analytic Services, 2018
- [18] “Engineering Product Design – What is Topology Optimization?” [Online] Available: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>. [Accessed: 14-Feb-2021]
- [19] M. McKnight, “Generative Design: What it is? How is it being used? Why it is a game changer!”, DesTech Conference Proceedings, [Online] Available: <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/612/1903>. [14-Feb-2021].
- [20] R. Akella “What Generative Design is and why it’s the future of manufacturing”, New Equipment Digest, 2018 [Online] Available: <https://www.newequipment.com/research-and-development/article/22059780/what-generative-design-is-and-why-its-the-future-of-manufacturing>. [15-Feb-2021].
- [21] B. Dannon “How GM and Autodesk are using Generative Design for vehicles of the future”, Autodesk News, 2018 [Online] Available: <https://adsknews.autodesk.com/news/gm-autodesk-using-generative-design-vehicles-future>. [03-Mar-2021].
- [22] Robert Rovira, “Autodesk workshop about generative design with Fusion 360” [Online] Available: <https://norbertrovira.com/autodesk-workshop-about-generative-design-with-fusion-360/?lang=en>. [Accessed: 10-Mar-2021].
- [23] B. Redwood “How to design parts for metal 3d printing”, 3D Hubs [Online] Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-metal-3d-printing/#introduction>. [Accessed: 15-Mar-2021].
- [24] J. Booth, T. N. Reid, J. Alperovich, K. Ramani “The Design for Additive Manufacturing Worksheet”, Journal of Mechanical Design, 2017.
- [25] R. Kirchain, F. R. Field “Process-Based Cost Modelling: Understanding the Economics of Technical”, Encyclopedia of Materials Science & Engineering, 2020.

- [26] C. Veiga, J.P. Davim, A.J.R Loureiro “Review on machinability of titanium alloys: the process perspective” Advanced Study Center Co. Ltd., 2013.
- [27] M. Abdulgadir, A.E.M. Ahmadi, W.Y: Bouhawish “Machinability of titanium grade-5 alloy (Ti-6Al-4V) during turning processes: a review” IRJET, 2019.
- [28] “Ti-6Al-4v Technical Data Sheet”, Neonickel [Online] Available: <https://www.neonickel.com/>. [Accessed: 10-Feb-2021].
- [29] “Titanium Alloys – Ti6Al4V Grade 5”, U.S Titanium Industry Inc., 2002.
- [30] C. Veiga, J.P. Davim, A.J.R Loureiro “Properties and applications of Titanium alloys: A brief review”, Reviews on Advanced Material Science 2012, tabela 4.
- [31] “Ti-6Al-4V Grade 5 Technical Sheet”, Smiths Metal Centre, 2018.
- [32] J. Hamrock, B. Jacobson, S.R. Schmid “Fundamentals of machine elements”, cap.1, CRC Press, 2014.
- [33] R.G. Budynas, J.K. Nisbett “Shigley’s mechanical engineering design”, cap.1, McGraw-Hill Companies Inc, 9th edition, 2011.
- [34] M. Ribeiro “Development of Process Based Model to maximize injection moulding efficiency by mould design alternatives comparison”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, 2016.
- [35] D. Sequeira “Metal Additive Manufacturing in Aeronautics: a Life Cycle Cost Perspective”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Aeroespacial, Instituto Superior Técnico, 2019.
- [36] S. Remédios “Cost Model Estimation for the Metal Manufacturing in Aeronautics an Analysis of Additive Manufacturing”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Aeroespacial, Instituto Superior Técnico, 2020.
- [37] “Tarifa de acesso às redes 2021”, EDP Comercial, 2021 [Online] Available: https://helpcenter.edp.pt/media/2175/tarifa-de-acesso-as-redes_2021.pdf. [Accessed: 10-Sep-2021].
- [38] “Titanium 6Al-4V Grade 5, UNS R56400 Titanium Grade 5 Product Supplier”, Faswell [Online] Available: <https://www.fastwell.in/titanium-grade-5.html#price>. [Accessed: 10-Aug-2021].
- [39] P.P. Shukla, P.T. Swanson, C.J. Page “Laser shock peening and mechanical shot peening processes applicable for the surface treatment of technical grade ceramics: A review”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014.
- [40] “A guide to 3D printing with titanium”, AMFG, 2019 [Online] Available: <https://amfg.ai/2019/06/18/titanium-3d-printing-guide/>. [Accessed: 10-Aug-2021].

- [41] “Reducing emissions from aviation”, European Commission, Climate action, 2021 [Online] Available: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-aviation_en. [Accessed: 2-Oct-2021].
- [42] J. B. Roca, P. Vashnav, R. E. Laureijs, J. Mendonça e E. Fuchs “Technology cost drivers for a potential transition to decentralized manufacturing”, vol. 28 pp. 136-151, 2019.
- [43] R. Huang, M. Riddle, D. Graziano, J. Warren, S. Das, S. Nimbalkar, J. Cresko e E. Masanet “Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components” Journal of cleaner production 2016.
- [44] R. Steinegger “Fuel economy as function of weight and distance”, ZHAW School of Engineering, 2017.
- [45] “Jet Fuel Monthly Price – Euro per gallon”, Index Mundi, 2021 [Online] Available: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel&months=180¤cy=eur>. [Accessed: 2-Oct-2021].
- [46] “CAP 697 CAA JAR-FCL Examinations - Flight Planning Manual”, Civil Aviation Authority, 2006.
- [47] A. Apffelstaedt “Identifying CO2 Reducing Aircraft Technologies and Estimating their Impact on Global Emissions”, Hamburg University of Applied Sciences, 2009.
- [48] “Aviation”, Carbon Independent, 2021 [Online] Available: <https://www.carbonindependent.org/22.html>. [Accessed: 3-Oct-2021].

Anexos

Anexo A –Especificações geométricas das configurações.

Anexo B – Dados do processo iterativo para definição do carregamento.

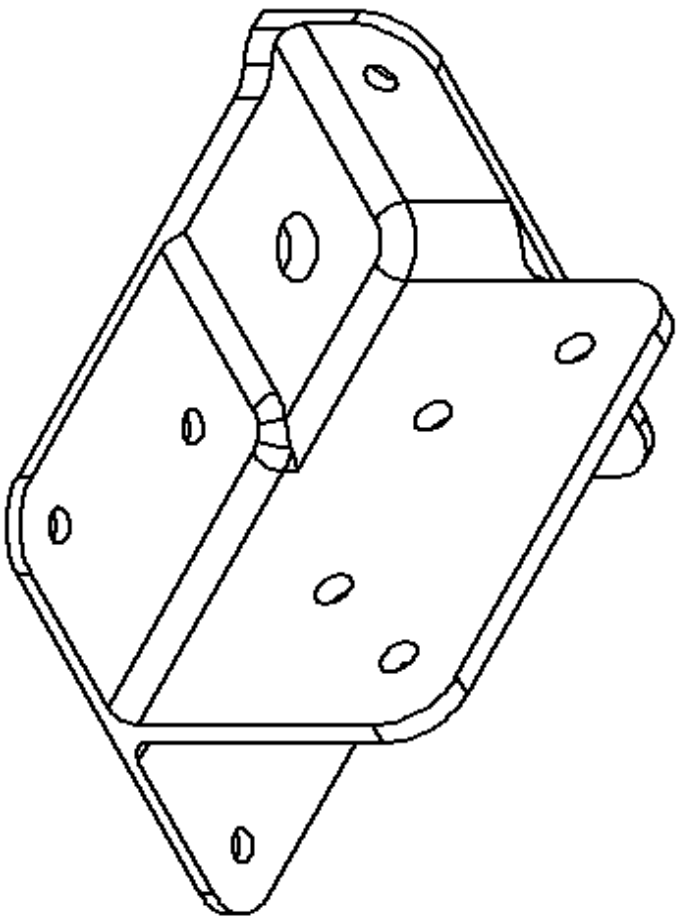
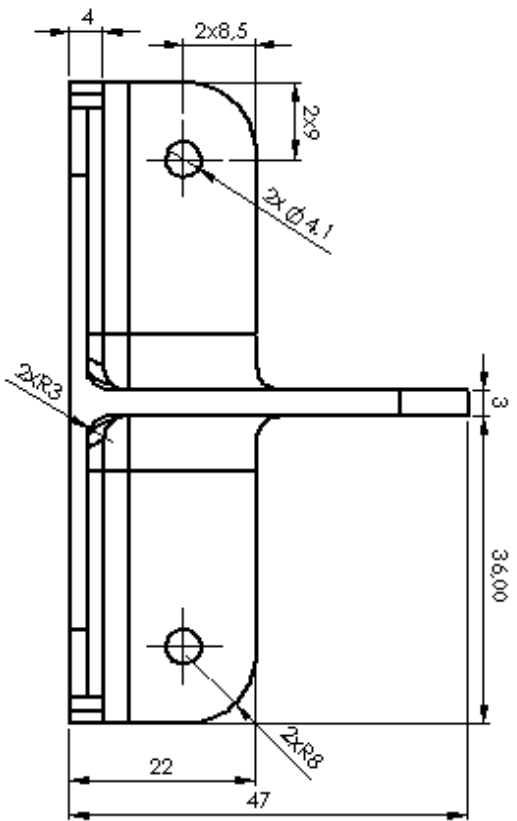
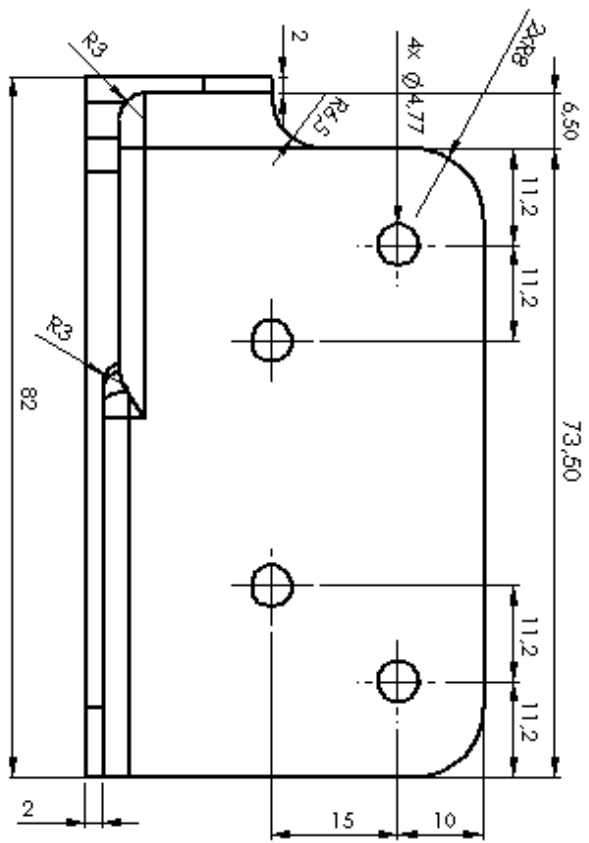
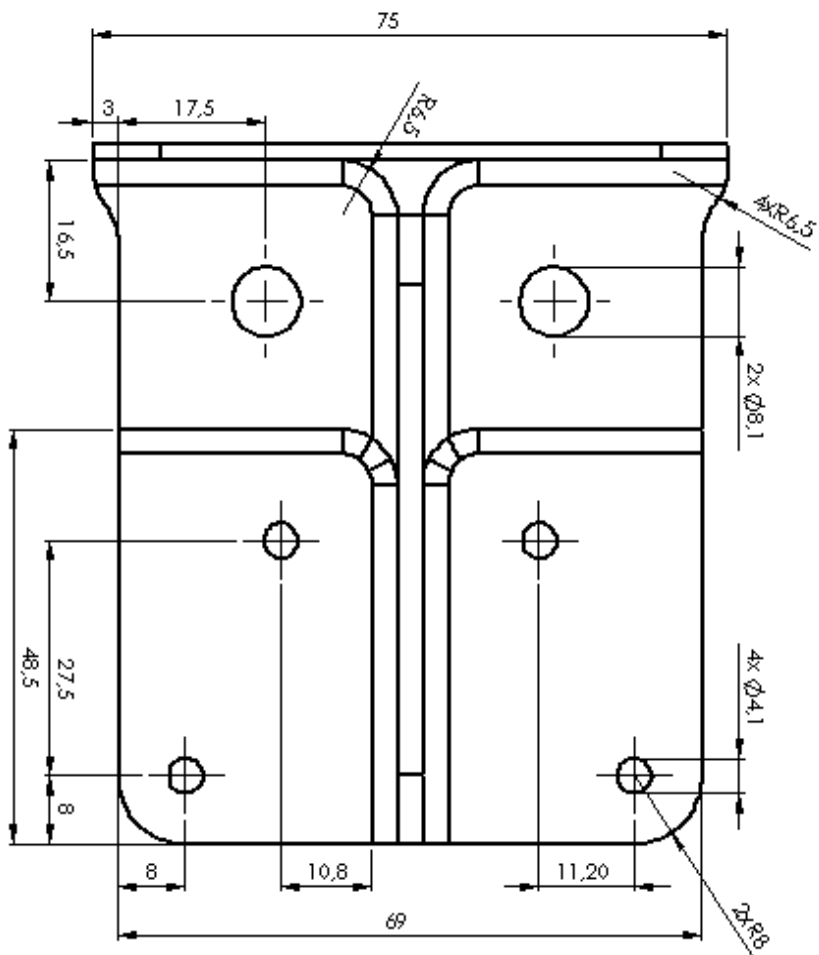
Anexo C – Configurações obtidas no processo iterativo de otimização topológica.

Anexo D – Modelos geométricos obtidos no projeto generativo.

Anexo E – Sequência de processos de maquinagem CNC.

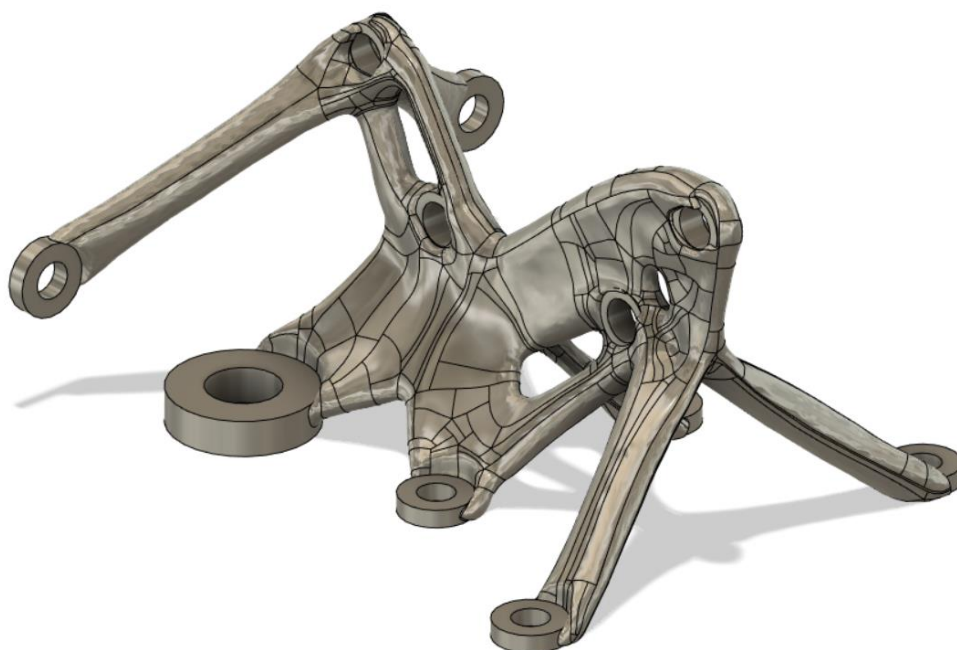
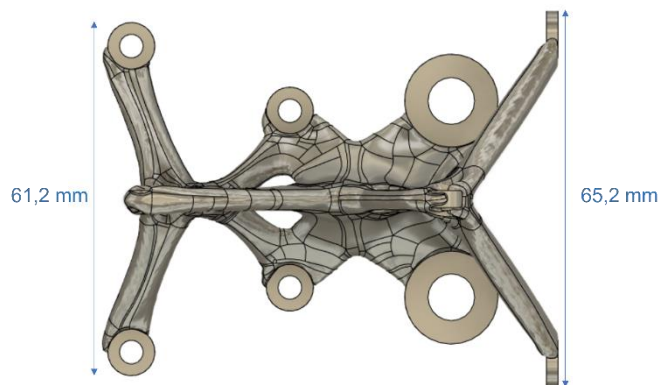
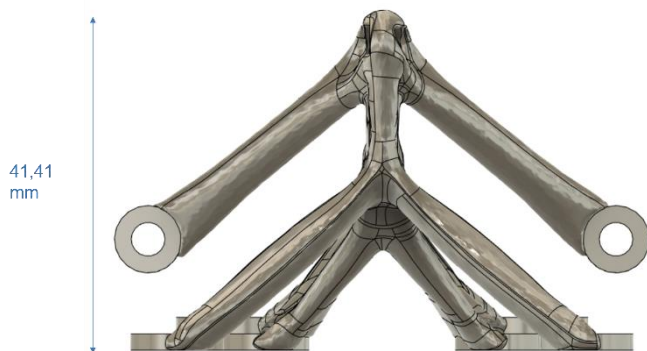
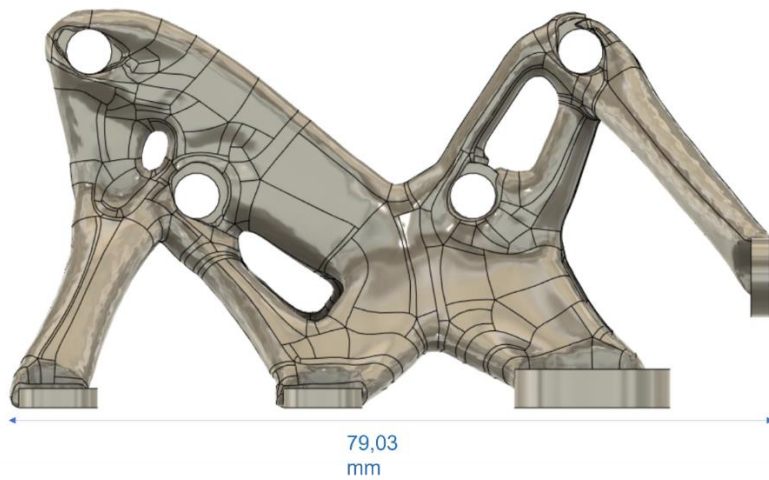
Anexo A –Especificações geométricas das configurações.

Configuração original e configuração da proposta de otimização topológica (Desenho Técnico):



		Escala 1:5:1	
Projeto T-01-4v (Orçdo 5)	Quantidade 1	Material 	Observações
Desenho 	Revisão 	Assinatura 	Data
Nome: Senziles Perdigão nº79952		Desenho e Modelação Geométrica	
Curso: II BIMC		Peça de suporte Oficial	
Tabela A3	Quantidade INDUNX-001	Tabela 1	Assinatura

Configuração Projeto Generativo (Medidas máximas):



Anexo B – Dados do processo iterativo de obtenção de condições de carregamento.

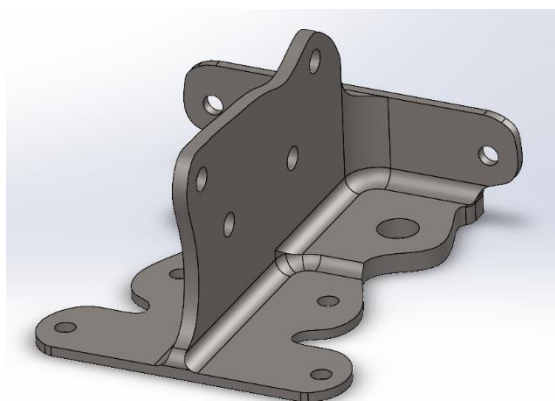
Processo Iterativo - Definição das Cargas					
Tipo de Análise:	Análise Linear Estática				
Resultados:	Distribuição de Tensões de <i>Von Mises</i>				
Software:	Solidworks SP4 Premium 2020				
Fator de Segurança:	$n_s = 3$				
Definição da Força Vertical					
Fx [N]	Fy [N]	$\sigma_{VM_{m\acute{a}x}}$ [Mpa]	$\sigma_{VM_{limite}}$ [MPa]	Desvio [%]	Δ_{max} [mm]
0	2000	399.60	303.33	31.74	0.1802
0	1500	306.20	303.33	0.945	0.1784
Definição da Força Horizontal					
Fx [N]	Fy [N]	$\sigma_{VM_{m\acute{a}x}}$ [Mpa]	$\sigma_{VM_{limite}}$ [MPa]	Desvio [%]	Δ_{max} [mm]
2000	0	168.90	303.33	-44.31	0.05988
3000	0	256.30	303.33	-15.51	0.08086
3500	0	299.00	303.33	-1.429	0.09434
3600	0	307.40	303.33	1.341	0.09703
Definição da Força Inclinada					
Fx [N]	Fy [N]	$\sigma_{VM_{m\acute{a}x}}$ [MPa]	$\sigma_{VM_{limite}}$ [MPa]	Desvio [%]	Δ_{max} [mm]
2000	2000	209.80	303.33	-30.84	0.07748
3000	3000	316.40	303.33	4.308	0.09120
2800	2800	295.30	303.33	-2.648	0.08512
2900	2900	306.30	303.33	0.978	0.08815

Anexo C – Dados e configurações do processo de otimização topológica.

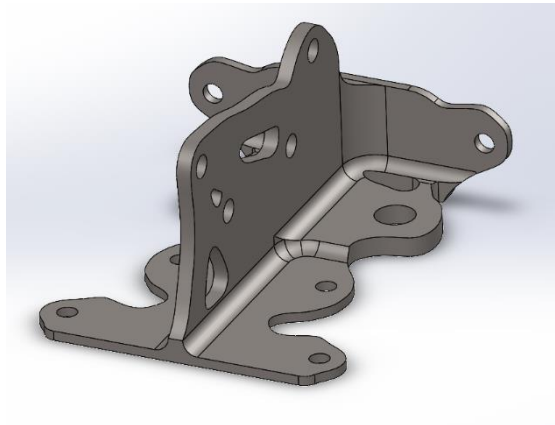
Tabela de Dados da Análise

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA					
Redução de Massa - 30%					
$\sigma_{max_{vertical}}$ [Mpa]	298.7	$\sigma_{adm_{vertical}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	-1.5
$\sigma_{max_{horizontal}}$ [Mpa]	290.1	$\sigma_{adm_{horizontal}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	-4.4
$\sigma_{max_{inclinada}}$ [Mpa]	300.2	$\sigma_{adm_{inclinada}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	-1.0
Massa Final [g]	95.77	Massa Inicial [g]	127.69	Desvio [%]	-25.0
Redução de Massa - 40%					
$\sigma_{max_{vertical}}$ [Mpa]	303.2	$\sigma_{adm_{vertical}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	0.0
$\sigma_{max_{horizontal}}$ [Mpa]	308.6	$\sigma_{adm_{horizontal}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	1.7
$\sigma_{max_{inclinada}}$ [Mpa]	306.5	$\sigma_{adm_{inclinada}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	1.0
Massa Final [g]	83.44	Massa Inicial [g]	127.69	Desvio [%]	-34.7
Redução de Massa - 50%					
$\sigma_{max_{vertical}}$ [Mpa]	310.7	$\sigma_{adm_{vertical}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	2.4
$\sigma_{max_{horizontal}}$ [Mpa]	311.4	$\sigma_{adm_{horizontal}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	2.7
$\sigma_{max_{inclinada}}$ [Mpa]	308.8	$\sigma_{adm_{inclinada}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	1.8
Massa Final [g]	74.2	Massa Inicial [g]	127.69	Desvio [%]	-41.9
Redução de Massa - 60%					
$\sigma_{max_{vertical}}$ [Mpa]	343.3	$\sigma_{adm_{vertical}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	13.2
$\sigma_{max_{horizontal}}$ [Mpa]	378.6	$\sigma_{adm_{horizontal}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	24.8
$\sigma_{max_{inclinada}}$ [Mpa]	346.1	$\sigma_{adm_{inclinada}}$ [Mpa]	303.33	Desvio [%]	14.1
Massa Final [g]	60.13	Massa Inicial [g]	127.69	Desvio [%]	-52.9

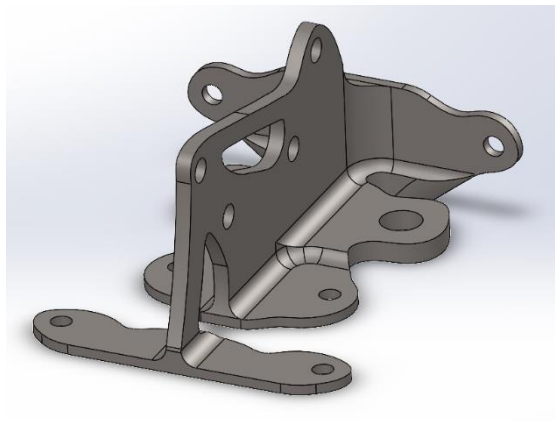
Configuração Otimizada – Redução de 30 %



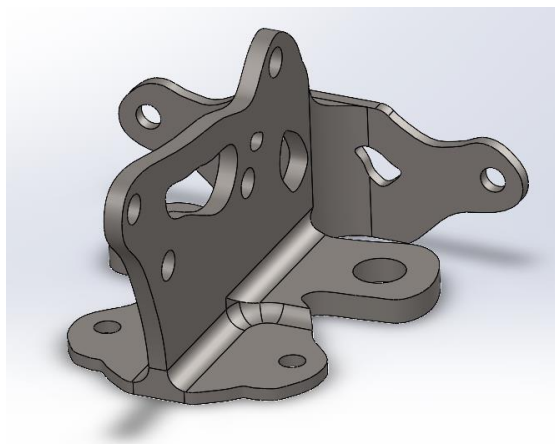
Configuração Otimizada - Redução de 40 %



Configuração Otimizada – Redução de 50 %



Configuração Otimizada – Redução de 60 %



Anexo D – Modelos geométricos obtidos no projeto generativo.

Outcome1:



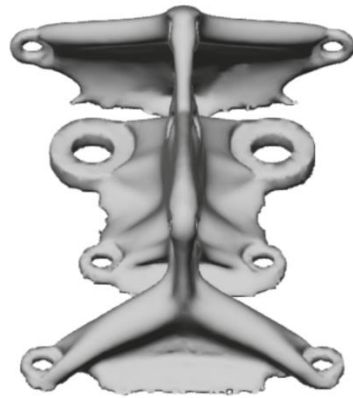
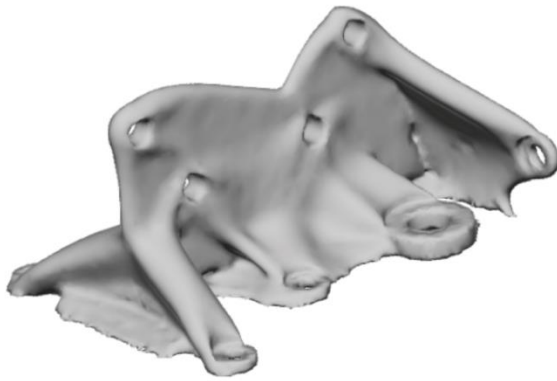
Outcome2:



Outcome3:



Outcome4:



Outcome5:



Anexo E - Sequência de processos de maquinagem CNC.

Número	Nome	Duração [min]	Duração [h]
1	Facejamento inicial	6.37	0.106
2	Remoção em grosso inicial	54.72	0.912
3	Acabamento face de cima_1	13.1	0.218
4	Acabamento face de cima_2	19.55	0.326
5	Contorno_1	3.67	0.061
6	Contorno_2	6.3	0.105
7	Contorno_3	1.75	0.029
8	Acabamento face exterior vertical	6.77	0.113
9	Contorno_5	4.55	0.076
10	Contorno_6	4.52	0.076
11	Contorno_7	0.5	0.008
12	Facejamento base	16.63	0.277
13	Acabamento da base	10.23	0.171
14	Acabamento aba central_1	17.25	0.288
15	Acabamento aba central_2	17.03	0.284
16	Contorno_8	3.22	0.054
17	Furação aba central	0.65	0.011
18	Furação parafusos	0.43	0.007
19	Furação rebites horizontais	0.3	0.005
20	Furação rebites verticais	0.62	0.010
	TOTAL	188.16	3.12