



DESIGN POR OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA/DESIGN GENERATIVO: DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES PARA APLICAÇÃO EM AUTOCARROS

RICARDO EMANUEL TEIXEIRA FRAGA

julho de 2024

**DESIGN POR OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA/DESIGN
GENERATIVO: DESENVOLVIMENTO DE
COMPONENTES PARA APLICAÇÃO EM
AUTOCARROS**

Ricardo Emanuel Teixeira Fraga

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Gestão Industrial**

Orientador: Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Júri:

Presidente:

Professor Doutor Luís Miguel Pereira Durão, Professor Coordenador, ISEP

Vogais:

Professor Doutor Daniel do Espírito Santo Rodrigues, Professor Auxiliar Convidado,
Universidade de Aveiro

Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, Professor Adjunto, ISEP

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família que sempre me apoiou nos bons e nos maus momentos, durante a realização desta dissertação

Agradecimentos

Quero agradecer à minha mulher por todo o apoio que me deu, nos bons momentos e nas dificuldades, esteve sempre do meu lado para me suportar e acalmar.

Agradecer também aos meus pais, à minha irmã, ao meu cunhado e às minhas afilhadas, por me terem apoiado e dado dicas quando mais precisava, para que conseguisse seguir o caminho certo.

Agradecer também ao Eng. João Pinho que me deu a ideia deste tema, que me orientou durante todo este trabalho e com quem pude trocar muitos pontos de vista, que me levaram a bom porto. Da mesma forma agradeço ao Eng. Arnaldo Pinto, o meu orientador, que me deu pontos de vista fundamentais para tratar da forma mais apropriada toda a informação relativa ao tema deste trabalho.

Agradecer também ao meu colega João Ferreira, por ter impresso uma das peças em estudo e por ter feito uma análise de custos importante para comparações.

Por último, mas não menos importante, agradecer à minha entidade patronal, CaetanoBus, por toda a informação disponibilizada para a elaboração desta dissertação.

Resumo

Um dos grandes objetivos da CaetanoBus, é a redução da massa dos seus autocarros urbanos, de forma a aumentar a lotação e minimizar o consumo. Para isso, basta analisar todas as peças não estruturais e tentar reduzir a sua massa, sem afetar a rigidez. Mecanismos como o *design* generativo e a otimização topológica podem ser utilizados para esse propósito. Foi efetuado um estudo a quatro componentes existentes num autocarro, que consistiu na aplicação do *design* generativo e da otimização topológica, com o objetivo de perceber se é possível uma redução de massa sem o comprometimento da rigidez, se ambas as ferramentas são vantajosas quando comparadas com os processos de fabrico tradicionais e se os custos inerentes à implementação destes processos na fabricação/obtenção das peças são muito elevados. A análise foi efetuada recorrendo ao software *Fusion360*, que permite a preparação dos modelos CAD, para que possam ser analisados. Uma vez obtidos todos os resultados, foi possível comprovar que existe uma redução de massa considerável, contudo, nem todas as peças cumpriram o objetivo definido inicialmente que era uma redução de pelo menos 40% da massa inicial. Em média, o *design* generativo permitiu uma redução de massa na ordem dos 49,7% e a otimização topológica na ordem dos 30,6%, valores bastante positivos e que dão a entender que o *design* generativo consegue ser mais eficaz. Todavia não nos podemos restringir apenas à massa, é igualmente relevante analisar os custos de produção dos componentes de formas maioritariamente orgânicas, criados pelas ferramentas em análise. Nesse campo, e depois de feita a simulação a duas das quatro peças analisadas, verificou-se também uma redução significativa de preço, o que torna estes novos processos de fabrico bastante vantajosos.

Palavras-chave: *Design* generativo, otimização topológica, autocarros, fabrico aditivo, redução de massa, rigidez

Abstract

One of CaetanoBus' main objectives is to reduce the mass of its urban buses, in order to increase capacity and minimize consumption. To do this, it's important to analyse all the non-structural parts and try to reduce their mass without affecting rigidity. Mechanisms such as generative design and topological optimisation can be used for this purpose. A study was carried out on four existing bus components, consisting of the application of generative design and topological optimisation, with the aim of finding out if a reduction in mass can, in fact, be achieved without compromising rigidity, if the two tools are advantageous when compared to traditional manufacturing processes and if the costs of the parts obtained using these processes are very high. The analysis was carried out using Fusion360 software, which allows CAD models to be prepared so that they can be analysed. Once all the results had been obtained, it was possible to see that there was a considerable reduction in mass, however, some parts didn't fulfill the objective of reducing the initial mass by at least 40 per cent. On average, generative design enabled a mass reduction of around 49.7% and topological optimisation of around 30.6%, which are very positive values and suggest that generative design can be more effective. However, it's not just about mass, it's important to evaluate the production costs of the components created by the tools being analysed, which are mostly organic in shape. In this field, and after simulating two of the four parts, there was also a significant reduction in price, which makes these new manufacturing processes very advantageous.

KEYWORDS: Generative design, topological optimization, diagonal trays, windscreen wiper support, ticketing base, battery holder, additive manufacturing, injection molding

Índice

1. Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	3
1.4. Estrutura	3
1.5. Apresentação do local da realização dos estudos	3
2. Revisão Bibliográfica	7
2.1. <i>Design</i> Generativo	7
2.1.1. História	7
2.1.2. Explicação do método e variantes	8
2.1.3. Áreas de utilização	19
2.1.4. Vantagens e Desvantagens	21
2.2. Otimização Topológica	22
2.2.1. História	22
2.2.2. Explicação do método e variantes	22
2.2.3. Áreas de utilização	34
2.2.4. Vantagens e desvantagens	35
2.3. Do <i>design</i> à realidade	35
3. Métodos e Aplicação	41
3.1. Diagonal dos Tabuleiros	41
3.1.1. <i>Design</i> Generativo	41
3.1.2. Otimização Topológica	44
3.2. Suporte Limpa Para-Brisas	45
3.2.1. <i>Design</i> Generativo	46
3.2.2. Otimização Topológica	48
3.3. Base de Bilhética	49
3.3.1. <i>Design</i> Generativo	50
3.3.2. Otimização Topológica	53
3.4. Base de Bateria	54
3.4.1. <i>Design</i> Generativo	54
3.4.2. Otimização topológica	56
4. Resultados e Discussão	59
4.1. Diagonal dos Tabuleiros	61
4.1.1. Resultados <i>Design</i> Generativo	61
4.1.2. Resultados Otimização Topológica	68
4.2. Suporte Limpa Para-brisas	69

4.2.1. Resultados <i>Design</i> Generativo	69
4.2.2. Resultados Otimização Topológica	73
4.3. Base de Bilhética	74
4.3.1. Resultados <i>Design</i> Generativo	74
4.3.2. Resultados Otimização Topológica	78
4.4. Caixa de Bateria.....	79
4.4.1. Resultados <i>Design</i> Generativo	79
4.4.2. Resultados Otimização topológica	81
5. Conclusão	83
5.1. Conclusões finais	83
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	85

Lista de Figuras

Figura 1 - Autocarro urbano CaetanoBus	2
Figura 2 - Processo do design generativo [6].....	8
Figura 3 - Processo de implementação do design generativo [6].....	10
Figura 4 - Representação do espaço de soluções [6]	10
Figura 5 – Criação de designs recorrendo a folhas de cálculo [6].....	11
Figura 6 - Frame original [16].....	11
Figura 7 - Soluções obtidas pelo método de design generativo [16]	12
Figura 8 – Balancins (1: amortecedor, 2: estrutura do balancim, 3: push rod, 4: caixa de rolamentos, 5: pull rod, 6: anilhas)	13
Figura 9 - Esquema de aplicação do design generativo na fase de otimização [14]	13
Figura 10 - Comparação das diferentes malhas internas do modelo, consoante as cargas/tensões aplicadas [14].....	14
Figura 11 - Esquema de aplicação do design generativo na fase de concessão e de otimização [14].....	14
Figura 12 - Data-driven + design generativo – método [15]	16
Figura 13 - Modelo genético de um MP3 [6]	17
Figura 14 - Fenótipos MP3 [6]	17
Figura 15 - Processo Sf-GDT [3]	19
Figura 16 - Objetivos e restrições a usar maRS Innovation District	20
Figura 17 - Soluções de otimização criadas.....	20
Figura 18 - Estrutura de apoio inicial [19]	23
Figura 19 - Estrutura de apoio final	23
Figura 20 - Manivela inicial.....	24
Figura 21 – Limites da peça	24
Figura 22 - Estrutura gerada.....	25
Figura 23 - Estrutura refinada.....	25
Figura 24 - Análise FEM peça original	25
Figura 25 - Análise FEM peça otimizada.....	25
Figura 26 - Peça otimizada aplicada.....	26
Figura 27 - Treliça em estrela	27
Figura 28 - Treliça em “cavalo negro”	27
Figura 29 - Treliça em X.....	27
Figura 30 - Modelo topológico: a) exterior; b) interior.....	27
Figura 31 - Placa fria.....	29
Figura 32 - Processo iterativo do modelo de otimização topológica.....	30
Figura 33 - Caminho do fluxo.....	30
Figura 34 – Gráfico de velocidade do fluxo	31
Figura 35 - Gráfico de temperatura do fluxo.....	31
Figura 36 - Modelo 3D da placa fria.....	31
Figura 37 - Canal de fluxo em S (tradicional).....	32

Figura 38 - Processo de otimização do nariz do A380	34
Figura 39 - Suporte motor	36
Figura 40 - Forças presentes e pontos de fixação.....	36
Figura 41 - Definição de pontos funcionais e limites da peça	36
Figura 42 - Processo evolutivo do design.....	37
Figura 43 - Processo Design Generativo com manufatura [14].....	37
Figura 44 - Zonas economicamente viáveis para a aplicação do design generativo e utilização de processos de manufatura aditiva [14]	38
Figura 45 - Posicionamento Diagonal Tabuleiros	41
Figura 46 - Diagonal atual.....	42
Figura 47 - Furações a preservar	42
Figura 48 - Obstáculos da peça.....	43
Figura 49 - Área de ação do parafuso e da ferramenta	43
Figura 50 - Modelo final a ser convergido.....	44
Figura 51 - Modelo para otimização topológica	45
Figura 52 - Posicionamento Suporte Limpa Para-Brisas	45
Figura 53 - Áreas a preservar.....	46
Figura 54 - Zonas preservadas do suporte limpa vidros	46
Figura 55 - Obstáculos suporte limpa vidros	47
Figura 56 - Definição parafuso e ferramenta	47
Figura 57 - Modelo final do suporte	48
Figura 58 - Modelo para otimização topológica	49
Figura 59 - Posicionamento Base Bilhética.....	49
Figura 60 - Base aperto bilhética	50
Figura 61 - Conjunto base bilhética explodido	50
Figura 62 - Geometrias de obstáculo: a) exterior superior; b) exterior inferior; c) interior	51
Figura 63 - Offset criado para definir furações.....	51
Figura 64 - Zonas preservadas	51
Figura 65 - Representação porca de rebitar	52
Figura 66 - Cargas e zonas de fixação	52
Figura 67 - Modelo para otimização topológica	53
Figura 68 - Caixa bateria adicional.....	54
Figura 69 - Base bateria	54
Figura 70 - Zonas preservadas: a) furos fixação; b) "slots" de amarração; c) passagem cablagem principal.....	55
Figura 71 - Obstáculos iniciais	55
Figura 72 - Espaço para baterias.....	55
Figura 73 - Obstáculo do conector da base de baterias	56
Figura 74 - Modelo final para estudo sem representação das baterias.....	56
Figura 75 - Modelo para otimização topológica	57
Figura 76 - Resultados modelo diagonal convergido.....	61
Figura 77 - Soluções da diagonal com massa inferior a 116 g.....	62
Figura 78 - Seleção resultados diagonal.....	62

Figura 79 - Propriedades resultados diagonal	63
Figura 80 – Diagonal resultado 3: simulação 1	64
Figura 81 - Diagonal resultado 3: primeira alteração	64
Figura 82 - Diagonal resultado 3: simulação 2.....	65
Figura 83 - Diagonal resultado 3: segunda alteração.....	65
Figura 84 - Diagonal resultado 3 - simulação 3.....	66
Figura 85 – Diagonal resultado 15: simulação 1	66
Figura 86 - Diagonal resultado 15: primeira alteração	67
Figura 87 - Diagonal resultado 15: simulação 2.....	67
Figura 88 - Modelo final diagonal dos tabuleiros	68
Figura 89 – Diagonal otimização topológica modelo gerado e final.....	68
Figura 90 - Zonas soldadas da diagonal	69
Figura 91 - Diagonal resultados simulação otimização topológica	69
Figura 92 - Resultados modelo suporte limpa para-brisas convergido	70
Figura 93 - Propriedades resultados suporte limpa para-brisas.....	71
Figura 94 – Suporte limpa para-brisas resultado 26: simulação 1.....	72
Figura 95 - Suporte limpa para-brisas ramificação peça principal - fixação.....	72
Figura 96 - Novo modelo suporte limpa para-brisas	73
Figura 97 - Suporte limpa para-brisas modelo gerado e final	73
Figura 98 - Suporte limpa para-brisas validação otimização topológica.....	74
Figura 99 - Designs base bilhética gerados	75
Figura 100 - Propriedades resultados base bilhética	76
Figura 101 - Tipos de porcas.....	77
Figura 102 - Base bilhética antes da alteração e depois da mesma	77
Figura 103 – Base bilhética resultados simulação 1	77
Figura 104 - Modelo final obtido para a base bilhética	78
Figura 105 - Base bilhética modelo gerado e final.....	78
Figura 106 - Resultado simulação otimização base bilhética	79
Figura 107 - Designs caixa bateria gerados	80
Figura 108 - Design final da caixa de baterias	81
Figura 109 - Modelo inicial otimização topológica base baterias.....	82
Figura 110 - Modelo final otimização topológica base baterias.....	82

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 - Exemplos de peças a estudar</i>	5
<i>Tabela 2 - Etapas de implementação do design generativo [6]</i>	9
<i>Tabela 3 - Comparação das propriedades mecânicas entre os 2 tipos de frames [16]</i>	12
Tabela 4 - Comparação propriedades peça original vs otimizada	26
Tabela 5 - Resultados da simulação	28
Tabela 6 - Processos de manufatura aditiva	39
Tabela 7 - Características da diagonal.....	42
Tabela 8 – Características do suporte	46
Tabela 9 – Características da base bilhética	50
Tabela 10 – Características da base de baterias.....	54
Tabela 11 - Propriedades dos materiais em estudo	60
Tabela 12 – Síntese dos melhores resultados da peça diagonal	84
Tabela 13 – Síntese dos melhores resultados da peça suporte limpa para-brisas.....	84
Tabela 14 – Síntese dos melhores resultados da peça base bilhética	84
Tabela 15 – Síntese dos melhores resultados da peça base baterias	84

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ABS	<i>Acrilonitrila butadieno estireno</i>
ASA	<i>Acrilonitrila Estireno Acrilato</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho assistido por computador)
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método por Elementos Finitos)
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i>
PA	<i>Phased Array</i> (Matriz Faseada)
PA	<i>Poliamida</i>
P.Porto	Politécnico do Porto
SIMP	<i>Solid Isotropic Material with Penalty</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>

1. Introdução

Este capítulo serve de apresentação ao tema em estudo, explicando os pressupostos a partir dos quais o trabalho foi realizado, as razões que fundamentam a realização deste estudo e quais os objetivos a alcançar. Serve, de igual forma, para apresentar a estrutura do relatório.

1.1. Contextualização

Atualmente, os diversos mercados apresentam-se cada vez mais saturados e competitivos. A esta realidade juntamos a crescente exigência dos clientes, obrigando a que as diversas organizações evoluam e inovem, com o intuito de vencerem a concorrência. Esta busca pela inovação é feita numa época e num mundo onde tudo existe, tornando-se difícil agradar os clientes finais.

Mercados como o automóvel, tentam, diariamente, satisfazer os seus clientes, optando por novos materiais e processos que forneçam maior durabilidade, ergonomia e qualidade aos seus produtos, ao menor custo possível [1]. As diversas organizações, veem-se, então, obrigadas a encontrar e desenvolver as melhores soluções para os seus produtos que cumpram os requisitos funcionais e não funcionais estabelecidos pelos clientes. Estes desenvolvimentos exigem tempo e passam por um vasto e moroso processo iterativo, para que todo o espaço de soluções seja analisado e a solução final seja obtida.

Com o aparecimento da indústria 4.0, a produção industrial sofreu uma profunda revolução. Esta mudança permitiu a fusão entre a internet e as tecnologias orientadas para o futuro (máquinas e produtos mais inteligentes), aparecendo sistemas cada vez mais modulares e eficientes, onde os produtos são capazes de controlar o seu próprio processo de fabrico, possibilitando assim a obtenção de produtos individuais em lotes únicos e economicamente favoráveis, quando comparados à produção em massa [2]. Esta revolução permite que o processo iterativo referido no parágrafo anterior, seja feito de uma maneira mais expedita e económica, uma vez que há um avanço da inteligência artificial e das simulações e técnicas de *design* e otimização [3][4].

Um dos primordiais objetivos do *design* generativo e da otimização topológica, é encontrar a solução mais adequada para um determinado fim, poupando tempo, material e dinheiro, criando estruturas eficientes, utilizando o método de produção mais adequado. Martin Pollák e Jozef Török, descrevem eficazmente aquilo que é o *design* generativo, “The process, combined with the performance of digital computers, which can handle a large number of possible solution permutations, allows *designers* to create and test entirely new capabilities

Introdução

that go beyond manufactures capabilities, leading to the most efficient and optimized *design*" [5].

No mercado automóvel, mais especificamente na indústria produtora de autocarros urbanos, a utilização destes dois métodos pode ter um impacto bastante positivo para a modernização, bem como para os custos e resolução de determinados problemas.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem o intuito de explorar mais afincadamente dois métodos de *design* recentes, nomeadamente, o *design* generativo e a otimização topológica, que cada vez mais ganham a sua posição com o crescimento da indústria 4.0, explorando os benefícios que podem trazer tanto para a indústria automóvel como para as equipas de desenvolvimento, ao nível de custos e tempo.

Assim, com o estudo apresentado neste relatório, pretende-se responder, numa primeira fase, às seguintes questões:

- Em que consistem e em que se baseiam os métodos de *design* generativo e otimização topológica?
- Quais as suas vantagens e desvantagens?
- Como se podem inserir na indústria automóvel e quais os ganhos?

Numa fase mais avançada do trabalho, serão colocados em prática os dois métodos de fabrico, melhorando/evoluindo peças de autocarro já existentes, com o primordial objetivo de comparar os processos tradicionais com estes novos processos, esclarecendo as seguintes questões:

- Será que tanto o *design* generativo como a otimização topológica conseguem diminuir a massa, mantendo/aumentando a rigidez das peças definidas para o estudo?
- Estas ferramentas fornecem alguma vantagem comparativamente aos processos tradicionais?
- Os custos associados são muito significativos?

Pontos como a massa, os custos associados ao fabrico, as propriedades mecânicas, os materiais usados e a funcionalidade, serão comparados para perceber quão vantajoso seria aplicar estes dois métodos na indústria automóvel, mais concretamente, na indústria de produção de autocarros urbanos, como o da Figura 1.



Figura 1 - Autocarro urbano CaetanoBus

1.3. Metodologia

A elaboração deste trabalho segue a seguinte metodologia:

- Pesquisar variados artigos sobre o tema;
- Analisar os artigos que mais se enquadram no pretendido;
- Retirar as informações mais relevantes;
- Redigir a revisão bibliográfica com o intuito de enquadrar o leitor, numa primeira fase, com o tema;
- Aplicar as duas ferramentas em peças não estruturais usadas na indústria de fabricação de carroçarias de autocarros urbanos;
- Simular e verificar a viabilidade dos *designs* obtidos;
- Comparar e comentar os demais resultados;
- Elaborar as considerações finais.

1.4. Estrutura

A estrutura do presente relatório assenta em cinco partes. Primeiramente a introdução, onde o leitor entra em contacto com o tema do trabalho e aquilo que é esperado do mesmo, de seguida, uma revisão bibliográfica, onde serão esmiuçados livros/artigos que possuam desenvolvimentos técnicos e científicos sobre o tema em estudo, enquadrando o leitor. Neste capítulo, para uma melhor perceção dos temas, serão explicados alguns casos de estudo de aplicação dos dois métodos.

Posteriormente, será abordado um terceiro capítulo, o início da parte prática, onde se explicará o funcionamento dos dois processos de fabrico em análise, seguido de um quarto que apresenta todos os resultados obtidos. O relatório termina com uma conclusão que visa o comentário crítico de todos os resultados e pontos fortes do *design* generativo e da otimização topológica.

1.5. Apresentação do local da realização dos estudos

Este trabalho será desenvolvido no Instituto Superior de Engenharia do Porto, situado na cidade do Porto, com o auxílio da empresa CaetanoBus, Fabricação de Carroçarias SA, situada na cidade de Vila Nova de Gaia, que irá facultar toda a informação necessária, relativa aos componentes que serão alvo de estudo.

A CaetanoBus é uma empresa do Grupo Salvador Caetano, que se dedica à fabricação de autocarros desde 1946. Começou a produzir as primeiras carroçarias em madeira e, em 1955, passou à construção metálica, conseguindo, rapidamente, atingir o mercado internacional. É uma empresa que sempre acompanhou a evolução dos tempos, apresentando na sua gama de modelos veículos elétricos e a hidrogénio (sendo líder neste segmento). Atualmente, a marca

Introdução

Caetano aliou-se à Toyota, ganhando poder e visibilidade num mercado competitivo. Com este apoio, a marca começou a ganhar a sua independência, passando a produzir o seu próprio chassis. Para que tudo isto fosse possível, a empresa teve de ser sempre fiel à sua missão, visão e aos seus valores:

- Missão – “Trabalhamos para proporcionar aos nossos clientes soluções mais seguras e sustentáveis, através de produtos diferenciadores.”
- Visão – “As nossas Pessoas, em colaboração com os nossos Clientes e Parceiros, trabalham para desenvolver soluções inovadoras para que seja possível encontrar um e.Caetano e um e.Cobus em todo o mundo. A nossa motivação é liderar o mercado pela experiência, pela tecnologia e com uma enorme paixão por aquilo que fazemos.”
- Valores – “Os valores da CaetanoBus assentam no que somos e no que desejamos ser, na história construída por Salvador Caetano e no futuro que sonhamos:

com tolerância...respeito

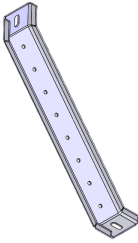
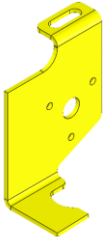
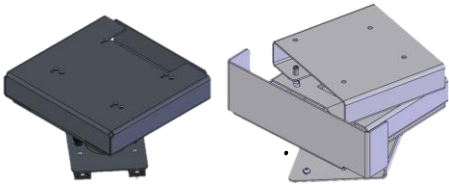
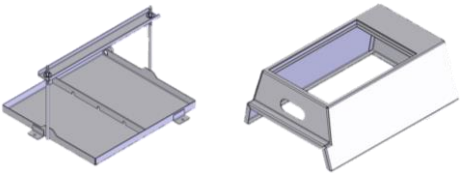
rigor...cooperação

tradição...inovação

qualidade e...sempre orientados para o nosso cliente.”

Para que a CaetanoBus continue a competir no mercado em que está inserida, tem de estar em constante evolução e, para isso, tem de se conseguir distinguir dos demais carroçadores, tentando criar veículos mais leves, com novos materiais e métodos de fabrico diferenciados, que permitam uma redução de preço no produto final e, desta forma, cativar a atenção de vários compradores, oferecendo um veículo com uma excelente relação qualidade-preço. Para tal, pretende-se aplicar os métodos de *design* generativo e otimização topológica em variadas peças de autocarro, apresentadas na Tabela 1, com o objetivo de perceber os potenciais benefícios das ferramentas em estudo para esta indústria.

Tabela 1 - Exemplos de peças a estudar

<p data-bbox="443 338 687 371">Diagonal Tabuleiros</p> 	<p data-bbox="938 338 1257 371">Suporte Limpa Para-brisas</p> 
<p data-bbox="480 712 651 745">Base Bilhética</p> 	<p data-bbox="1023 712 1177 745">Base Bateria</p> 

O processo de seleção das peças teve em conta a massa, uma vez que, atualmente, uma das grandes batalhas por parte das empresas carroçadoras é a diminuição do peso total dos veículos, sendo possível, desta forma, adicionar mais passageiros. A geometria das peças é outro ponto passível de ser melhorado, uma vez que a mesma nem sempre é a mais apelativa em peças visíveis, dificultando, igualmente, a montagem.

Introdução

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo fundamental, enquadrar o tema da dissertação, onde, através da análise minuciosa de vários artigos, será criada uma definição mais aprofundada daquilo que é o *design* generativo e a otimização topológica, sendo possível obter todos os pressupostos afetos aos dois métodos e necessários para a realização do capítulo seguinte.

2.1. *Design* Generativo

Atualmente, o *design* de produtos complexos, obriga a que os profissionais afetos a essa área tenham de analisar múltiplas alternativas até encontrarem a ideal. Essas alternativas são normalmente avaliadas no papel e nunca com o recurso a sistemas CAD. Aliás, o CAD apenas aparece na equação durante a fase da implementação e análise, depois de esgotar todas as restantes hipóteses. Mas, conseguirá o CAD auxiliar os *designers* nesta tarefa morosa e difícil que é a escolha da solução ideal [6]?

A resposta é “sim” e é aqui que entra o *design* generativo. O poder que os sistemas CAD possuem atualmente e a forma como as diversas ferramentas de *design* estão a evoluir, com processos como a modelação sólida, ferramentas de análise de performance, prototipagem rápida, entre outros, encorajam os *designers* a explorar novas formas, mais radicais, fazendo com que os mesmos se interessem mais pelas ferramentas de desenho generativo [7][8].

Com o objetivo de explorar o vasto espaço de soluções viáveis de uma forma expedita, utilizando restrições de propriedades e performance, dependendo da finalidade, o *design* generativo guia o *designer* de uma forma mais fácil.

De uma forma resumida, e como será possível ver mais à frente neste trabalho, o *design* generativo é um termo que engloba várias tecnologias, capazes de modelar progressivamente um determinado produto [9].

2.1.1. História

Este método, conforme o conhecemos nos dias que correm, surgiu na década de 70 pela mão de John Frazer, um arquiteto inglês. Numa primeira fase, não passou de algo teórico, uma vez que os seus métodos de implementação nunca foram disponibilizados. Contudo, em 1989, devido ao interesse crescente tanto por profissionais como por escolas de arquitetura, e ao aparecimento das ferramentas paramétricas CAD, as empresas criadoras destas mesmas ferramentas, aprofundaram os estudos sobre desenho generativo, aliando a teoria já existente aos seus produtos, e definiram os métodos corretos, dando origem a uma variedade de soluções de *design* generativo.

Atualmente, o *design* generativo, pode ser encontrado/aplicado em várias áreas como a automóvel, a aeroespacial, na medicina e na construção, sendo esta última, alvo de constantes estudos [6] [10] [11].

2.1.2. Explicação do método e variantes

O *design* de produtos é um processo complicado, onde se chega à forma final de um produto após várias fases morosas e complexas [3]. É com o intuito de simplificar estas fases, auxiliando o *designer* a explorar o espaço de soluções de uma forma mais rápida e eficiente, poupando em material e tempo, que nasce o *design* generativo [5][12].

O *design* generativo é uma metodologia de criação de um grande número de *designs* de forma automática e iterativa através de algoritmos e respeitando certos parâmetros e restrições definidos pelo *designer*. O objetivo desta ferramenta não é apresentar a solução ótima, mas sim, vários *designs* iniciais para que, posteriormente, o *designer* possa escolher o que mais se adequa, conforme se pode verificar na Figura 2 [12].

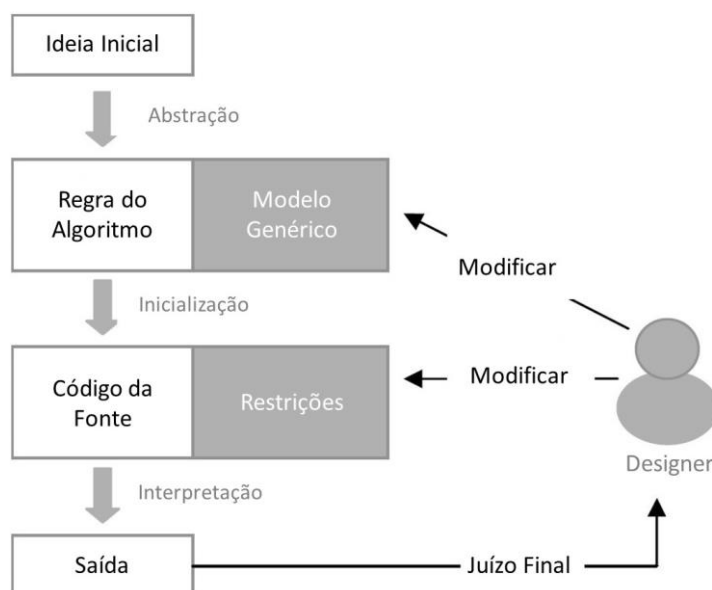


Figura 2 - Processo do design generativo [6]

Muitos autores citam uma frase escrita por K. Shea, R. Aish e M. Gourtovaia, que retrata bem o propósito desta ferramenta *“generative design systems are aimed at creating new design processes that produce spatially novel yet efficient and buildable designs through exploitation of current computing and manufacturing capabilities.”* [8].

A utilização deste processo de *design*, faz do computador um parceiro que, de acordo com os requisitos funcionais, parâmetros, restrições e características técnicas definidos pelo *designer*, gera ideias e soluções que vão além daquilo que a mente humana consegue alcançar e que os tradicionais métodos de fabrico conseguem executar, sendo possível obter soluções inovadoras e complexas, mudando totalmente a forma como o *design* é feito. Os requisitos funcionais acima

expressos, são as especificações geométricas e funcionais que o produto em estudo tem que satisfazer [5] [8] [13].

Um sistema generativo pode ser dividido, de uma forma muito generalista, em 3 fases [3]:

- Transformação dos *sketch's* 2D num modelo CAD tridimensional (3D);
- Definição das várias restrições e propriedades;
- Geração de múltiplas soluções otimizadas.

De uma forma mais aprofundada, o método aqui retratado, para ser implementado, tem de possuir, obrigatoriamente, um elemento que crie soluções viáveis (sistema especializado) e outro que avalie a viabilidade dessas soluções (sistema de otimização) [14]. A Tabela 2 e a Figura 3, indicam, de uma forma detalhada, as diferentes etapas de implementação do *design* generativo.

Tabela 2 - Etapas de implementação do *design* generativo [6]

Etapas	Descrição
1 – Criação do modelo genético	Criação inicial do modelo paramétrico CAD, onde são definidos os parâmetros e os seus valores iniciais.
2 – Definição do espaço de soluções	Definição dos valores máximos e mínimos para cada parâmetro, por forma a limitar o espaço de soluções ¹ (definição do genótipo ²).
3 – Geração de <i>designs</i>	Geração de diversos <i>designs</i> , por parte do software CAD, com base nos parâmetros e limites definidos previamente.
4 – Filtrar os fenótipos ³	Análise da viabilidade das soluções obtidas, por parte do software, filtrando todas os fenótipos cuja construção possua algum modo de falha.
5 – Seleção e otimização	Seleção e comparação dos <i>designs</i> mais favoráveis e otimização dos mesmos, se necessário através de uma análise mais detalhada do espaço referente à solução escolhida e da alteração dos limites impostos.

¹ De frisar que este método permite que os limites definidos inicialmente, possam ser alterados em qualquer fase do processo, uma vez que durante o processo o conhecimento do espaço torna-se maior.

² Entenda-se genótipo como as várias restrições que podem ser aplicadas no modelo, como as restrições de geometria, de manufatura, de custo, entre outras, que permitem reduzir o espaço de soluções, no fundo, as propriedades requeridas [10].

³ Entenda-se fenótipo como as características observáveis [10].

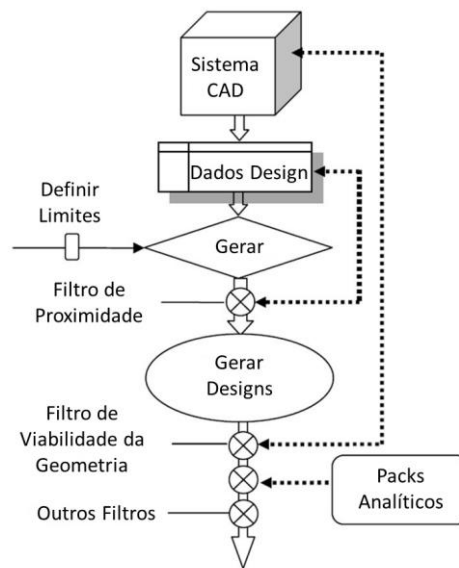


Figura 3 - Processo de implementação do design generativo [6]

Na Figura 4, pode ser observado um espaço de soluções, após serem aplicadas as devidas restrições.

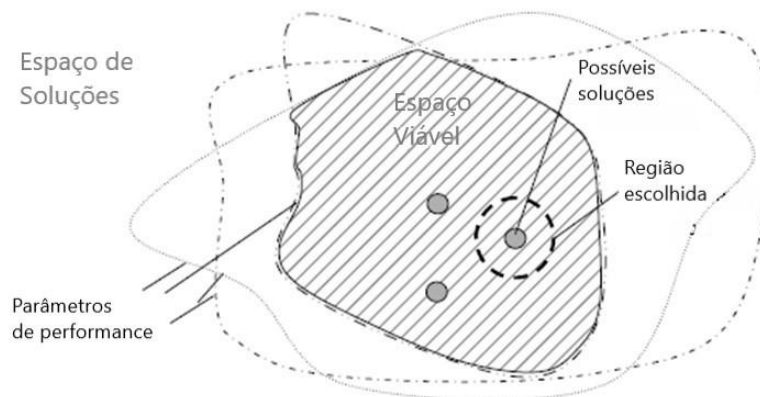


Figura 4 - Representação do espaço de soluções [6]

Esmiuçando um pouco mais as fases acima apresentadas, no que toca ao modelo genético, o mesmo é a representação da família de objetos que partilham as mesmas restrições, mas que possuem diferentes geometrias e, como tal, necessita de ser bem estruturado para que seja obtido um maior número de soluções. De frisar que parâmetros/restrições em excesso, prejudicam o objetivo final, sendo obtido um reduzido espaço de soluções. No que toca ao espaço de soluções, os valores mínimos e máximos são definidos, para evitar que o software gaste toda a sua memória/poder de computação a “explorar” soluções que não são viáveis. Esta definição é inicialmente feita com base na experiência do *designer* e, como dito anteriormente, à medida que o processo vai avançando, pode ser alterada em qualquer etapa [6] [15].

Depois das duas fases iniciais, entra a criação de *designs*. Esta criação pode ser feita recorrendo a simples folhas de cálculo, como Excel, conforme se pode verificar na Figura 5 ou utilizando funções matemáticas presentes em software CAD. Nesta fase, através de um filtro específico, são

eliminados todos os *designs* que possuam uma forma geométrica idêntica, garantindo, desta forma, a diversidade de soluções. Posteriormente são filtrados os fenótipos escolhidos, ou seja, o espaço de soluções pode ser reajustado com maior precisão automaticamente por parte do software CAD, adicionando, apagando ou até mesmo alterando as restrições/parâmetros previamente definidos, para que seja criado um espaço de soluções mais robusto [6].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Design Table for: table																		
2		D1@Sketch6	breath@Sketch2	D1@Front Delta	D1@Right Delta	D1@Sketch3	D2@Sketch3	D3@Sketch3	D4@Sketch3	D4@Sketch4	D1@Sketch4	D2@Sketch4	D2@Sketch5	D4@Sketch5	D1@Sketch5		Weight kg	Center of g. cm	
3	Default	26.7	50.0	20.0	20.0	24.7	14.1	11.1	13.8	18.9	26.2	28.3	8.9	17.0	54.7				
4																			
5	Max.Val	32.0	60.0	24.0	24.0	29.6	17.0	13.3	16.5	22.6	31.4	33.9	10.7	20.3	65.6		50	30	
6	Min.Val	21.3	40.0	16.0	16.0	19.7	11.3	8.9	11.0	15.1	20.9	22.6	7.1	13.6	43.7		20	10	
7																			
8	Design 1	28	47	21	21	23	16	11	15	16	29	27	10	20	64		45	25	
9	Design 2	24	51	24	22	27	16	11	16	16	28	29	8	19	46		42	32	
10	Design 3	27	58	23	21	28	12	12	12	18	31	33	10	15	56		56	23	
11	Design 4	22	60	18	23	27	13	10	13	16	21	25	10	19	45		39	27	
12	Design 5	31	48	21	21	28	13	11	14	19	31	24	8	18	52		47	22	
13																			
14																			

Figura 5 – Criação de designs recorrendo a folhas de cálculo [6]

Por fim, depois de identificadas os *designs* candidatos, todo o universo de soluções, pode ser analisado ao detalhe.

Através de um caso de estudo realizado por Shayaan Ahmed e Manoj Kumar Gupta, onde foi aplicado o método de *design* generativo ao frame de uma moto, é possível entender de uma forma mais prática o método em estudo neste capítulo. A ideia era criar um *design* alternativo para o frame de uma Ducati Monster 900. Tudo começou pelo desenho do esqueleto inicial, tendo como base o frame original apresentado na Figura 6 e tendo em consideração os diferentes pontos de fixação [16].



Figura 6 - Frame original [16]

Definiram-se todos os parâmetros e restrições, para que o espaço de soluções fosse definido [16]:

- Cargas aplicadas, em diferentes pontos do quadro, com base no peso médio dos condutores (75 Kg);

Revisão Bibliográfica

- Rigidez das molas de suspensão;
- Comprimento, altura e largura do quadro;
- Força aplicada pelos travões;
- Materiais a usar.

Neste caso, foi usado como material de adição um filamento de 0,6 mm de diâmetro de Titânio.

Depois de definido o espaço de soluções, o software gerou os diferentes *designs*, apresentados na Figura 7.

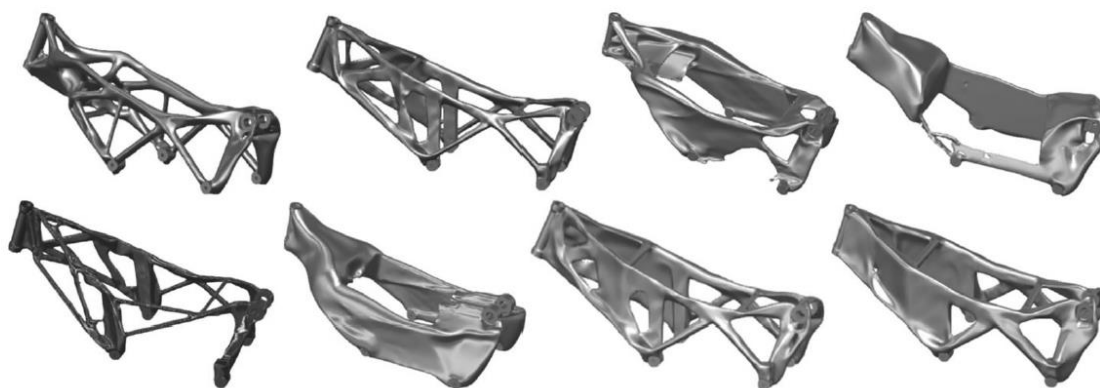


Figura 7 - Soluções obtidas pelo método de design generativo [16]

No final, foi feita a comparação entre a estrutura original e a estrutura obtida por *design* generativo, para perceber as vantagens deste método. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação das propriedades mecânicas entre os 2 tipos de frames [16]

Propriedades	Frame	Frame obtido por Design
	Original	Generativo
Massa (Kg)	30,608 Kg	20,111 Kg
Deslocamento (max.)	22,14 mm	1,227 mm
Tensão de Von-Mises (max.)	14113 MPa	8716 MPa
Deformação equivalente (max.)	0,1799	0,2213
Quantidade de material usado	960 g, 28,94 m	588 g, 17,72 m

Deste modo, podemos verificar as vantagens que o design generativo traz para a indústria, pois conseguimos obter peças mais leves, mais resistentes e com um menor gasto de material.

Outro estudo, realizado por Tamás Markovits e Bence Szederkényi, aplica também o método do *design* generativo para o desenvolvimento de novos balancins, representados na Figura 8, para um carro de fórmula *student*.

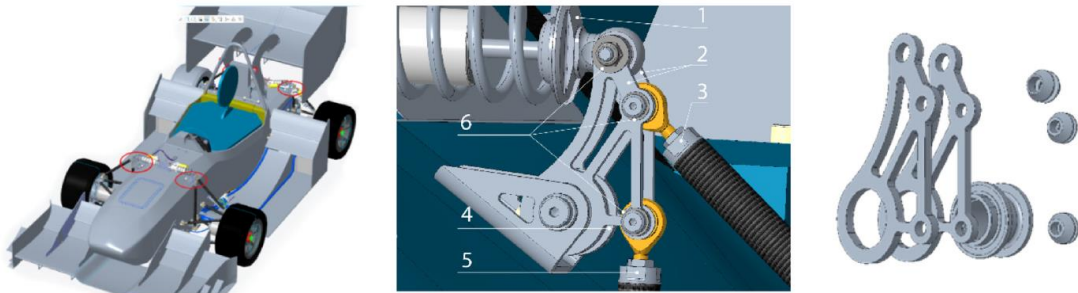


Figura 8 – Balancins (1: amortecedor, 2: estrutura do balancim, 3: push rod, 4: caixa de rolamentos, 5: pull rod, 6: anilhas)

Até agora, o *design* generativo foi apresentado como ferramenta de apoio ao *designer* em todo o processo de desenvolvimento, contudo, é importante referir que este método pode ser implementado em fases específicas do desenvolvimento, ou seja, pode ser aplicado apenas na fase de criação, servindo como gatilho para a inspiração do *designer*, pois nem todas as ideias são tidas em conta, ou pode ser aplicado na fase de otimização, ficando a parte da criação das soluções ao encargo do *designer*. Em dois estudos realizados por Martin Leary, onde o *design* generativo foi aplicado na área da medicina para a elaboração de implantes, é possível entender as diferenças entre aplicar o método numa fase inicial ou numa fase mais avançada do *design*.

O primeiro estudo, como se pode verificar pelas Figura 9, aplica o *design* generativo na fase de detalhe/otimização para a criação de um implante para o fémur, onde o sistema representa o osso em questão como um modelo numérico, que será comparado com uma série de implantes já classificados e testados, com objetivo de encontrar aqueles que tenham propriedades mecânicas e físicas semelhantes às do osso original. Uma vez encontrado o *design* que mais se assemelha ao pretendido, o mesmo é testado, validado e dá-se a criação do modelo para posterior aplicação com as respetivas otimizações.

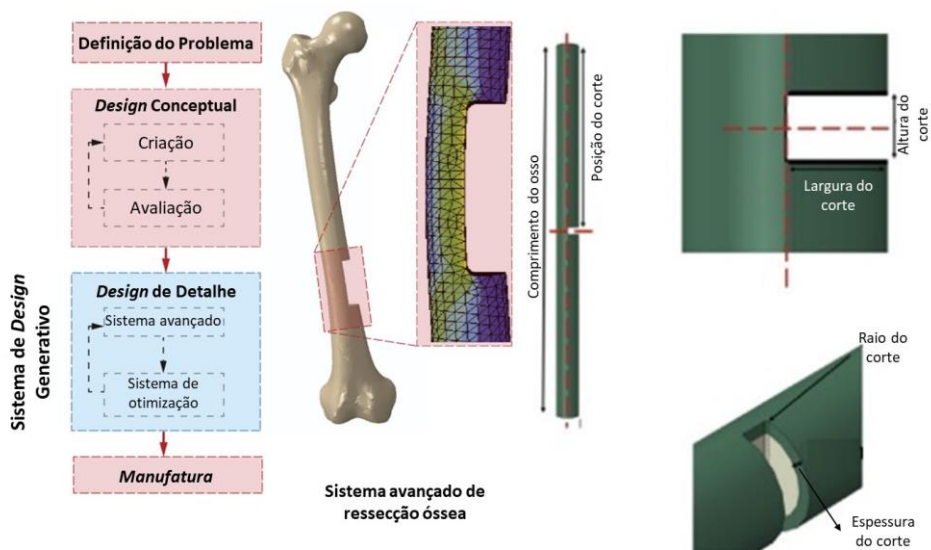


Figura 9 - Esquema de aplicação do design generativo na fase de otimização [14]

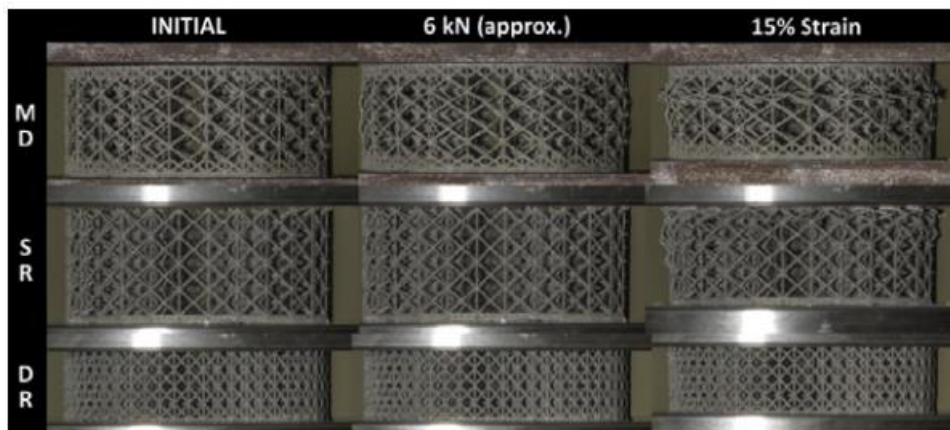


Figura 10 - Comparação das diferentes malhas internas do modelo, consoante as cargas/tensões aplicadas [14]

O segundo estudo, pelo contrário, aplica o *design* generativo na fase de conceção, para a criação de implantes, como se pode verificar na Figura 11. O método é aplicado logo na fase inicial, para que sejam criadas diversas soluções, com base nos parâmetros iniciais fornecidos, como as diferentes respostas mecânicas e físicas dos implantes. Posteriormente, é aplicado o sistema de otimização, que irá garantir que os *designs* escolhidos são passíveis de ser produzidos por processos de manufatura aditiva. Este caso mostra, também, a possibilidade de utilizar o *design* generativo tanto na fase de concessão como na fase de otimização, com o intuito de adquirir soluções mais robustas.

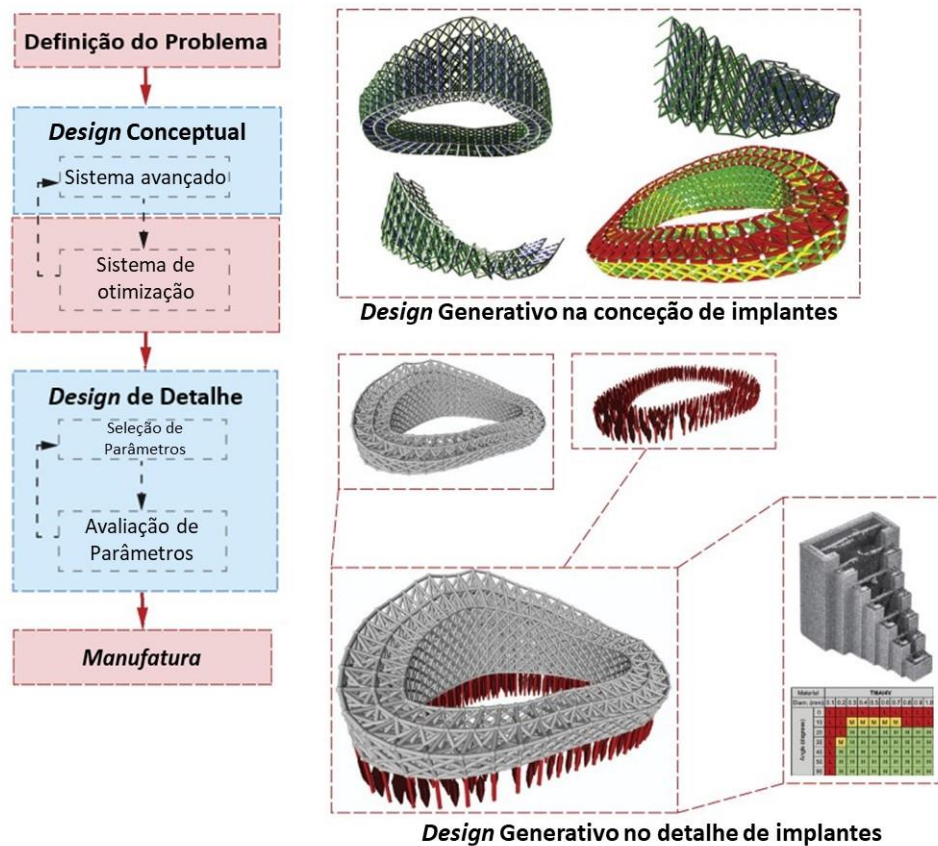


Figura 11 - Esquema de aplicação do design generativo na fase de concessão e de otimização [14]

É importante salientar que a aplicação do método na fase de conceção é sempre mais desafiante, uma vez que o processo é mais abstrato devido à criação de um vasto leque de soluções e pelo facto de os *designers* necessitarem de um certo nível de experiência para definirem os dados iniciais de *design*. No entanto, segundo Sivam Krish, a aplicação nesta fase é mais vantajosa, “*The ability to explore design variations at the early stages of design can produce far more beneficial results, than optimizing it within narrow means at the final stages of design*”, uma vez que permite poupar tempo ao *designer*, mostrando todo o espaço de soluções [6] [14]. Para além disso, a aplicação na fase de conceção é mais económica, pois os custos de implementação são mais baixos [14]. Contudo, num estudo realizado por Zhoumingju Jiang, Hui Wen, Fred Han, Yunlong Tang e Yi Xiong, através da junção do *design* generativo com o *data-driven* (uma base de dados inicial), é possível minimizar as dificuldades sentidas pelos *designers* na fase de conceção e aumentar a eficiência no *design* e a satisfação do consumidor final.

Como referido anteriormente de uma forma muito simplista, apesar de vantajosa a aplicação do método em estudo numa fase inicial do *design*, as dificuldades são mais sentidas sobre o *designer*. O mesmo não consegue perceber a 100% as verdadeiras necessidades de cada consumidor final, tornando-se difícil a utilização de tecnologias de produção mais avançadas. O *data-driven*, mais uma vez, alia-se ao *design* generativo para minimizar estas dificuldades e tem ganho o seu espaço no desenvolvimento de produtos como tornozeleiras, sapatilhas, chassis de veículos, entre outros [15].

O *data-driven* é, no fundo, uma base de dados que possui informações sobre aquilo que o utilizador do produto realmente necessita, como descrição do pretendido e o comportamento, dados de conceção e fabrico, informações de fim de serviço, dados de utilização do produto, feedback sobre produtos antigos, entre outros [15].

O método acima abordado está esquematicamente explicado na Figura 12, onde é possível verificar que, toda a informação recolhida e aglomerada (*data-driven*) irá auxiliar o *designer* e simplificar a utilização do *design* generativo.

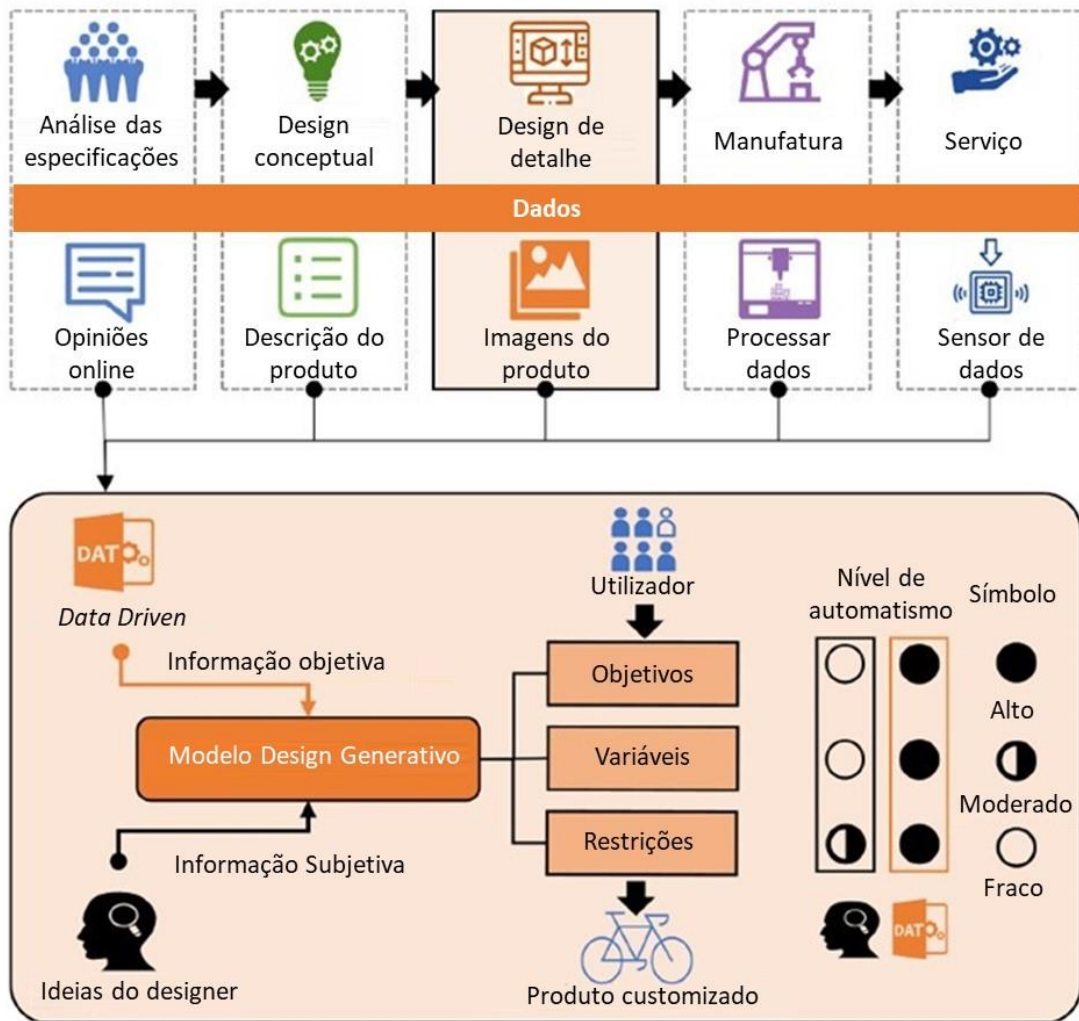


Figura 12 - Data-driven + design generativo – método [15]

Na Figura 13 e 14, apresentam um exemplo de aplicação do *design* generativo para a execução de um MP3, desde a fase de definição dos diferentes parâmetros e restrições, até à criação dos diferentes *designs* e posterior otimização.

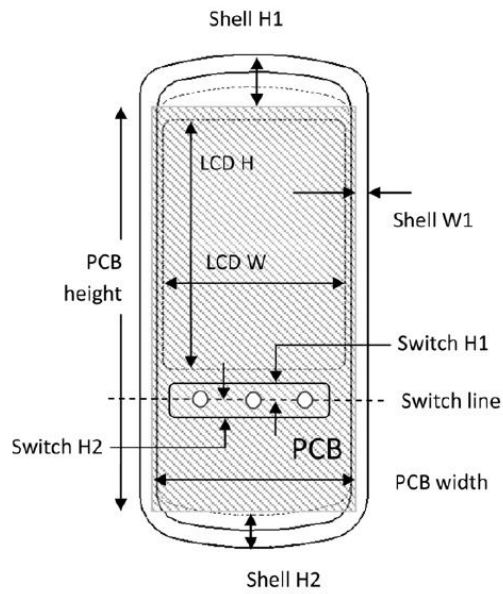


Figura 13 - Modelo genético de um MP3 [6]

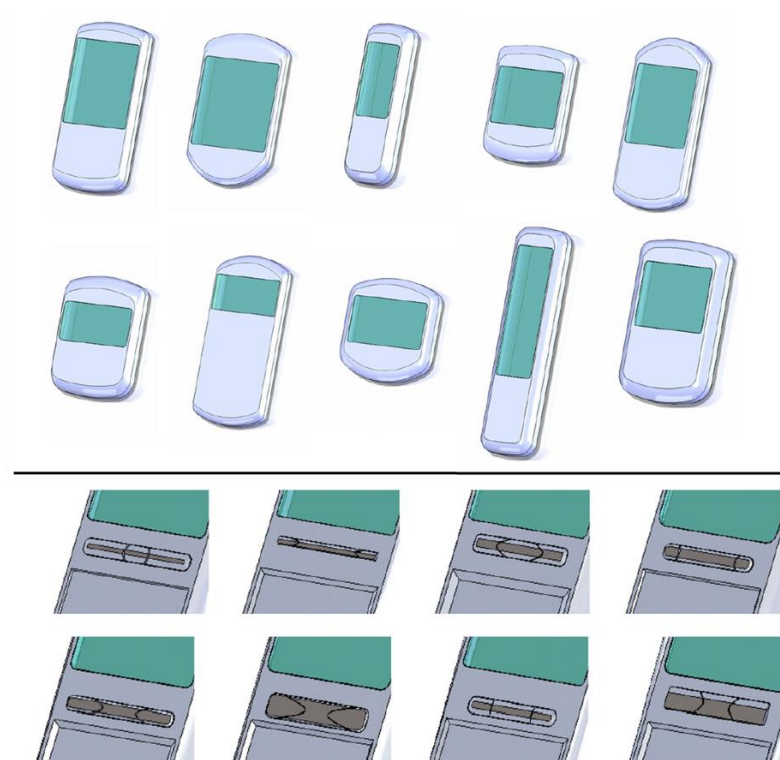


Figura 14 - Fenótipos MP3 [6]

Para além do método abordado neste trabalho, existem vários outros métodos de *design* generativo que foram criados para a resolução de problemas numa fase inicial, sendo o mais utilizado, a técnica baseada em algoritmos genéticos, como vamos ver de seguida.

- **“Genetic Algorithm Designer (GADES)”**

Através da definição de um fenótipo, baseado no espaço de desenho, e de um genótipo, baseado num espaço de soluções, o sistema evolui/cria formas a partir de “manchas” aleatórias que, posteriormente, através de um algoritmo genético multiobjectivo, evoluem para soluções mais completas [3] [10].

- **“Constraint based evolutionary decision support system”**

É um método de apoio à decisão evolutiva baseado em restrições, que usa algoritmos genéticos para tratar o processo de desenho como uma união de otimização de restrições e modelação, separando de uma forma estratégica as tarefas quantitativas (executadas pelo computador), das tarefas qualitativas (efetuadas pelo operador) [6].

- **“GENE_ARCH”**

Originalmente criado para a arquitetura, mas apto a resolver uma variedade de problemas afetos ao *design* numa fase inicial. Este método, comprova que o desempenho de um edifício pode ser aumentado, através da combinação entre esquemas paramétricos generativos e software de simulação térmica. Mais uma vez, através de algoritmos genéticos, permite a otimização dos critérios previamente definidos, através de variações ao nível dos sistemas térmicos e da iluminação [6].

- **“Shape Grammar”**

É um método de representação da geometria de uma forma generativa, através da incorporação da lógica geométrica. Este método, pode ser incorporado nos modelos CAD, contudo, tem vindo a perder cada vez mais a sua função, devido à complexidade cada vez mais acentuada dos modelos CAD e das suas linguagens, pois torna-se mais difícil desenvolver interfaces úteis [6].

- **Space-filling-GDT (Sf-GDT)**

Atualmente, uma vez que a área do *design* generativo é alvo de constantes estudos, com o propósito de evoluir e melhorar os métodos já existentes, outras técnicas vão aparecendo, como é o caso do Sf-GDT (*Space-filling-GDT*). Esta técnica altera a forma como se define o espaço de soluções para obter o *design* ideal de uma peça já existente, para uma determinada finalidade. No fundo, o principal objetivo é simplificar os atuais processos de obtenção do *design* ótimo, através da diminuição do número de restrições e parâmetros a definir. Sharoz Khan e Muhammad Junaid Awan, acreditam que o *design* generativo com base em algoritmos genéticos, exige que o *designer* tenha um certo nível de experiência para que a afinação dos parâmetros seja feita corretamente, *“However, the performance of the genetic algorithms extensively depends on the selection of tuning parameters and the proper tuning of these parameters requires an entirely different set of expertise, which most designers do not possess.”* [3].

Segundo esta técnica e conforme se pode verificar na Figura 15, um modelo CAD que se pretende melhorar, pode ser definido por “n” parâmetros de *design*, parâmetros esses que vão definir o espaço de soluções. Posteriormente, define-se a dimensão da população e o número de criações pretendidas. A partir deste ponto, entra em ação o Sf-GDT, criando uma população inicial de soluções. As subpopulações são igualmente analisadas para que convirjam com as soluções iniciais,

fazendo com que o espaço em análise apresente apenas as soluções ótimas, soluções essas que minimizam a função custo-objetivo [3].

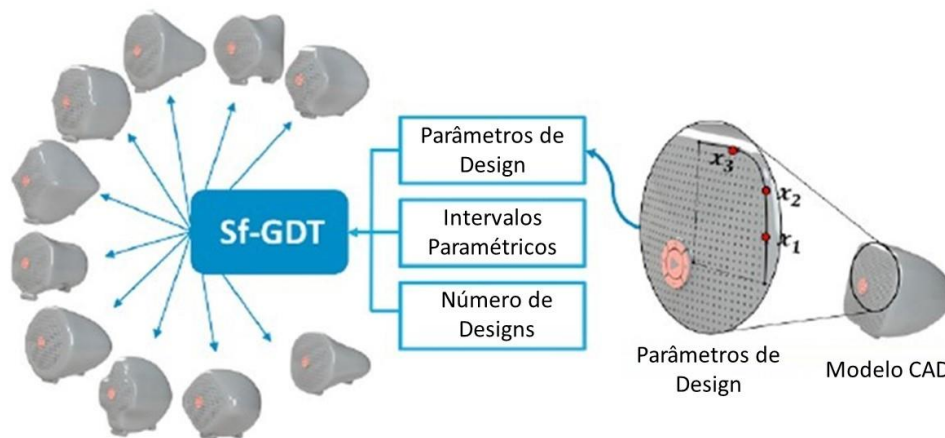


Figura 15 - Processo Sf-GDT [3]

O *design* generativo permite minimizar dois dos principais problemas afetos ao *design*, os problemas de rotina e os problemas resultantes do *design* criativo, sendo o segundo o mais difícil de contornar, uma vez que está relacionado com a complexidade que é atribuída aos objetivos pretendidos, objetivos esses que podem ser de natureza contraditória ou não quantificável, criando um vasto espaço de soluções [6]. Como exemplo, temos a estética. Esta irá sempre variar de *designer* para *designer*, uma vez que depende dos seus gostos.

2.1.3. Áreas de utilização

As técnicas de *design* generativo são essencialmente usadas para a criação de produtos em setores como o automóvel e o aeroespacial [12]. No entanto, pode ser aplicado em grandes projetos como edifícios ou escritórios, no setor da arquitetura. Neste caso, as variantes mais utilizadas do *design* generativo são o L-Systems e Shape Grammar [12]. Importante referir que o L-system é uma variação do Shape Grammar, orientada para problemas de *design* complexos como o planeamento de cidades [3].

Um exemplo de construção onde se recorreu ao *design* generativo, é o *maRS Innovation District* em Toronto [5] [12]. Tudo começa com a definição dos objetivos e das restrições para o espaço pretendido, como se pode observar na Figura 16 e, a partir daí, o software cria e avalia várias soluções de layout representadas na Figura 17 [5].



Figura 16 - Objetivos e restrições a usar maRS Innovation District

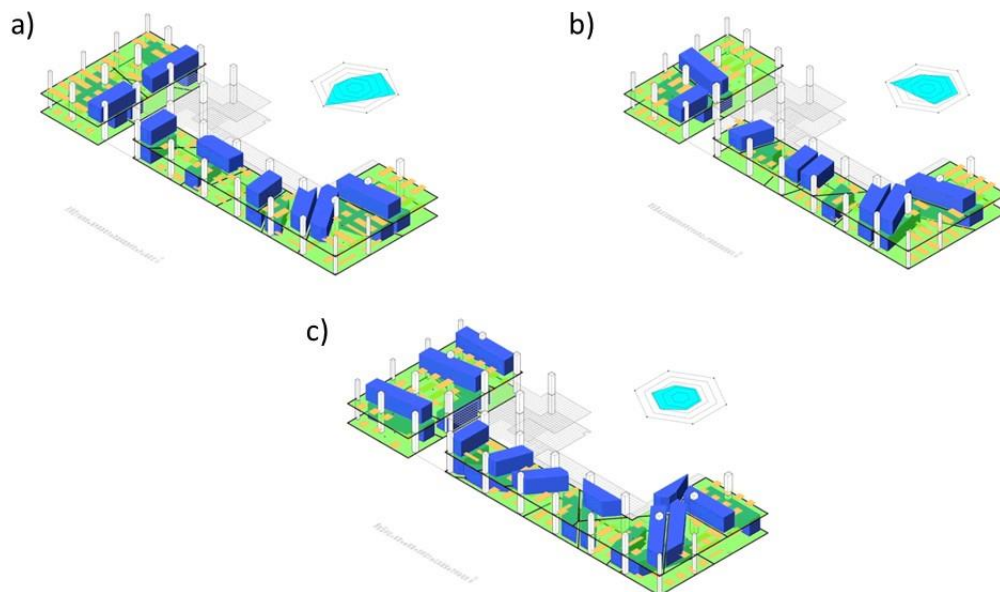


Figura 17 - Soluções de otimização criadas

Contudo, áreas como a medicina também usufruem, cada vez mais, das vantagens oferecidas pelo *design* generativo, maioritariamente para a produção de implantes, como se pode conferir num estudo realizado por Martin Leary [14].

2.1.4. Vantagens e Desvantagens

Como não poderia deixar de ser, qualquer método ou processo, tem as suas vantagens e desvantagens e ambas precisam de ser conhecidas na altura da tomada de decisão para executar uma determinada ideia.

Como vantagens o *design* generativo apresenta [5] [6]:

- Permite criar, avaliar e mostrar, em simultâneo, uma solução completa;
- Permite obter produtos mais leves;
- Produtos criados são mais adaptados ao cliente;
- Exige menos tempo de processo;
- Menor desperdício/gasto de material;
- Menor consumo de combustíveis fósseis e energia;
- Integração com softwares CAD, sendo um processo mais automatizado sem necessidade de utilizar mais do que uma plataforma;
- Representações gráficas dos *designs* fáceis de interpretar;
- Eficaz em fases iniciais de *design*;
- Possibilidade de analisar os *designs* durante a fase de desenvolvimento dos mesmos.

Como desvantagens, destacam-se [6]:

- Limitação do espaço de soluções, ou seja, um genótipo representa uma pequena fração do espaço;
- O método apenas explora as regiões do espaço limitadas pelo *designer*;
- Apesar da limitação do espaço para a sua redução, uma parte significativa das avaliações do produto obtido recai sobre o *designer*;
- É necessário um certo nível de experiência para desenvolver o método iterativo usado para criar o modelo genético;
- O espaço de soluções tem de ser definido ao detalhe, o que faz com que seja necessário um esforço extra;
- O preconceito do *designer* pode prejudicar a exploração do espaço de soluções;
- Os modelos genéticos não podem ser transferidos entre plataformas CAD, uma vez que a sua interpretação está dependente do modelo CAD inicial.

2.2. Otimização Topológica

A otimização topológica é uma ferramenta muito poderosa que, com recurso a software apropriado como o Abaqus, Altair, SolidThinking, entre outros, permite organizar o material de um determinado objeto no espaço, por forma a diminuir o seu peso e modificar a geometria, mantendo o desempenho da sua função [17] [18] [19]. Cria modelos com base na fusão, divisão e conceção de vazios num modelo “primário”, de zonas onde a carga aplicada é ínfima ou nula [9] [20]. Tudo isto, utilizando modelos matemáticos e análise por elementos finitos.

As transformações de parâmetros materiais no espaço têm, há muitos anos, ajudado a resolver problemas de engenharia, num reduzido espaço de tempo. Como tal, rapidamente se tornaram poderosas ferramentas, até porque, com a indústria 4.0, a conexão entre o mundo digital, físico e ciberfísico ganhou mais força [1].

Como referido no ponto 2.1 deste trabalho, o *design* generativo é visto como um conjunto de tecnologias capazes de modelar progressivamente no espaço um determinado produto [9]. Desse conjunto de tecnologias, faz parte a otimização topológica, que vai ser abordada nesta parte do trabalho.

2.2.1. História

Como refere o artigo publicado por Jun Wu, et al., a tecnologia de otimização topológica surgiu em 1988 quando publicada por Bendsoe e Kukichi, num artigo [18]. O trabalho publicado teve por base um modelo material, modelo esse homogénio e isotrópico, no qual foram introduzidos uma quantidade infinita de pequenos orifícios, dando origem a um material anisotrópico. Este material seria alvo de estudo quanto à sua distribuição ótima no espaço, capaz de suportar as cargas aplicadas e satisfazer outros requisitos de conceção. Para tal, foi utilizado o método da homogeneização numérica, para o cálculo das propriedades mecânicas efetivas do material anisotrópico [17][18].

Apesar desta tecnologia ter sido criada para a resolução de problemas mecânicos, rapidamente desenvolveu-se para outras áreas da física, como fluídos, acústica, entre outras, e novos métodos de abordagem foram surgindo [17].

2.2.2. Explicação do método e variantes

O método de otimização topológica aparece no mundo da engenharia como uma ferramenta capaz de solucionar um dos primordiais objetivos, para além da inovação, de maior parte das indústrias, que é a redução de material e, conseqüentemente, da massa do produto final. No mundo automóvel, esta redução aparece aliada aos consumos, ou seja, quanto mais leve o veículo, menos força o motor/bateria terá que exercer e, como tal, menor será o gasto de combustível/energia [19].

A otimização topológica mostra qual o melhor arranjo espacial de um determinado objeto, quando sujeito a cargas externas, que permita manter o desempenho do mesmo [17].

É possível explicar o tema principal deste ponto de uma forma muito prática, pegando no exemplo de uma viga. O modelo inicial pode ser visualizado na Figura 18, uma viga apoiada por uma estrutura inteira e sujeita a uma força uniformemente distribuída.

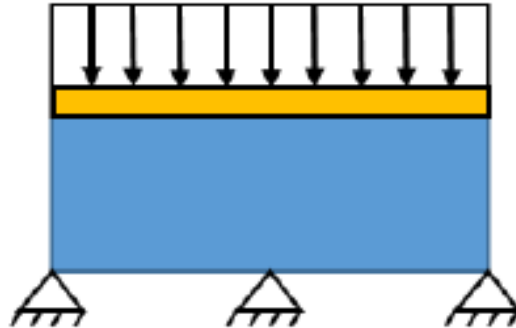


Figura 18 - Estrutura de apoio inicial [19]

Aquilo que se pretende, é determinar qual o melhor arranjo de material capaz de suportar a carga exercida sobre a viga. Posto isto, e passando o modelo para um software apropriado, o mesmo rearranja o material, dando origem ao modelo apresentado na Figura 19 [19].

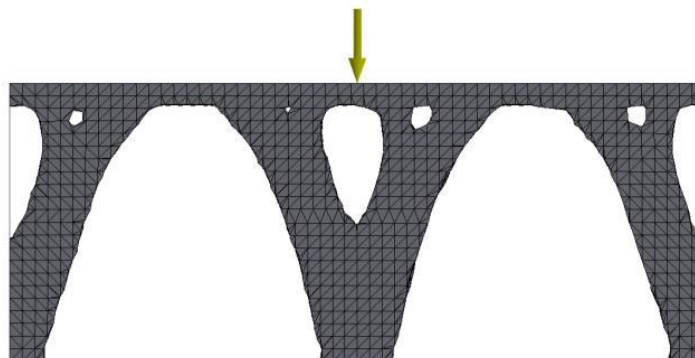


Figura 19 - Estrutura de apoio final

O exemplo apresentado acima é algo bastante simples, mas serve de ponto de partida para questões mais complexas. A otimização topológica pode ser utilizada para diversos estudos, até porque, possui vários tipos de abordagens como vamos ver mais à frente.

No ramo automóvel, este método pode ser utilizado para melhorar peças como uma manivela da suspensão de um formula *student*, como demonstrou Jakub Mesicek, et al., no seu artigo [19]. O objetivo passava por reduzir peso ao veículo e, para isso, tinha de se modificar o arranjo espacial de algumas peças. O autor partiu de um modelo inicial feito em aço, conforme se pode verificar na Figura 20.



Figura 20 - Manivela inicial

De seguida, foi definido o volume máximo que a peça poderia ocupar, ou seja, foram definidos os limites da peça, definição essa que se encontra representada na Figura 21.

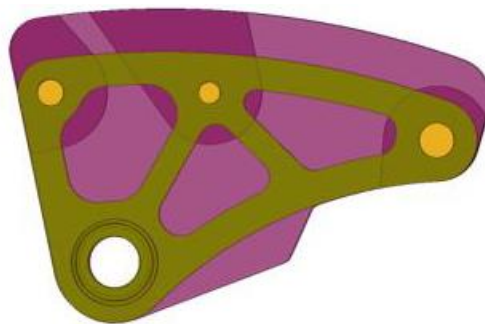


Figura 21 – Limites da peça

Uma vez definidos os limites, foram marcadas as zonas onde não se podia remover material, como as zonas de ligação da peça e, para além disso, foi indicado que tipo de furo era pretendido, para que o correto aperto da peça fosse garantido. É importante salientar que não é apenas a remoção de material que garante a diminuição de peso. Se aliarmos a este ponto a escolha do material correto, a probabilidade de atingir o objetivo final torna-se maior. Pegando no caso em estudo, foi definido um novo material e método de fabrico para a peça, neste caso, o autor optou por produzir a peça por um método de impressão 3D, escolhendo o Inconel 718 (liga de níquel-crómio) em pó como matéria-prima.

Posto isto, outros parâmetros fronteira como as forças aplicadas e a sua distribuição e os momentos, foram indicados e o software, apos várias iterações, gerou o modelo final (Figura 22) que, posteriormente, foi refinado para apresentar um melhor acabamento (Figura 23).

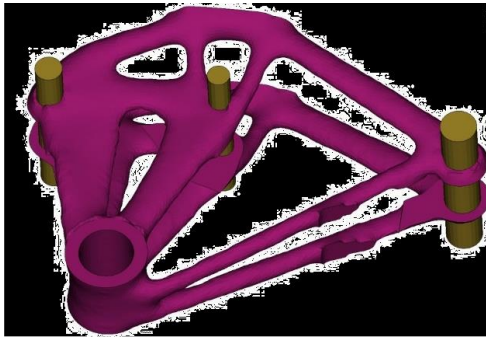


Figura 22 - Estrutura gerada



Figura 23 - Estrutura refinada

Para ser possível analisar as vantagens da utilização desta ferramenta, ambas as peças foram sujeitas a uma análise de tensões. Usando o FEM, verificou-se que a peça original teve uma alta concentração de tensões, tendo a máxima um valor de 650,5 MPa (Figura 24), enquanto que na peça otimizada, a tensão máxima era bastante inferior com um valor de 381,5 MPa (Figura 25).

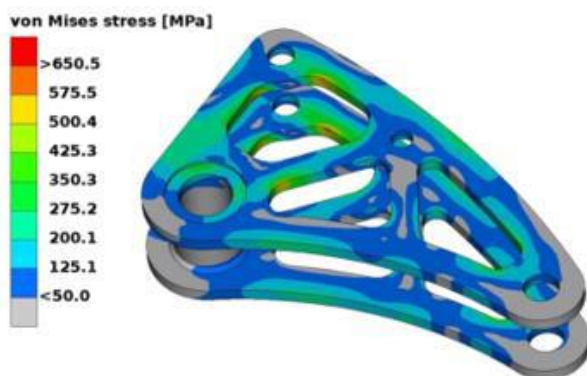


Figura 24 - Análise FEM peça original

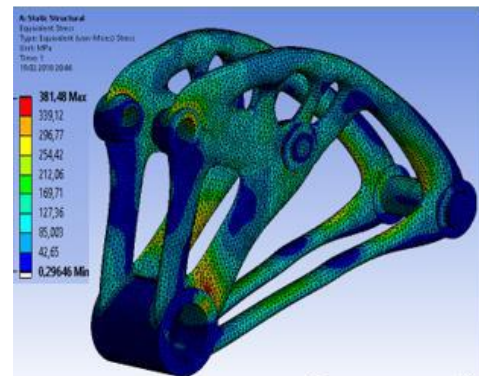


Figura 25 - Análise FEM peça otimizada

Os valores obtidos acima, provam que, para este caso, a otimização topológica é uma ferramenta bastante poderosa na obtenção de peças mais leves, com uma forma mais orgânica e capazes de manter o seu desempenho funcional. Para além do referido, outra vantagem desta ferramenta é o facto de dar origem a peças menos volumosas. Quer-se com isto dizer que as formas orgânicas dos designs finais, permitem criar peças menos volumosas e, conseqüentemente, um maior espaço livre na zona de aplicação do componente, conforme se pode observar na Figura 26.



Figura 26 - Peça otimizada aplicada

É importante salientar, também, a importância que a mudança de material teve no exemplo apresentado. Analisando a Tabela 4, retirada do artigo em questão, podemos verificar que houve uma diminuição de 7% no peso da peça e um aumento de 32% na sua rigidez.

Tabela 4 - Comparação propriedades peça original vs otimizada

Propriedades	Material	Peso	Tensão máxima	Deslocamento total	Aumento de rigidez
Peça original	Docol 700	134 g	650 MPa	0,25 mm	-
Peça otimizada	Inconel 718	125 g	381 MPa	0,17 mm	32%

É interessante perceber o grau de liberdade que esta ferramenta tem aquando da sua aplicação e o quão “polivalente” consegue ser. Com isto, pretende-se dizer que, a otimização topológica, pode ser usada em várias áreas e para os mais variados fins, ou seja, não entra em ação apenas para diminuir peso ou espaço, pode ser utilizada com o objetivo de reforçar a estrutura fabricada num determinado material.

A maneira mais simples de obter um material resistente será criar algo totalmente maciço. No entanto, e segundo Andriy Zdobytzkyi, et al., uma estrutura maciça aumenta a resistência de toda a peça, contudo, nos locais de maior concentração de tensões não existe um reforço correto [1]. Alterando o volume interno do cilindro utilizando treliças, é possível obter propriedades excepcionais que promovem o reforço das zonas com maior concentração de tensões.

Como é sabido, as estruturas em treliça são excelentes no que toca às suas propriedades, promovem leveza, uma boa dissipação de calor e, acima de tudo, uma grande resistência específica e rigidez, no entanto, dependendo do requisito funcional do material em estudo, é necessário escolher a estrutura mais apropriada [21]. É aqui que entra a otimização topológica.

Num estudo feito por Andriy Zdobytzkyi, et al. [1], foi analisado qual a melhor otimização da estrutura interna de um cilindro ($\varnothing 50 \times 50$ mm), tendo em conta parâmetros como o peso, rigidez e as cargas admissíveis.

Definindo, no software, os parâmetros desejados (uma estrutura com uma distância entre ramificações de 20 mm de comprimento e com uma espessura de 1,5 mm), o mesmo gerou três tipos de treliças para o cilindro: em estrela, em “cavalo negro” e em X, como se pode ver na Figura 27, 28 e 29. A designação “cavalo negro” vem da sua forma bastante irregular e comprimida, dando origem a uma estrutura muito escura, quase como uma crina de cavalo.

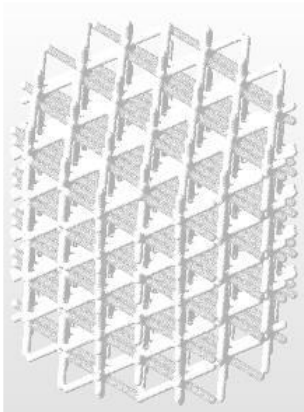


Figura 27 - Treliça em estrela

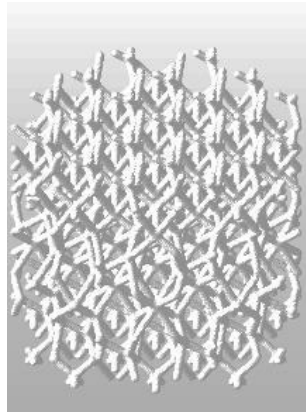


Figura 28 - Treliça em “cavalo negro”

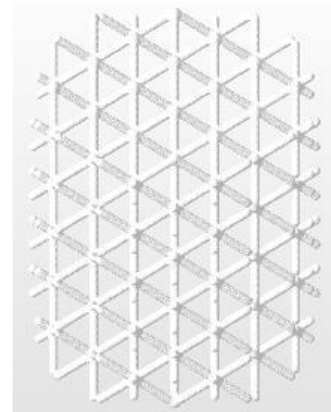


Figura 29 - Treliça em X

Foram, então, gerados os modelos topológicos da peça inicial (cilindro), com base nos três tipos de treliças, dando origem a cilindros em ABS, cujo interior era reforçado por uma estrutura em liga de Alumínio 6061 muito bem organizada, como se pode observar na Figura 30.

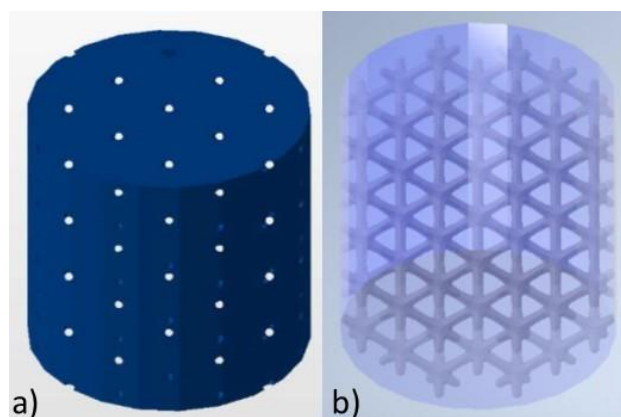


Figura 30 - Modelo topológico: a) exterior; b) interior

No final, os autores submeteram os três diferentes cilindros a uma simulação por análise de elementos finitos, aplicando uma força de 1000 N na superfície dos mesmos e compararam os resultados, escolhendo a estrutura mais apropriada. Os resultados encontram-se na Tabela 5, de onde os autores concluíram que uma estrutura em estrela, seria a escolha mais indicada.

Tabela 5 - Resultados da simulação

Propriedades	Treliças					
	X		Estrela		"Cavalo Negro"	
	Mín.	Max.	Mín.	Max.	Mín.	Max.
Tensão de Von Mises (MPa)	14,2	8020,5	3,2	33186,2	6,2	31466,9
Deslocamento (mm)	0	3,9	0	3,6	0	7,2

O exemplo acima descrito, mostra, mais uma vez, o poder que a otimização topológica tem no mundo da engenharia, é possível gerar estruturas automaticamente tendo em conta o volume que se pretende ocupar e as cargas que vão ser aplicadas. Contudo, e pelo que foi visto até ao momento, fica-se com a ideia de que a otimização topológica apenas é utilizada para melhorar estruturas e materiais, que o seu uso apenas faz sentido sob a alçada da mecânica, mas, estamos enganados. Como dito anteriormente, esta ferramenta pode ser aplicada em diversas áreas da engenharia, incluindo fluídos. Analisemos um estudo feito por Wei Wang, et al. [22], em torno do arrefecimento de uma antena PA.

Este tipo de antenas, durante o seu funcionamento, possuem uma densidade de fluxo de calor muito elevada, calor esse que tem de ser dissipado, para evitar o mau funcionamento do dispositivo. Usualmente, o arrefecimento deste tipo de dispositivos é feito a ar, no entanto, com o aumento da potência deste tipo de antenas, não basta apenas ar para um arrefecimento eficaz, é necessário utilizar sistemas mistos, ar + água/glicol ou apenas sistemas líquidos (maioritariamente utilizados atualmente), sendo que, para o sistema líquido, numa fase inicial, foi adotado um sistema com defletores do tipo S.

Contextualizando um pouco mais o estudo feito por Wei Wang, et al. [22], os sistemas de arrefecimento líquidos são compostos por uma placa fria, placa essa que influenciará o efeito da dissipação de calor, com base na forma do seu canal de fluxo, que pode ser do tipo S, L, *fintype*, entre outros. É na escolha da forma mais eficaz do canal de fluxo que a otimização topológica pode ser utilizada. Inicialmente, o operador, com base na experiência passada, define um perfil de fluxo geral e, posteriormente, utilizando um algoritmo de otimização, constrói o canal de fluxo.

A placa fria é um retângulo com comprimento (L) e largura (W), onde estão alojadas as fontes de calor. A fim de haver uma boa dissipação de calor e, tendo em conta a simetria das duas metades da peça, os autores decidiram utilizar a metade superior da placa como base para a

otimização topológica, e definiram as condições fronteira, como por exemplo, as entradas e saídas do sistema, conforme se pode verificar na Figura 31.

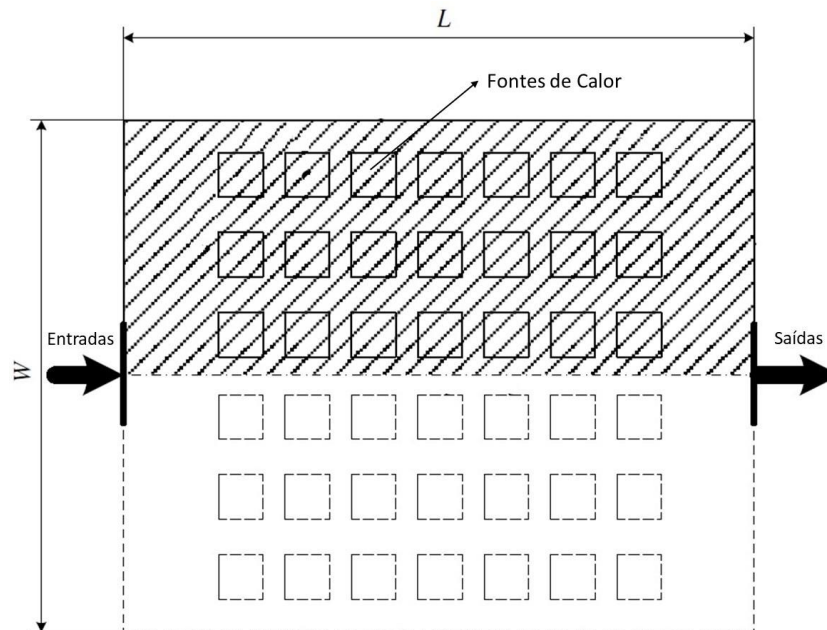


Figura 31 - Placa fria

Para ser obtida uma solução viável, os autores analisaram, através de diversos cálculos matemáticos, diversas propriedades ao nível do fluído de arrefecimento e das suas diversas fases, aplicando, também, condições fronteiras. Primeiramente, foi avaliado aquilo a que os autores chamam de “campo fluído”, que é composto pela sua densidade, a velocidade de entrada, a pressão, a viscosidade, entre outras, e definidas as condições fronteiras como a velocidade admissível à entrada e a pressão à saída.

Numa segunda fase, analisaram o “campo térmico”, onde, através de modelos matemáticos, foram controladas as condições de transferências de calor, que são uma combinação das equações de condução de calor (fase sólida) com as equações de convecção térmica do fluído (fase líquida). Mais uma vez, as condições fronteiras tiveram de ser definidas, onde a temperatura de entrada do fluído não varia e à saída, não existem trocas de calor.

Uma vez definidos os dois campos, o modelo de otimização topológica foi formulado, diferenciando as trocas entre a fase sólida e a fase líquida com a variável γ onde, $\gamma = 0$ representa a fase sólida e $\gamma = 1$ a fase líquida. Após vários cálculos, Wei Wang, et al. [22], alcançaram o chamado modelo de otimização da topologia de transferência de calor conjugado. O modelo referido entra, então, num processo iterativo até ser obtido um resultado convergente e, enquanto o mesmo não for convergente, as variáveis são atualizadas e é efetuada uma nova análise. Com a Figura 32 é possível entender de uma forma mais simples e pormenorizada este processo.

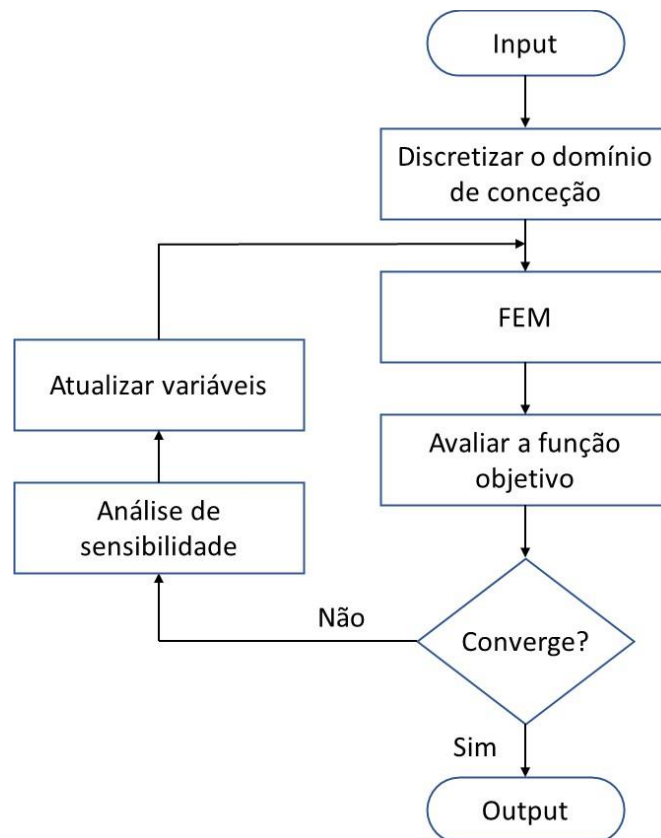


Figura 32 - Processo iterativo do modelo de otimização topológica

Sendo a função objetivo convergente, ficam identificados os parâmetros mais favoráveis para a realização da simulação. São então definidos os parâmetros dos materiais, tanto para a placa fria como para o líquido de arrefecimento, neste caso específico, alumínio e água, respetivamente. Posto isto, a respetiva simulação de otimização foi realizada sendo obtido o resultado presente na Figura 33.

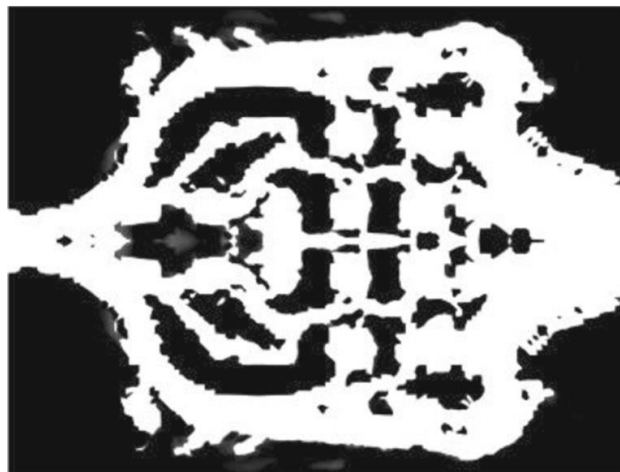


Figura 33 - Caminho do fluxo

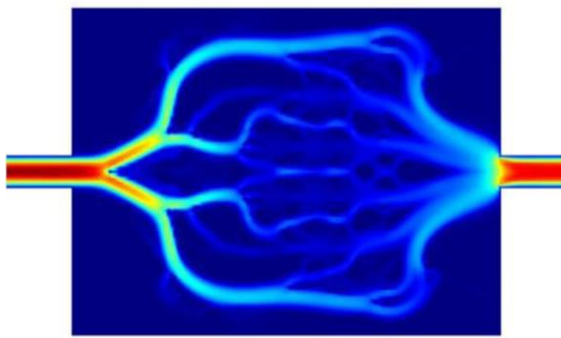


Figura 34 – Gráfico de velocidade do fluxo

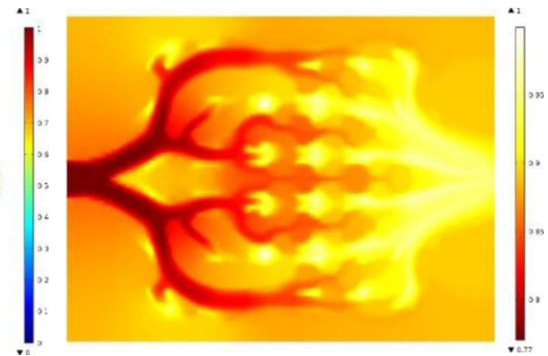


Figura 35 - Gráfico de temperatura do fluxo

Como se pode observar na Figura 34 e 35 o resultado da simulação respeita as barreiras inicialmente definidas.

No final do estudo, por otimização topológica, foi criado o modelo 3D da placa fria e das suas fontes de calor, com o correto caminho para o fluxo do fluído. Uma placa de alumínio com 132x100x12 mm, com fontes de calor de 6,7x6,7x2 mm, conforme se pode verificar na Figura 36.

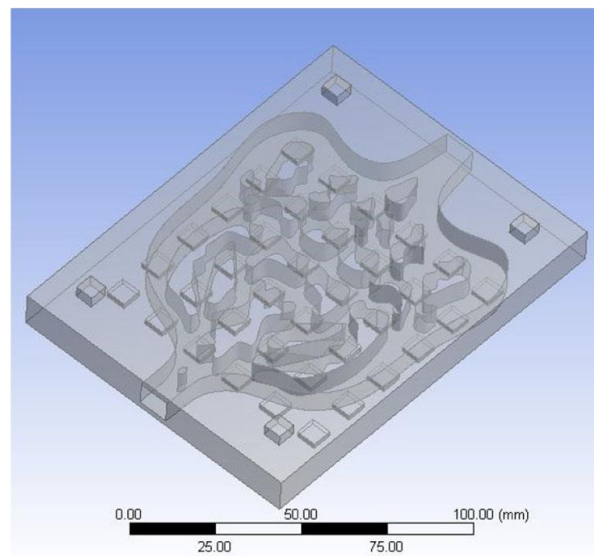


Figura 36 - Modelo 3D da placa fria

Comparando este tipo de canal de fluxo com o tradicional em S (Figura 37), chega-se à conclusão de que o otimizado é mais eficaz, uma vez que a temperatura máxima obtida neste sistema, é de 34,54 °C, quando comparada com os 47,12 °C obtidos no sistema tradicional.

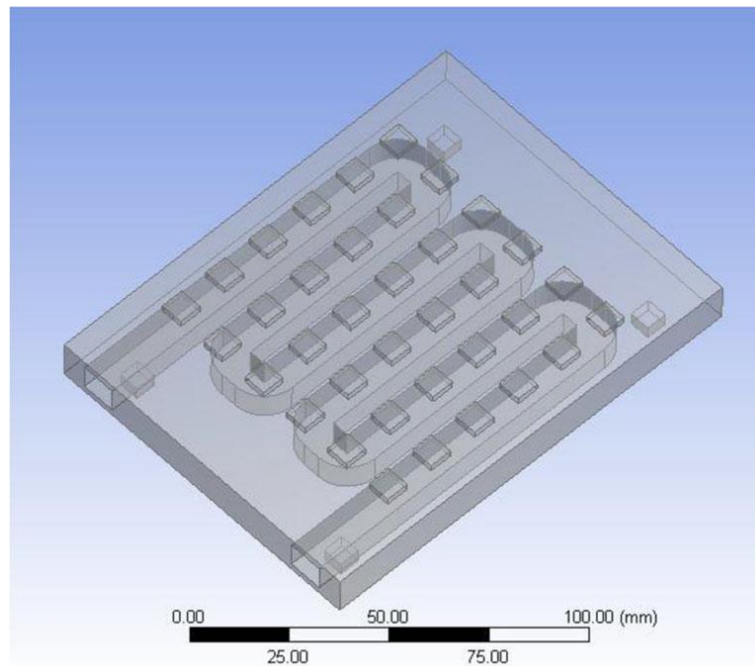


Figura 37 - Canal de fluxo em S (tradicional)

Como foi perceptível, a otimização topológica não só aparece no mundo do *design*, como também, no mundo analítico. No fundo, os problemas de otimização podem não ser só relativos à forma de um material, podem, igualmente, através de fórmulas, alcançar/otimizar determinados parâmetros que constituem um qualquer material. Como tal, e dependendo do tipo de problema que se pretende solucionar, existem vários caminhos para alcançar o objetivo final.

Começando pelo mais simples, quando o problema é ao nível de *design*, são utilizadas as chamadas abordagens Lagrangianas. Este tipo de abordagens trabalha através de CAD, sendo cada partícula acompanhada durante a sua trajetória, avaliando a evolução do sistema e como o mesmo se transforma [17].

Por outro lado, quando o problema é ao nível analítico, são utilizadas as chamadas abordagens Eulerianas, mais complexas. Estas definem uma determinada área do sistema e analisam o comportamento da mesma à medida que as partículas vão se movimentando. Esta abordagem pode-se subdividir em diversos caminhos:

- **Densidade ou SIMP**

Neste tipo de abordagem, resolvem-se problemas relacionando a variável densidade com as propriedades do material em estudo, utilizando a lei da potência, onde p é o parâmetro de penalização e E_0 é o módulo de *Young*, conforme podemos observar em (1) [17].

$$E(p_i) = g(p_i)E_0 = p_i^p E_0, \quad g(p_i) = p_i^p \quad (1)$$

O objetivo é encontrar a melhor distribuição de material que minimiza uma determinada função objetivo e encontrar o valor de p (variável densidade) que permita soluções convergentes para 0 (ausência de material num determinado ponto) ou 1 (presença de material num determinado ponto), tendo, obrigatoriamente, em conta restrições de volume [17] [20]. Para isso o problema é “relaxado” para permitir densidades intermédias durante a otimização e assume-se sempre que o material em estudo, é isotrópico e homogéneo [18].

- **Otimização Estrutural Evolutiva**

Este tipo de análise baseia-se na remoção lenta, de um qualquer material, dos elementos com tensões mais baixas. São permitidos, no máximo, dois materiais ligados, um macio e outro sólido. De uma forma mais pormenorizada, os espaços vazios são substituídos por um material macio (baixa densidade), sendo, posteriormente, executada uma análise de sensibilidade a ambos os materiais, para perceber qual o macio e o sólido. Posto isto, aplica-se a equação de interpolação aos elementos macios, para perceber se os mesmos são desprezáveis, podendo, assim, ser removidos, para isso, aplica-se a equação (2), onde E é o módulo de young do material em estudo e x é o elemento em análise:

$$E(x_i) = E_1 x_i^p \quad (2)$$

Se p tender para infinito, o material pode ser completamente removido [23].

- **Derivadas Topológicas**

O princípio desta abordagem passa por perceber como se comporta uma determinada derivada ao ser introduzido um furo infinitesimal num determinado material e, a partir daí, utilizar essa informação para a criação de novos furos e para a otimização das suas formas, tendo em conta os limites existentes [17].

Por detrás de toda a otimização, existem sempre diversos modelos matemáticos que convergem constantemente para uma solução de maximização ou minimização, dependendo da finalidade.

Para além de possuir vários tipos de abordagens, a otimização topológica pode ser usada para clarificar diferentes tipos de problemas de engenharia, sejam eles estáticos, dinâmicos ou termo elásticos. Relativamente aos problemas estáticos, esta ferramenta “trabalha” com base na energia de deslocamento de toda a estrutura, tendo como objetivo a sua minimização. No que diz respeito aos problemas dinâmicos, este método entra em ação para solucionar problemas que envolvam vibrações estruturais (maioritariamente na indústria automóvel), onde o objetivo é otimizar as frequências naturais. Quando o assunto são os problemas termo elásticos (indústria aeroespacial), o objetivo é alcançar uma solução de compromisso entre a conformidade estrutural mínima e a resistência máxima dos materiais em estudo [20].

Assim como no *design* generativo, uma das grandes dificuldades de utilizar este tipo de ferramentas é como produzir as peças por ela geradas, uma vez que, habitualmente, são criadas formas bastante orgânicas, incapazes de ser replicadas por processos de fabrico convencionais.

2.2.3. Áreas de utilização

Como foi referido anteriormente, o método da otimização topológica pode ser aplicado em diversas áreas da mecânica como na conceção de peças automóveis, aeronaves e em estruturas aeroespaciais, sempre com o objetivo de conceber estruturas leves, mas de elevado desempenho [20].

A primeira vez que a otimização topológica foi usada na indústria aeroespacial, foi para a construção de nervuras para o nariz de um avião A380, onde, utilizando estruturas em treliça e teia de cisalhamento e tendo em conta restrições de tensão, encurvadura e fabrico, foi possível diminuir 1000 kg à estrutura [20]. A Figura 38 mostra o processo de otimização utilizado neste projeto e o protótipo criado em alumínio.

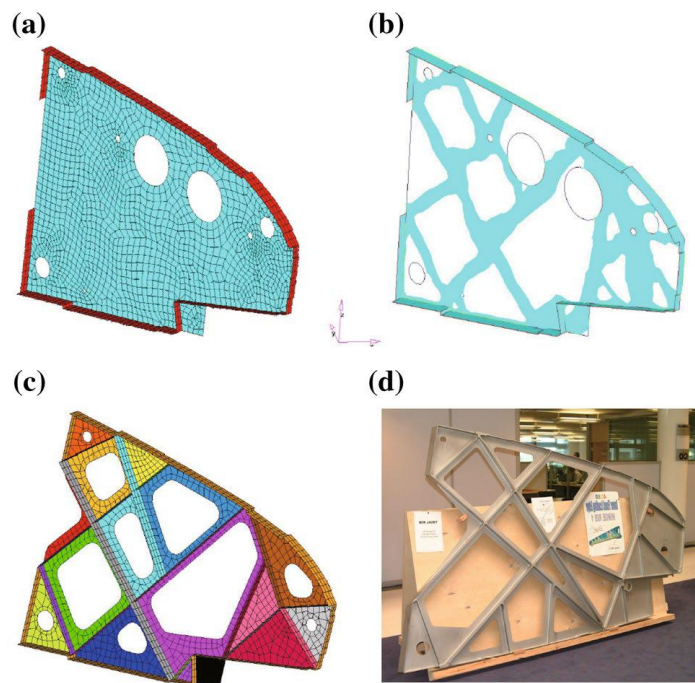


Figura 38 - Processo de otimização do nariz do A380

No entanto, esta poderosa ferramenta vai muito além da mecânica, podendo surgir noutras áreas.

O método estudado neste capítulo, pode ser útil para áreas que estudam a propagação de ondas, como por exemplo, para maximizar os intervalos de banda. A propagação de ondas num material, é caracterizada pelo diagrama de bandas. Se houver uma modelação periódica das propriedades do material, podem ser criados intervalos no diagrama de bandas. Para maximizar essas lacunas, pode ser usado um algoritmo de otimização [24]. Na conceção de aparelhos acústicos, é, também, comumente utilizada esta ferramenta, para definir a forma de um desmultiplexador acústico, ou seja, é possível definir a melhor forma para um desmultiplexador

acústico, com base nas frequências de onda. Os canais deste componente, são organizados de forma que cada frequência de onda, siga pelo canal correto, sem interferências [24].

A otimização topológica tem sido cada vez mais, uma ferramenta bastante avançada para diversas áreas de engenharia, uma delas, é a elétrica, mais concretamente, a eletromecânica.

Estas áreas, “aproveitam-se” da otimização topológica para melhorar elementos como ressonadores mecânicos, atuadores mecânicos e sensores mecânicos. Para tal, é necessário ter em conta as características de vibração dos ressonadores, as características de deslocamento dos atuadores e as características de deteção dos sensores. No caso dos ressonadores, o objetivo principal, passa por conseguir obter a forma ideal destes componentes, com o intuito de maximizar as amplitudes de vibração ao longo da direção de um determinado vetor de carga aplicado sobre o sistema. Quando o assunto são os atuadores, a otimização topológica entra em ação para melhorar uma estrutura capaz de se deformar numa direção previamente definida, funcionando como atuador, ou seja, a ideia passa por maximizar esta deslocamento, quando o componente é sujeito a um potencial elétrico [24].

Como foi possível verificar, existem outras áreas onde a otimização topológica pode ser aplicada, contudo, e para o interesse desta dissertação, o foco principal será na área da mecânica.

2.2.4. Vantagens e desvantagens

Seguindo a mesma ideia do *design* generativo, também a otimização topológica tem as suas vantagens e desvantagens e, para o interesse desta dissertação, é importante referi-las.

Como vantagens, e tendo em conta as diversas aproximações, podemos destacar [25]:

- É uma ferramenta bastante robusta para qualquer tipo de *design*;
- Eficiência computacional;
- As penalizações (relativamente ao método SIMP) podem ser ajustadas livremente;
- Simplicidade conceptual;

Como desvantagem, pode ser destacado [25]:

- As soluções dependem do grau de penalização (no caso do método SIMP);

2.3. Do *design* à realidade

Os *designs* criados pelos dois métodos abordados neste trabalho, possuem, maioritariamente, formas bastante complexas e orgânicas, tornando a sua execução difícil pelos tradicionais métodos de fabrico. Contudo, é possível a produção de peças pelos métodos tradicionais, no entanto, se analisarmos o exemplo da fundição, é possível produzir inúmeras formas, contudo, a produção de moldes é extremamente cara e aumenta o tempo de produção, sendo uma das desvantagens quando comparada com os métodos de manufatura aditiva [26]. Analisemos um exemplo.

Os autores, Yunlong Tang, et al. [26], tinham como objetivo otimizar um suporte do motor de um avião (Figura 39).

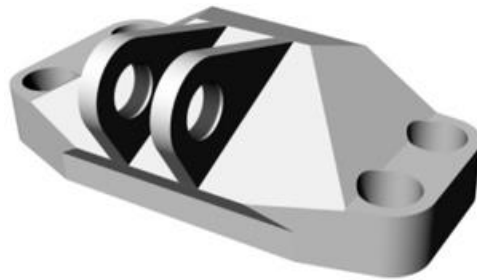


Figura 39 - Suporte motor

Numa primeira fase, foi feita uma análise às forças presentes no suporte durante o seu trabalho e, também, aos seus pontos de fixação, sendo as mesmas aplicadas no modelo em análise conforme demonstrado na Figura 40.

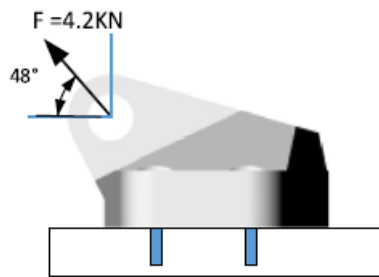


Figura 40 - Forças presentes e pontos de fixação

Posteriormente, os investigadores, auxiliados por um software apropriado, definiram quais os pontos funcionais do suporte, ou seja, os pontos que não podiam ser alterados (FS1, FS2 e FS3), bem como os limites da peça, dando origem ao modelo apresentado na Figura 41.

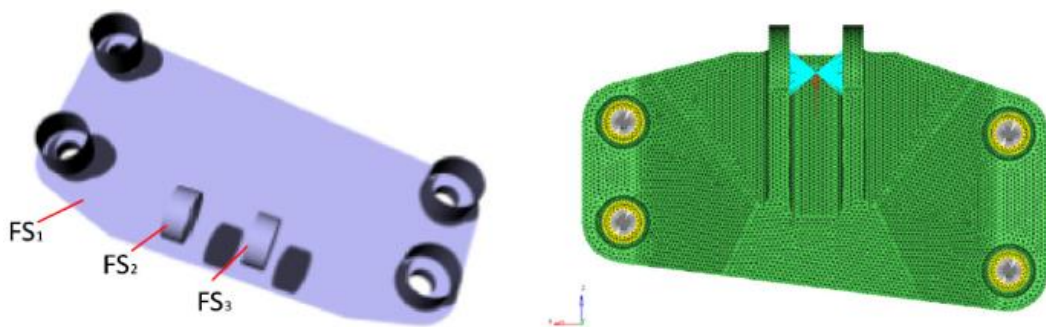


Figura 41 - Definição de pontos funcionais e limites da peça

Tendo em conta todos os fatores referidos anteriormente, o software chegou a um *design* final onde manteve todos os pontos funcionais como uma peça sólida e a restante peça, feita à base de treliças. Todo o processo evolutivo pode ser observado na Figura 42.

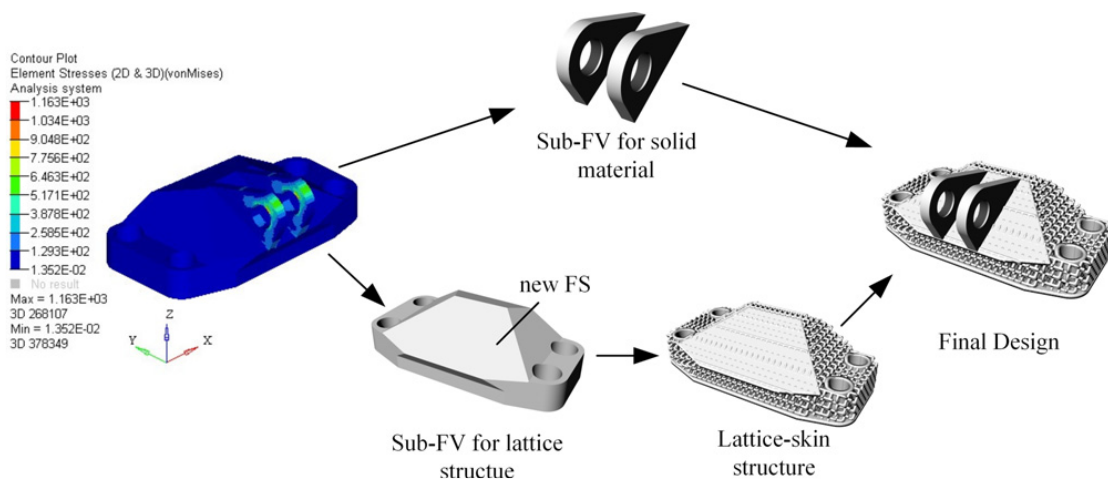


Figura 42 - Processo evolutivo do design

Esta peça é passível de ser executada por fundição, contudo, a criação de um molde seria bastante dispendiosa e morosa, sendo preferível o uso de métodos que a indústria 4.0 trouxe. De referir que, durante todo o processo de *design*, é possível, por vezes, indicar o tipo de método de fabrico que se pretende usar, levando a que o software faça um *design* capaz de ser produzido pelo método especificado.

Posto isto, é mais usual que tanto o *design* generativo como a otimização topológica, tenham como aliada a manufatura aditiva, aliás, as duas ferramentas são bastante poderosas na otimização de produtos, devido, também, à manufatura aditiva [11][14].

Com a manufatura aditiva na equação, o processo inerente ao *design* generativo fica mais completo, como podemos verificar na Figura 43.

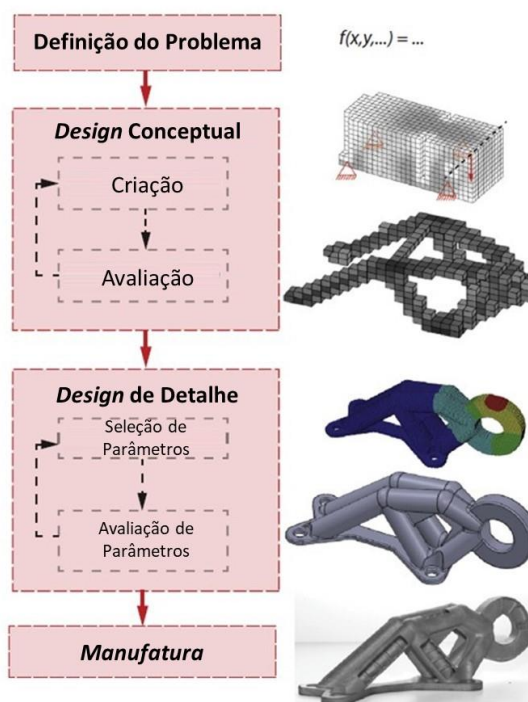


Figura 43 - Processo Design Generativo com manufatura [14]

Neste caso, após a escolha do *design* ideal por parte do *designer*, avança-se para a fabricação do mesmo.

A manufatura aditiva, neste tipo de métodos, torna-se mais vantajosa quando comparada com os métodos tradicionais de manufatura, pois, estes últimos, não conseguem acompanhar a variação da produção, tal variação, obriga à criação/mudança de ferramentas e de métodos de fabrico, acarretando custos adicionais indesejados [14]. No entanto, esta variação de produção também pode constituir uma desvantagem para a manufatura aditiva, ao nível do *design*, ou seja, se houver uma maior variação, serão necessários novos inputs, inputs esses que possuem uma componente manual que está sempre propícia a erros, criando entropias no sistema. Contudo, os métodos de *design* generativo, conseguem amenizar o efeito desses erros, uma vez que fornecem os inputs necessários ao sistema, para uma produção customizada em massa, anulando, desta forma, a componente manual [14].

Na Figura 44 pode-se verificar que, para baixas variações de produção e baixos volumes de produção, a aplicação de processos de manufatura aditiva, com a utilização do *design* generativo na fase de detalhe/otimização, é economicamente viável. À medida que se vai aumentando o volume de produção e a variação da produção, a manufatura aditiva continua a ser economicamente viável, mas o *design* generativo passa a compensar apenas na fase de conceção. Os métodos tradicionais, apenas são favoráveis para volumes de produção muito elevados, com baixa variação.

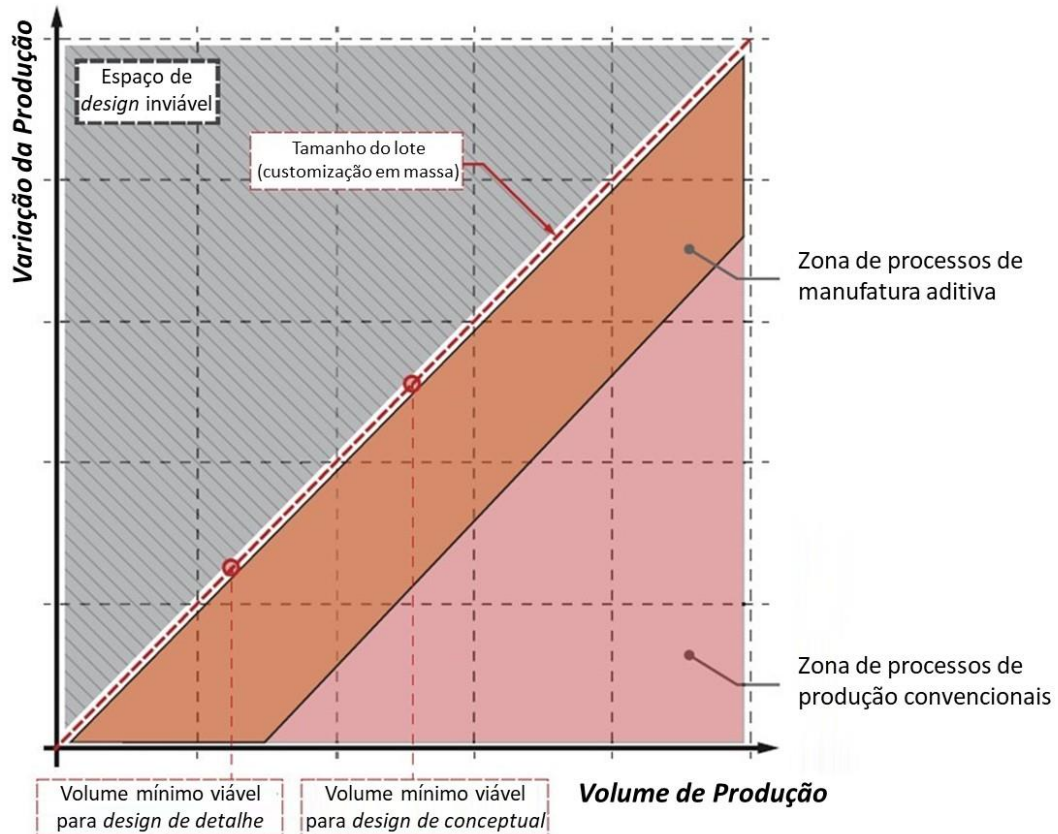


Figura 44 - Zonas economicamente viáveis para a aplicação do *design* generativo e utilização de processos de manufatura aditiva [14]

Estes métodos associados à manufatura aditiva, são cada vez mais usados na indústria automóvel e a sua utilização ganhou ainda mais força com a pandemia vivida nos últimos anos. Com a produção de peças por fabrico aditivo, as empresas automóveis, tornam-se mais independentes, uma vez que deixam de depender de fornecedores externos que, a qualquer momento, podem não conseguir dar vazão a todos os pedidos, provocando uma paragem, por vezes crítica, nas linhas de montagem de veículos. Com essa independência, as indústrias supramencionadas podem produzir as suas próprias peças e mais importante, conseguem produzir peças mais leves e com a mesma resistência que as anteriormente usadas, uma vez que conseguem simplificar as suas formas e, em certos casos, reduzir o número de ligações mecânicas, evitando o uso de parafusos, porcas e anilhas que, a longo prazo, podem fraturar ou tornarem-se inutilizáveis devido a fenómenos de corrosão. A diminuição dos componentes atrás referidos, promove, por consequência, a diminuição de peças em armazém, reduzindo, de igual forma, os custos de posse.

Segundo um estudo realizado a diversas firmas do setor automóvel, a utilização destes métodos, traz inúmeros benefícios, como uma elevada qualidade de serviço ao cliente, uma produção mais descentralizada, customizada e rápida e baixo stock, reduzindo, desta forma, os custos de armazém [4].

Assim como no *design* generativo, o mesmo se aplica à otimização topológica.

Existem vários métodos de manufatura aditiva, que podem ser divididos em dois grupos, os métodos de adição de metais e os métodos de adição de polímeros. Para o interesse deste trabalho, e para as peças que vão ser estudadas, a Tabela 6 organiza os processos mais utilizados na produção de peças do ramo automóvel [27][28].

Tabela 6 - Processos de manufatura aditiva

Processos de Manufatura Aditiva	
Metais	Polímeros
SLM (Selective laser melting)	SLA (Stereolithography)
LMD (Laser metal deposition)	
EBM (Electron-beam additive manufacturing)	Impressão 3D

Revisão Bibliográfica

3. Métodos e Aplicação

Neste capítulo, será dada uma breve explicação das peças em estudo, desde os materiais, massa, volume e a sua função num autocarro. De uma forma pormenorizada, serão, de igual modo, identificados todos os passos e procedimentos efetuados durante a aplicação das duas ferramentas em análise nesta dissertação (*design* generativo e otimização topológica), para que, no capítulo seguinte, seja mais fácil interpretar os resultados. De salientar que, para este estudo, será utilizado o software *Fusion 360*.

As peças em análise são uma diagonal de tabuleiros, um suporte do sistema limpa-brisas, uma base de bilhética e uma base de bateria.

3.1. Diagonal dos Tabuleiros

A diagonal de tabuleiros é uma peça em alumínio usada na construção de um autocarro para fixar, como o próprio nome indica, os tabuleiros superiores. Estes tabuleiros albergam vários componentes como as colunas de som, os botões de emergência das portas, as escovas das portas e alguns componentes elétricos. Cada autocarro utiliza 21 diagonais, com 116,81 g cada uma, espalhadas por todo o comprimento do mesmo. Para uma melhor perceção, a Figura 45 mostra o posicionamento e função desta peça.

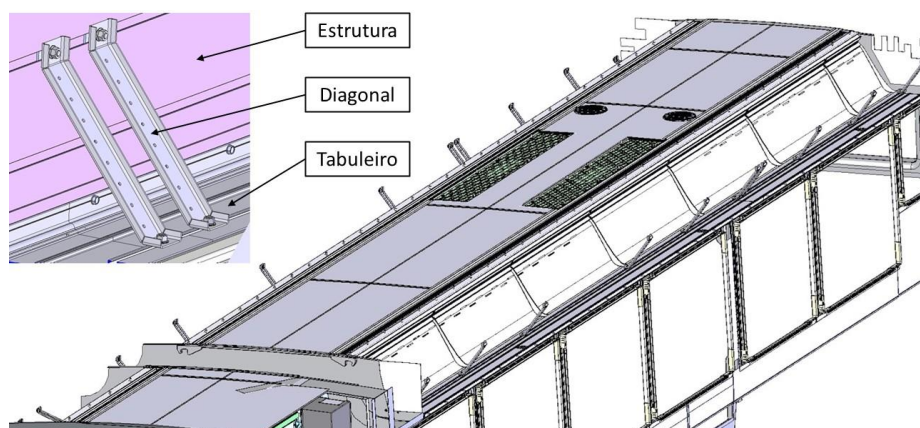


Figura 45 - Posicionamento Diagonal Tabuleiros

3.1.1. *Design* Generativo

Para a correta realização do estudo, torna-se importante analisar a função da peça em questão e toda a sua área envolvente, desde os pontos de fixação às cargas que irá suportar. Neste caso,

Métodos e Aplicação

trata-se de uma peça que tem como função suportar os tabuleiros e os respetivos componentes, um peso de cerca de 24 kg, espalhados por 9 diagonais, resultando numa carga de 2,7 kg por peça. A Tabela 7 evidencia as características da peça, que vão ser úteis no capítulo seguinte.

Tabela 7 - Características da diagonal

Material	Massa	Volume
NP EN 485-2: EN AW-1050A-H24	116,81 g	43182,75 mm ³

Partindo da peça original, representada na Figura 46, foi criado um projeto de *design* generativo no software *Fusion 360*. Numa fase inicial, o modelo foi editado, sendo definidos os pontos mais importantes da peça ou, por outras palavras, todas as zonas a preservar e espaços a ser mantidos, com o intuito de construir o modelo final, usado na geração dos diversos *designs* por parte do software. Posto isto, definiram-se as zonas de fixação da peça, através da criação de esboços extrudidos que representam a área que se pretende preservar, neste caso, uma área circular com 32 mm de diâmetro, com a furação central necessária. Da mesma forma, identificaram-se os furos centrais que se teriam de manter para a amarração das cablagens, sendo criada uma área circular de 10 mm de diâmetro. Todas estas definições, criaram o modelo apresentado na Figura 47, onde podemos analisar as zonas referidas delimitadas a verde.

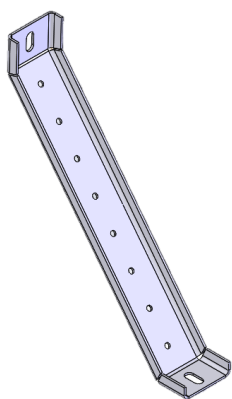


Figura 46 - Diagonal atual

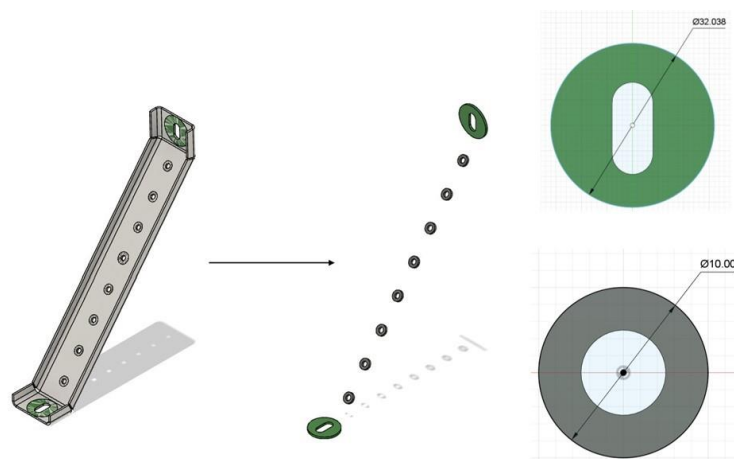


Figura 47 - Furações a preservar

É, de igual forma, importante definir os obstáculos, ou seja, as áreas onde o software não pode criar material, áreas livres. Desta forma, esboçaram-se os locais onde, no local de aplicação da peça em questão, tem de existir espaço livre. Como se pode verificar na Figura 48, a vermelho, foi criada uma barreira inferior que representa o tabuleiro onde aperta a diagonal e na zona de aperto superior, foi extrudida uma barreira que representa a estrutura do tejadilho, onde se encontra o ponto de fixação principal do componente. Entre os dois obstáculos referidos anteriormente, foi criado um terceiro, que representa toda a área que se encontra sob a diagonal, onde podem existir cablagens ou outros dispositivos, sendo necessário manter este espaço livre de material.

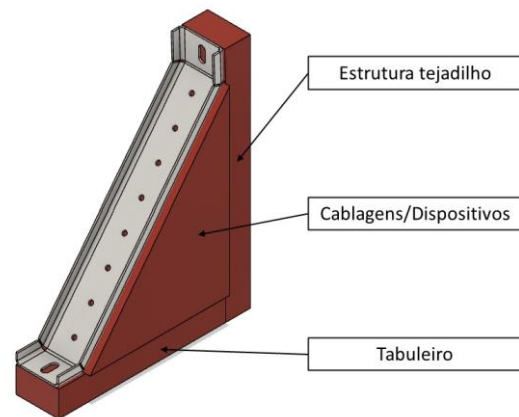


Figura 48 - Obstáculos da peça

O *Fusion 360* permite, também, definir os espaços necessários para um parafuso e a sua respetiva cabeça, e ainda o espaço necessário para a ferramenta de aperto. Como tal, na criação do modelo, foram identificados todos esses locais, para que, o software, gerasse *designs* que preservassem não só as furações como também tivessem em atenção as áreas requeridas para os parafusos e para as ferramentas de manutenção, ou seja, é possível “jogar” com os parâmetros de praticabilidade e acessibilidade das peças. Na Figura 49 é possível verificar tanto as áreas de ação do corpo do parafuso, como da sua cabeça e o espaço reservado para a passagem das ferramentas. Para este caso específico, foram definidos dois tipos de parafusos, sendo que um deles é apenas representativo. No caso das fixações principais (tabuleiro e tejadilho), criou-se o corpo de um parafuso M8x15, apertado de fora para dentro por uma fêmea M8 com flange, cujo diâmetro exterior é de 17,9 mm, com uma altura de 8 mm. No que toca à ferramenta, foi definida uma área livre de 30 mm de diâmetro ao longo de 270 mm lineares. No caso das furações centrais, não se definiram propriamente parafusos, uma vez que as mesmas são para abraçadeiras de amarração, no entanto, criaram-se perfis extrudidos com 5 mm de diâmetro como se de parafusos se tratassem, sendo definidos como zonas de obstáculo.

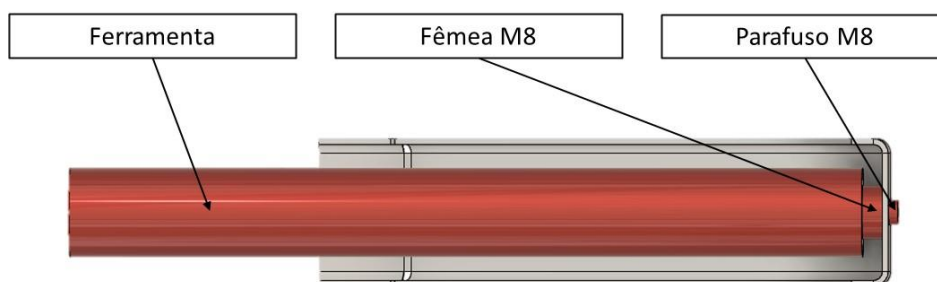


Figura 49 - Área de ação do parafuso e da ferramenta

Uma vez definidos todos os parâmetros anteriormente indicados, obtém-se o modelo final, apresentado na Figura 50, utilizado para a geração dos diferentes *designs*.

Para uma simulação eficaz, transpôs-se para o software os pontos fixos da peça, neste caso, considerou-se como fixo, o ponto de fixação da diagonal à estrutura do tejadilho nos três planos, ou seja, neste local, a peça não se consegue deslocar em nenhuma direção.

Como referido anteriormente, os tabuleiros têm por volta de 24 kg e são suportados por 9 diagonais e, distribuindo uniformemente as cargas, cada diagonal irá suportar 2,7 kg (27 N). Estes 27 N, serão aplicados na zona onde o parafuso e a fêmea fixam o tabuleiro à diagonal e terão uma direção normal ao plano xOy.

Para o caso em questão decidiu-se testar materiais da família dos polímeros e dos metais, são eles o aço inoxidável 316L, a liga de alumínio AlSi12, o alumínio AlSi9Cu3, o PA 6.6 (Poliamida 6.6), o ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) e o ASA (Acrilonitrila Estireno Acrilato). A escolha destes materiais, teve em conta os processos de fabrico a utilizar e, no caso concreto dos polímeros, acresce o facto de serem matérias-primas com uma presença cada vez mais forte na indústria carroçadora de autocarros. A funcionalidade entrou em ação e foram gerados vários *designs*, que vão ser analisados no ponto 4.1.1.

3.1.2. Otimização Topológica

A peça abordada neste capítulo foi, também, sujeita a uma simulação de otimização topológica, ou seja, não se geraram diferentes *designs*, mas sim, uma mudança de forma à peça original, mantendo o material inicial, o alumínio. Este processo é mais simples que o processo de *design* generativo.

No *Fusion 360*, o processo inicia-se com a definição das restrições estruturais, fixando a zona onde o parafuso fixa a diagonal à estrutura do tejadilho.

Assim como no *design* generativo, foram selecionadas as zonas a preservar que, neste caso, foram todas as furações centrais de amarração e as furações de fixação tanto aos tabuleiros como ao tejadilho. Para as primeiras, foi definida uma área correspondente a um offset de 2,5 mm e para as segundas, um offset de 6 mm.

Uma diferença para o *design* generativo, são os critérios a definir. Para este estudo, foi definido um critério de massa, onde a massa final teria de ser $\leq 60\%$ da massa inicial e um critério de rigidez, onde o objetivo é maximizar.

Os 27 N foram colocados, mais uma vez, no local de aperto dos tabuleiros à diagonal, com direção normal ao plano xOy.

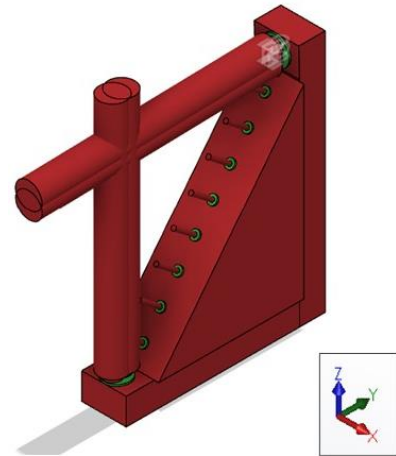


Figura 50 - Modelo final a ser convergido

A Figura 51 representa o modelo que irá ser sujeito à simulação, depois de impostas todas as restrições necessárias.

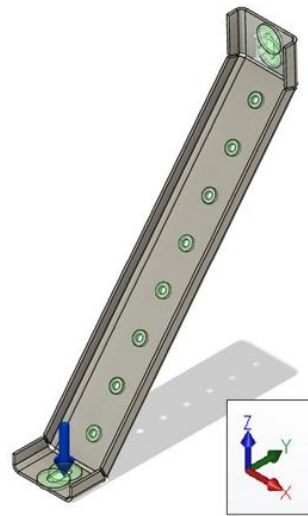


Figura 51 - Modelo para otimização topológica

3.2. Suporte Limpa Para-Brisas

O suporte limpa para-brisas está localizado na estrutura frontal do veículo e serve de base para a fixação do motor e sistema de escovas limpa para-brisas. Trata-se de uma peça em aço S355 J2 com uma massa de 2241 g, soldada à estrutura frontal. A Figura 52 demonstra mais sucintamente o posicionamento desta peça e a sua fixação, bem como o seu propósito para um correto funcionamento do sistema em que está incorporada.

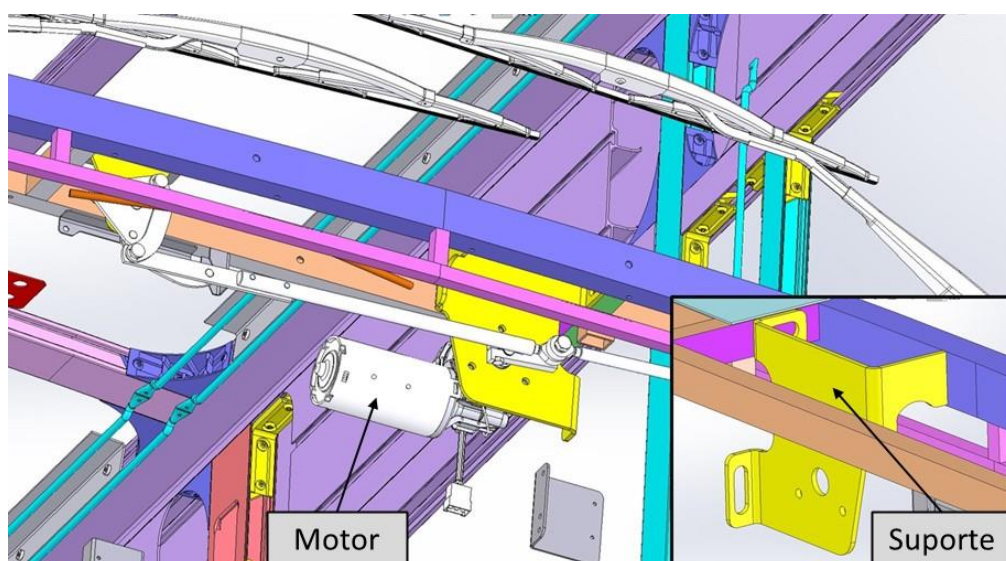


Figura 52 - Posicionamento Suporte Limpa Para-Brisas

3.2.1. Design Generativo

Como referido anteriormente, este suporte encontra-se soldado à estrutura frontal do veículo e tem de suportar o sistema limpa para-brisas, mais precisamente, o motor que transmite a rotação às escovas, motor esse que possui uma massa de 5,5 kg e que transmite um momento na ordem dos 0,15 N.m no seu furo central, local onde se dá a conexão entre o motor e os braços das escovas. A Tabela 8, apresenta as características da peça em estudo, que irão ser alvo de comparação no próximo capítulo.

Tabela 8 – Características do suporte

Material	Massa	Volume
EN 10025-2: S355 J2	2241 g	287303,55 mm ³

Numa primeira fase, conforme se pode verificar na Figura 53, foram definidas as furações a manter intactas, tanto a central de 30 mm, sendo criada uma área com um diâmetro de 50 mm, onde ocorre a transmissão do momento para as escovas, como as três de fixação do sistema, com 10,5 mm de diâmetro com um offset de 10 mm.

Para além destas quatro furações, foram delimitadas, de igual forma, as furações para os rebites de soldadura à estrutura. Uma vez que se pretende utilizar diferentes tipos de materiais para além do aço e, sendo a estrutura onde a peça solda de aço, não irão ser preservados os furos para rebites de soldadura, mas sim, furos para fixação mecânica, para ser possível ligar diferentes tipos de materiais à estrutura frontal do veículo. Os furos foram criados com afinação, para que seja possível ajustar corretamente a peça.

A Figura 54 representa todas as zonas preservadas do modelo.

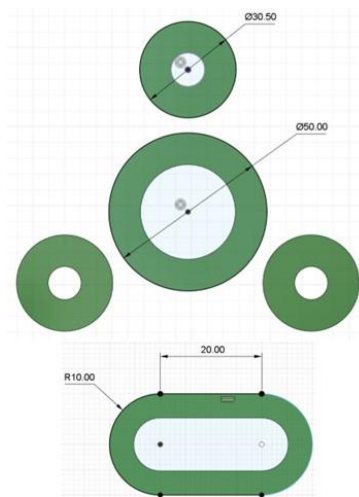


Figura 53 - Áreas a preservar

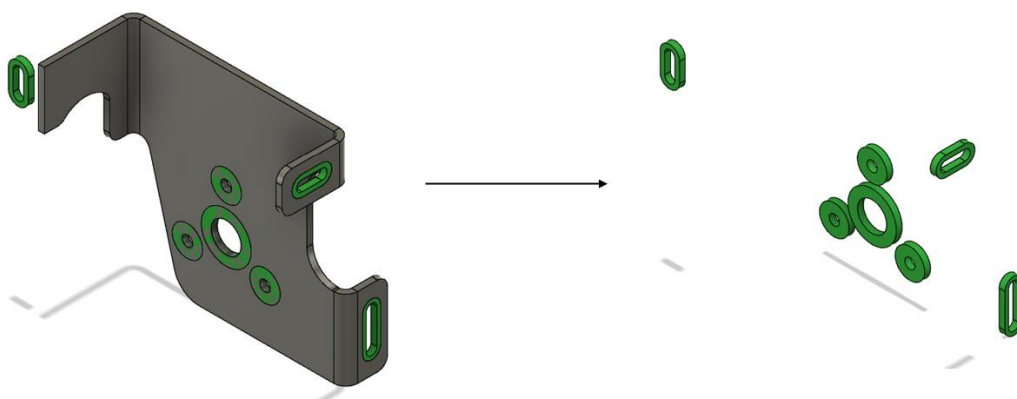


Figura 54 - Zonas preservadas do suporte limpa vidros

Bloqueadas as zonas de preservação, passou-se às geometrias de obstáculo, onde foram criados perfis extrudidos que representam todas as estruturas envolventes. Neste caso, foram criados os tubos onde a peça original era soldada, que, neste estudo, passam a ser os perfis onde a peça vai apertar, e a zona onde há passagem de cablagem, que tem de continuar desimpedida, uma vez que o *routing* das mesmas não vai ser alterado. Para além das áreas indicadas, criou-se, também, uma parede imaginária (que no carro não existe), que representa o limite superior da curva da frente, limite esse que não pode ser ultrapassado pela peça, visto que se trata de uma zona onde existem tubagens provenientes da *frontbox* e isolamentos térmicos. A Figura 55 demonstra visualmente o modelo criado no final desta etapa, onde todos os componentes a vermelho, representam os obstáculos indicados anteriormente, nesta imagem não foram representados os obstáculos frontal e traseiro, que definem a espessura máxima da peça e o espaço necessário para a montagem do eixo do motor, para que seja possível observar a peça original e perceber a sua posição no modelo. De frisar que, para este caso, foi dada total liberdade ao software para conjugar material no plano yOz, uma vez que não se restringiram as áreas imediatamente antes e depois da peça. Posteriormente, e ainda sobre as geometrias de obstáculo, é essencial delimitar as áreas ocupadas pelos parafusos de fixação. No veículo, são utilizados parafusos sextavados M10x25, cuja cabeça possui um diâmetro exterior de 17 mm e uma altura de 6,4 mm. Para além do parafuso, é importante reservar uma área para a passagem da ferramenta, garantindo a fácil manutenção dos parafusos, área essa com 30 mm de diâmetro, que se estende ao longo de 122 mm. As funcionalidades desta *feature* foram uma mais-valia para definir, de igual forma, o espaço necessário para o veio de transmissão que, apesar de não ser um parafuso, pode ser visto como um cilindro de 29,45 mm de diâmetro com um comprimento de 122 mm para ambos os lados do componente. A Figura 56, esquematiza como foram definidos os parafusos e as ferramentas.

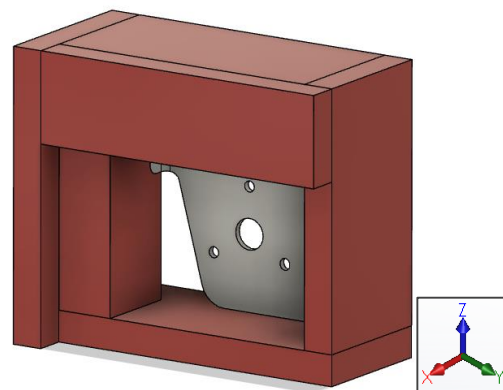


Figura 55 - Obstáculos suporte limpa vidros

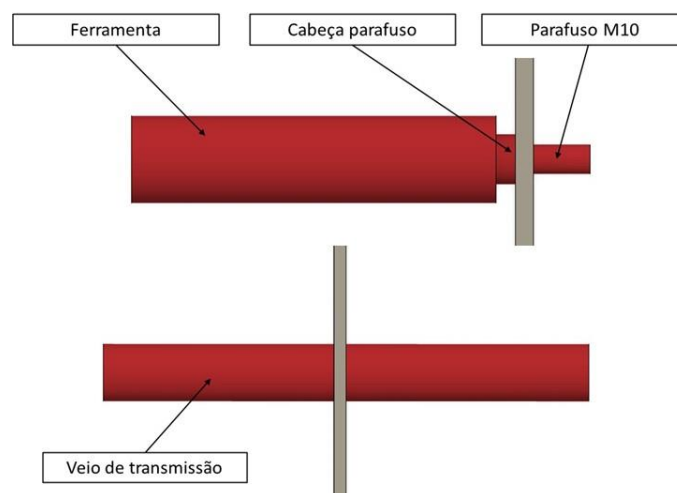


Figura 56 - Definição parafuso e ferramenta

Assim sendo, determinado no espaço o modelo a ser simulado e todos os pontos a preservar e a não ocupar, resta impor todos os locais de fixação e as cargas externas ao modelo gerado, para que seja possível gerar os diferentes *designs*.

Para este estudo, fixaram-se em todas as direções os pontos onde há uma ligação mecânica entre a peça e a estrutura, ou seja, os pontos que fixam a peça à estrutura e, posteriormente, definiram-se as cargas aplicadas sobre o modelo. Como referido anteriormente, o componente em análise serve de suporte para fixar o motor das escovas limpa para-brisas, motor esse que possui uma massa de 5,5 kg que, dividido pelos três pontos de fixação, resulta numa força de 18 N por furação, com uma direção normal ao plano xOy.

Não se pode esquecer que o motor, para transmitir a força às escovas, executa um movimento giratório no seu eixo com um binário de 0,15 N.m. Posto isto, foi adicionado um momento de 0,15 N.m no sentido dos ponteiros dos relógios, no eixo oX. Desta forma, está criado o modelo pronto a ser convergido, conforme se pode verificar na Figura 57.

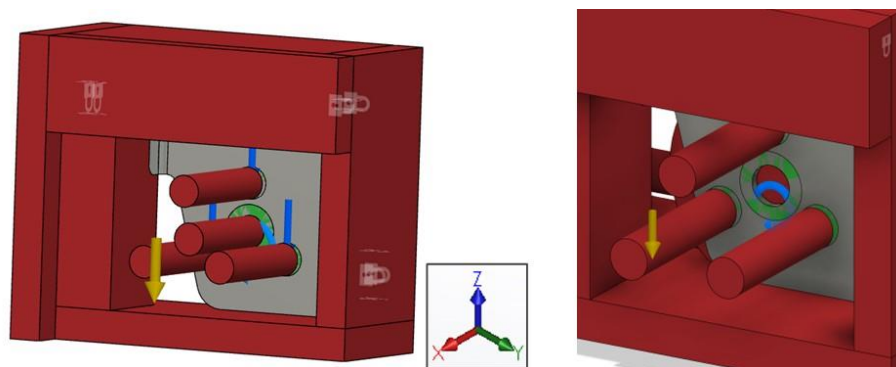


Figura 57 - Modelo final do suporte

Definidas as cargas existentes, passou-se à escolha dos materiais e dos processos de fabrico. Relativamente aos materiais, mantiveram-se os seis materiais referidos no final do ponto 3.1.1, para percebermos quais as diferenças que o software proporciona, tanto ao nível da forma como da massa.

3.2.2. Otimização Topológica

Passando ao estudo de otimização topológica, utilizando o material de origem, encontraram-se as zonas desnecessárias da peça e passíveis de ser removidas.

O processo seguiu o mesmo caminho que o efetuado no ponto 3.2.1, foram definidos os pontos de fixação, ou seja, os pontos que fixam a peça no local pretendido e que a impedem de se mover nos três planos. Para este estudo, uma vez que se vai manter o material inicial, o aço S355J2, ao contrário do que foi feito no *design* generativo, mantiveram-se todas as furações afetas aos rebites de soldadura.

Posteriormente, foram delimitadas todas as áreas a preservar, como os furos para soldadura e as furações centrais de fixação do motor e de rotação do eixo de transmissão, com um offset de 5 mm.

No que toca às forças, nos três furos centrais de fixação do motor aplicaram-se forças de 18 N normais ao plano xOy e no furo de rotação do eixo de transmissão, um momento de -0,15 N.m em torno do eixo normal ao plano yOz.

Numa fase final, foram definidos os critérios de estudo, neste caso, critério de massa ($\leq 60\%$) e de maximização da rigidez.

O estudo foi gerado com base no modelo apresentado na Figura 58.

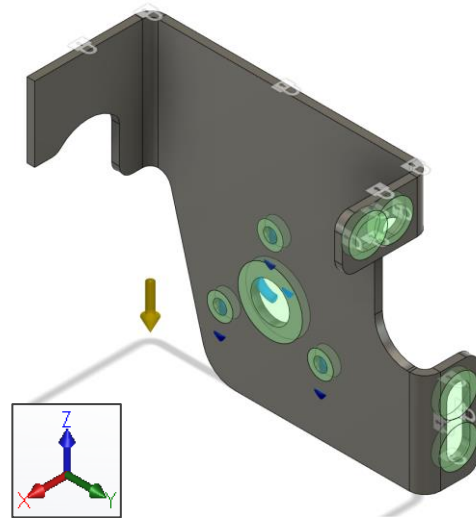


Figura 58 - Modelo para otimização topológica

3.3. Base de Bilhética

A base de bilhética é uma estrutura composta por diversas peças em aço S355 e Nylon PA 6.6, que serve de estrutura de fixação para os sistemas de bilhética dos autocarros. Este componente encontra-se fixo no tablier do carro e possui um sistema de ajuste, para que os motoristas consigam posicionar a máquina de bilhetes no local mais apropriado. Toda a estrutura possui uma massa de 6 Kg. A Figura 59 mostra a localização e funcionamento deste componente.

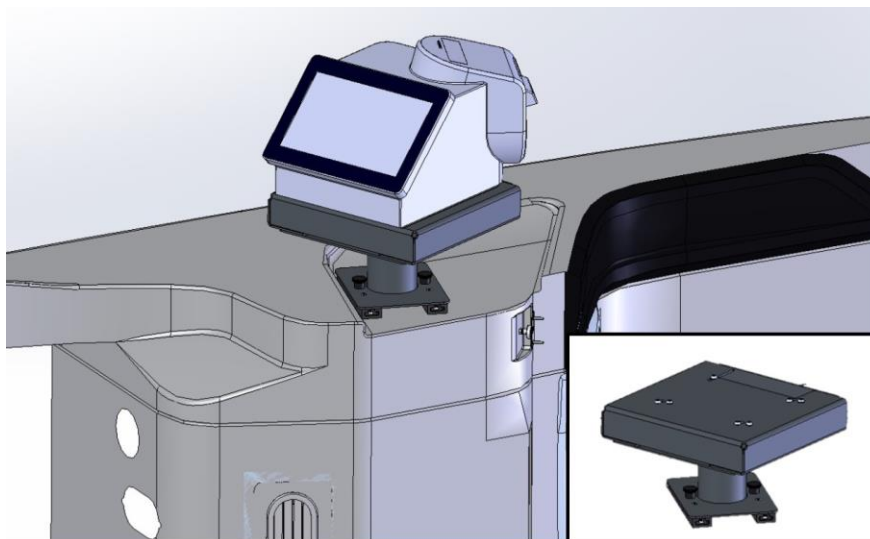


Figura 59 - Posicionamento Base Bilhética

3.3.1. Design Generativo

Para este estudo, e como seria de esperar, não vão ser analisadas todas as peças do conjunto, será apenas escolhida uma peça, nomeadamente, a base onde o sistema de bilhética é fixo, apresentada na Figura 60. É uma peça feita em aço S355 J2, com uma massa de 3,09 kg. Como não poderia deixar de ser, o objetivo passa por diminuir a massa deste componente, seja por mudança de material, seja por mudança de forma ou pela junção das duas. A Tabela 9 dá a conhecer, as principais características deste componente.

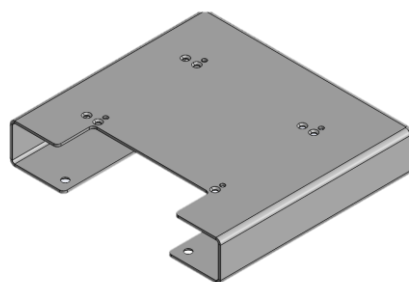


Figura 60 - Base aperto bilhética

Tabela 9 – Características da base bilhética

Material	Massa	Volume
EN 10025-2: S355 J2	3088,29 g	395934,86 mm ³

Para este caso, começou-se a definição do modelo pelas geometrias de obstáculo. A peça em estudo, como se pode comprovar pela Figura 61, está limitada inferiormente por uma base em forma de cantoneira, que permite o movimento de rotação do sistema. Portanto, é necessário que o espaço inferior seja desprovido de material. Por esta ordem de ideias, definiu-se, de igual modo, o espaço superior como obstáculo, uma vez que é a zona onde a bilhética assenta e fixa. Foram, também, extrudidas “barreiras” em torno de toda a peça, por uma questão de minimização de espaço ocupado no habitáculo do motorista, pois, dependendo do cliente, pode haver necessidade de aplicação de mais componentes e assim, restringimos a área de ocupação da peça. Internamente, bloqueou-se a intrusão de material na zona central do componente, para que exista sempre espaço para a passagem da cablagem da bilhética, que terá de percorrer todo o suporte até entrar no tablier, onde faz a conexão com as cablagens de alimentação e sinal. Este espaço é também reservado para que o operador tenha espaço para o aperto dos parafusos de fixação da bilhética. A Figura 62 é o resultado de todas as geometrias de obstáculo criadas.

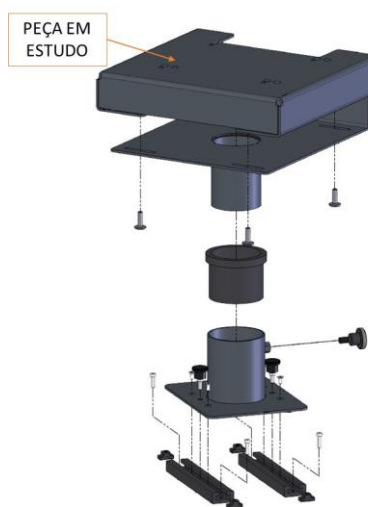


Figura 61 - Conjunto base bilhética explodido

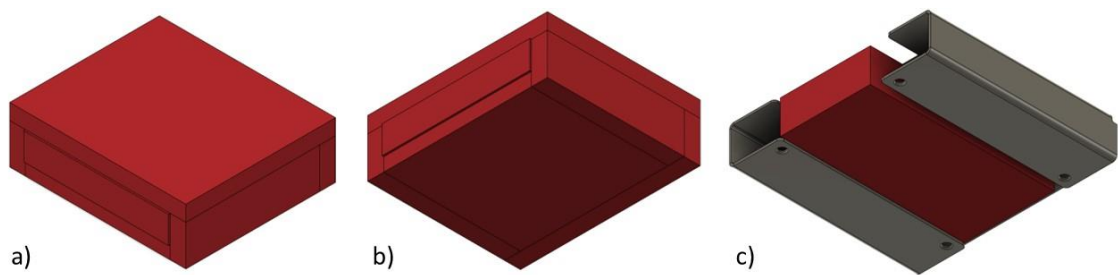


Figura 62 - Geometrias de obstáculo: a) exterior superior; b) exterior inferior; c) interior

Definidos os locais onde não pode haver criação de material, passou-se à escolha das zonas a preservar. É de extrema importância manter todos os pontos de fixação da peça, tanto superiores, como inferiores. Foram, então, criados componentes no espaço, com 20, 13 e 7 mm de diâmetro (Figura 63) com a furação existente (furos normais e escareados), para que o sistema saiba que, durante a convergência dos *designs*, tem de manter as zonas seleccionadas intactas, garantindo o correto funcionamento da peça. De salientar que as dimensões indicadas anteriormente, não correspondem ao diâmetro dos furos, mas sim, à área definida como “intocável” para contemplar as furações necessárias, para que exista uma margem de segurança entre o furo e a área envolvente.

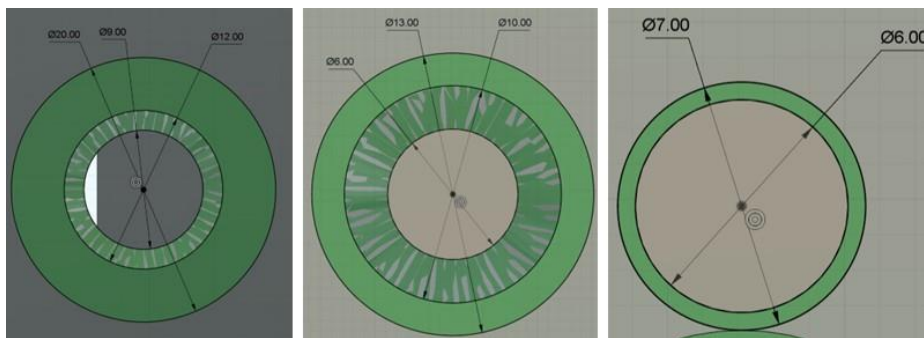


Figura 63 - Offset criado para definir furações

Todas as etapas descritas anteriormente, dão origem ao modelo presente na Figura 64.

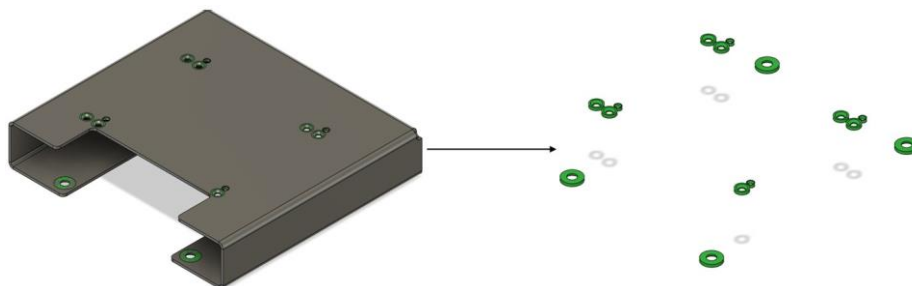


Figura 64 - Zonas preservadas

Por fim, para concluir o modelo CAD que irá ser sujeito a um *design* generativo, foram indicados os parafusos que iriam passar pelos furos, por forma a evitar a adição de material na zona das

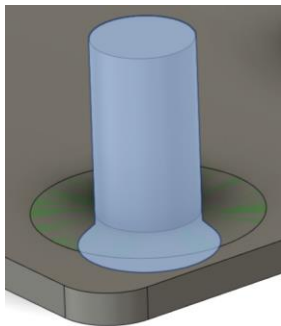


Figura 65 - Representação porca de rebitar

furações e no espaço imediatamente a seguir. No ponto de aperto com a base inferior, o espaço definido, não foi para parafusos, mas sim para porcas de rebitar de embeber, sendo criado um componente (Figura 65) que simula o corpo das ditas porcas. Na parte superior, fez-se jus às capacidades da *feature* “obstáculo do conetor” e definiram-se os parafusos que iriam passar pelas respetivas furações, neste caso, M6x20 sextavados, cuja cabeça possui um diâmetro exterior de 10 mm e uma altura de 4 mm. Relativamente à ferramenta, definiu-se um cilindro de 20 mm com um comprimento de 42 mm.

Concluídos os passos acima mencionados, o modelo está pronto para receber as zonas de fixação e as cargas externas. Desta forma, foram fixos em todas as direções as zonas de ancoragem inferiores. Relativamente às cargas, esta peça possui uma particularidade. Apesar das suas zonas de fixação, a bilhética possui quatro batentes de borracha que são os “pés” da máquina, local onde se irá dar a descarga das forças. Uma vez que este computador de bordo tem um peso de aproximadamente 15 kg (150 N), haverá uma descarga de 37,5 N por batente de borracha com direção normal ao plano xOy. Para a correta representação destas forças, tornou-se imperativo criar quatro cilindros (zona a preservar) com um diâmetro de 30 mm, para servir de base de assentamento dos batentes e de colocação das forças. A Figura 66, apresenta o modelo final.

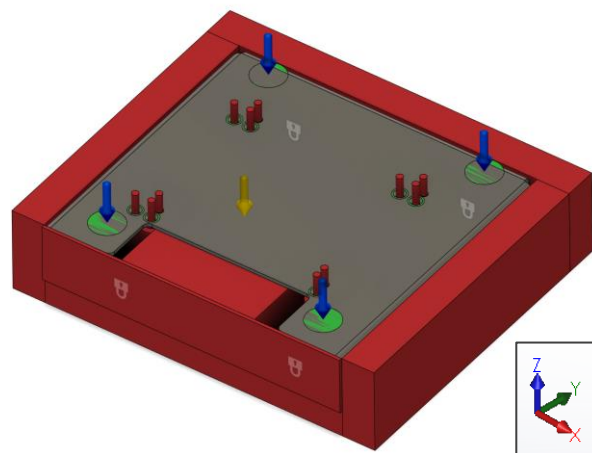


Figura 66 - Cargas e zonas de fixação

Neste estudo, e por forma a garantir a mesma linha de raciocínio, foram executadas as simulações tendo por base os seguintes materiais: aço inoxidável 316L, liga de alumínio AlSi12, alumínio AlSi9Cu3, PA 6.6, ABS e ASA.

O objetivo desta geração de *designs* é minimizar a massa do componente, mantendo a sua rigidez.

3.3.2. Otimização Topológica

Um dos temas desta dissertação é a otimização topológica e, como não poderia deixar de ser, foi realizado, também, um estudo de otimização topológica à base da bilhética, para que seja possível comparar as duas ferramentas.

Como mencionado anteriormente, é um processo mais expedito que o *design* generativo, uma vez que não há a necessidade de definição de tantos limites e espaços, sendo o espaço de definição reduzido ao seguinte:

- Zonas de fixação;
- Zonas a preservar;
- Cargas aplicadas sobre o sistema;
- Critérios de otimização.

O material, por norma, é sempre o de origem, uma vez que o objetivo desta ferramenta é apenas remover material em excesso.

Começando pelo primeiro ponto, foram selecionados todos os pontos que fixam a base em estudo à base inferior. Passando aos locais a preservar, todas as furações foram mantidas, sendo delimitada uma área extra com um offset de 5 mm, para que se preservasse mais para além da zona do furo, não correndo riscos de o software remover material muito próximo da furação.

Neste componente, ao contrário do que foi feito nos anteriores, para que seja possível aplicar as cargas no sistema, torna-se imperativo criar locais específicos para o efeito. Como tal, nas coordenadas de assentamento dos pés da bilhética, foram criadas circunferências com um diâmetro de 15 mm. Para que estas circunferências fizessem parte do sistema, teve que se recorrer ao comando “contatos manuais”. Este comando, permite indicar o contato existente entre os corpos secundários e o corpo principal, garantindo, desta forma, que os corpos extrudidos não ficam livres no espaço.

Posto isto, aplicaram-se as cargas de 37,5 N, normais ao plano xOy.

Passando para o último ponto, definiu-se como objetivo uma redução de massa de, pelo menos, 40%, com foco na maximização da rigidez.

O modelo criado, encontra-se demonstrado na Figura 67.

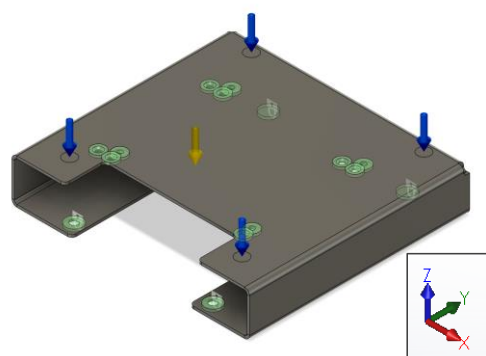


Figura 67 - Modelo para otimização topológica

3.4. Base de Bateria

A caixa da bateria adicional é, como o nome indica, uma caixa colocada sobre a cava de roda dianteira esquerda, que alberga duas baterias de apoio, quando os clientes desejam uma fonte adicional de potência para o autocarro. Esta é uma estrutura feita em aço S355 com uma massa de 22,85 kg, colada e aparafusada na cava de roda. A Figura 68 apresenta as partes integrantes desta caixa.

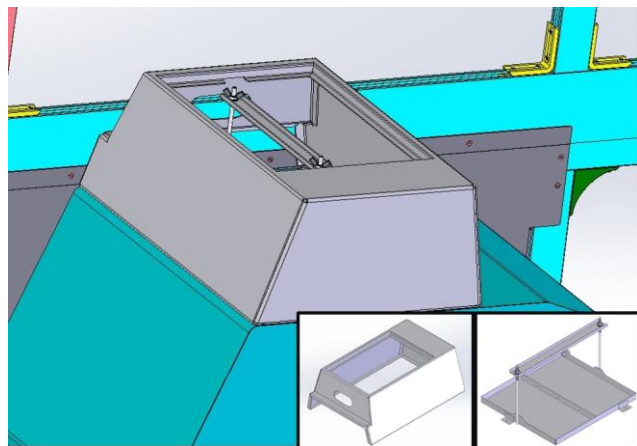


Figura 68 - Caixa bateria adicional

3.4.1. Design Generativo

Neste estudo, vai ser apenas abordado um componente do conjunto, aquele que está sujeito a uma maior carga, a base das baterias, presente na Figura 69. A abordagem, e não fugindo à regra, passa por perceber se é possível diminuir a massa do componente, sem comprometer a rigidez, tendo em conta que, o mesmo, tem de suportar as cargas exercidas pelas duas baterias. Na Tabela 10, podemos ver os principais dados, que irão ser usados mais à frente neste trabalho. Dito isto, iniciou-se o projeto com a definição das zonas a preservar.

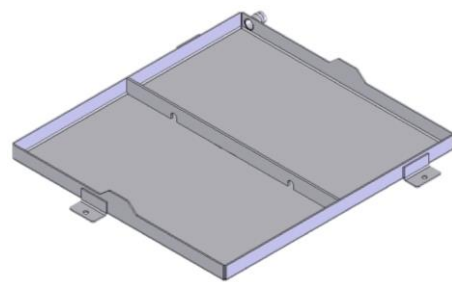


Figura 69 – Base bateria

Tabela 10 – Características da base de baterias

Material	Massa	Volume
EN 10025-2: S355 J2	2729,42 g	349925,42 mm ³

Inicialmente, foram preservados os três furos de fixação da peça, sendo criada uma área circular com um diâmetro de 15 mm, ou seja, no raio de 7,5 mm em torno do furo pretendido, não pode haver modificações na peça, o local indicado, terá de permanecer conforme a peça original. Preservaram-se, de igual modo, as três “slots” centrais de amarração, sendo delineada uma área extra com um offset de 2,5 mm, e o furo de 15 mm para passagem da cablagem principal, sendo definido um círculo com um diâmetro de 20 mm (Figura 70). Para além das furações, foi também criada uma espécie de estrutura central, onde as baterias irão assentar, ou seja, foi

marcada uma área com as dimensões exteriores das baterias (330x171 mm) e um offset de 20 mm para o interior.

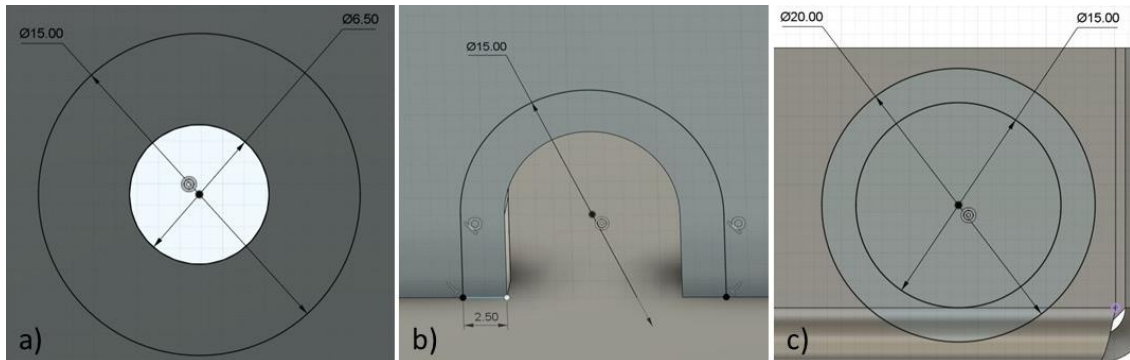


Figura 70 - Zonas preservadas: a) furos fixação; b) "slots" de amarração; c) passagem cablagem principal

Posteriormente, como obstáculos, definiu-se, numa primeira fase, toda a área exterior da peça original, para que os *designs* convergidos, não interfiram com a carcaça exterior do conjunto, restringindo, desta forma, a área ocupacional do componente, dando origem ao modelo representado na Figura 71. Numa segunda fase, foi tido em conta o espaço necessário para a acomodação das baterias. Estamos a falar de duas baterias com 330x171x214 mm que necessitam de ser alojadas na base em estudo. As mesmas foram representadas sob a forma de um paralelepípedo (Figura 72), com as dimensões indicadas anteriormente, ficando assim garantido esse espaço.

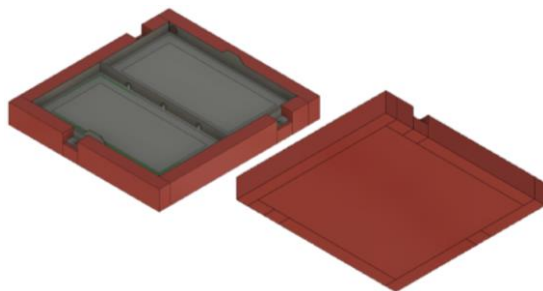


Figura 71 - Obstáculos iniciais

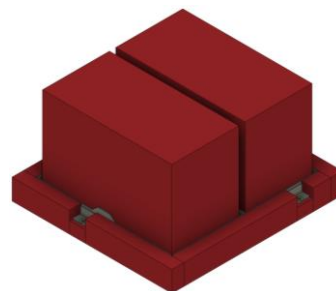


Figura 72 - Espaço para baterias

Seguindo as etapas habituais, resta delinear os espaços necessários para os parafusos de fixação e para as respetivas ferramentas de manutenção. Neste caso, estamos a falar de três parafusos sextavados M6x30, com uma cabeça de 10 mm de diâmetro por 4 mm de altura e, uma vez que se está a utilizar parafusos M6, vai-se seguir a mesma lógica do subcapítulo 3.3.1, sendo definido um cilindro de 20 mm de diâmetro para o espaço ocupado pela ferramenta, 20 mm que se prolongam por 200 mm. Uma explicação mais visual, pode ser vista na Figura 73.

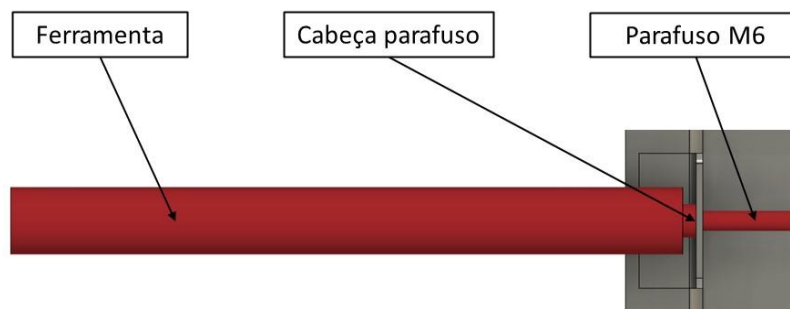


Figura 73 - Obstáculo do conetor da base de baterias

A ferramenta para criação de espaços para parafusos, foi, de igual forma, usada para garantir que, tanto as slots de amarração como a furação para passagem da cablagem principal, não eram ocupadas por material.

Para ser possível realizar o estudo, resta marcar os pontos de fixação, definir as cargas existentes e os materiais a estudar.

Relativamente aos pontos de fixação, como não poderia deixar de ser, assinalaram-se as três furações de fixação da base à cava de roda. No que toca às cargas, estamos a falar de duas baterias de 33 kg cada uma, portanto, na superfície criada para receber estes componentes, aplicou-se uma força de 330 N com direção normal ao plano xOy. O modelo criado e pronto para ser convergido, encontra-se representado na Figura 74.

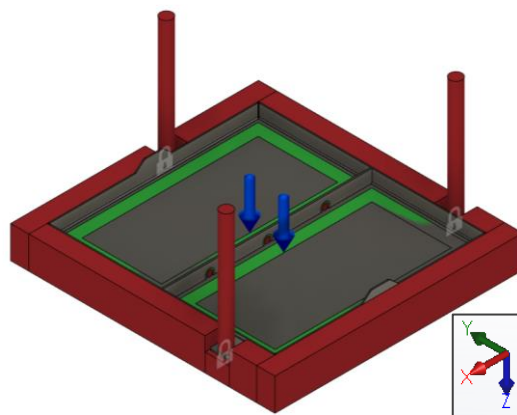


Figura 74 - Modelo final para estudo sem representação das baterias

Neste estudo e para não fugir à regra, foram testados os seis materiais indicados no início do capítulo.

3.4.2. Otimização topológica

Resta efetuar o estudo de otimização topológica, onde se irá analisar a possibilidade de remover material, para garantir uma massa inferior ou igual a 60% da massa inicial, sem afetar a rigidez estrutural do componente.

Como ponto de partida, os três pontos de fixação foram restringidos para, numa fase seguinte, indicar todas as zonas a preservar. Neste caso, por meio de offsets de 3,75 mm preservaram-se os furos de fixação da peça. As furações centrais de amarração e a furação de entrada de

cablagem, foram também preservadas, mas com uma área gerada por meio de um offset de 2,5 mm.

Assim como na base de bilhética, foi necessário criar duas bases de aplicação das cargas exercidas pelas baterias. Estas bases são nada mais que aros retangulares, com uma dimensão exterior de 330x171 mm e interior de 290x131 mm. De referir que, estes esboços tiveram de ser definidos como contactos no sistema, para que não fossem vistos pelo software como estruturas livres no espaço. Foram então aplicadas as cargas correspondentes às forças exercidas pelas baterias, neste caso, 330 N normais ao plano xOy, em cada aro.

O resultado pode ser observado na Figura 75.

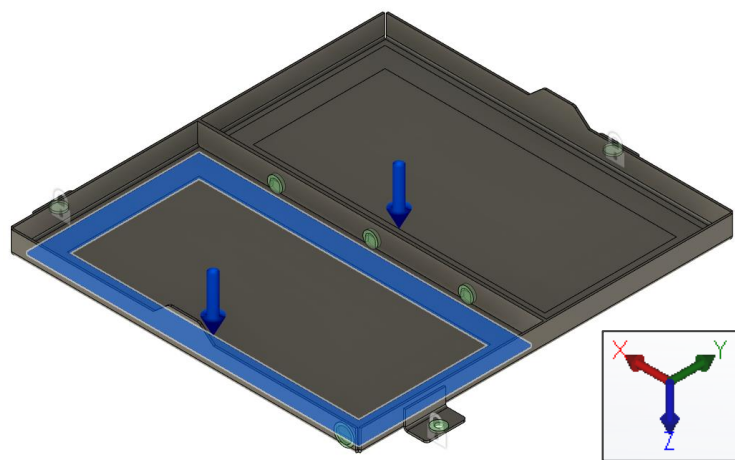


Figura 75 - Modelo para otimização topológica

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo, irão ser apresentados todos os resultados obtidos ao longo das simulações efetuadas, sempre acompanhados das respetivas explicações/análises. Para um estudo mais aprofundado, não serão sempre aceites os primeiros resultados, numa tentativa de os aprimorar, na busca de uma melhor solução, serão igualmente abordadas possíveis alterações aos modelos, para novo estudo.

O objetivo em todas as peças é perceber se é possível maximizar a rigidez, garantindo uma redução de pelo menos 40% da massa inicial e consequente alteração de forma. Em todas elas irão ser testados 6 tipos de materiais que irão ser mais ou menos favoráveis de acordo com o tipo de método de fabrico em estudo (fabrico aditivo e fundição injetada), são eles:

- Aço inoxidável 316L – ideal para fabrico aditivo;
- Liga de alumínio AlSi12 – ideal para fabrico aditivo;
- Alumínio AlSi9Cu3 – ideal para fundição injetada;
- PA 6.6 – ideal para fabrico aditivo e injeção;
- ABS – ideal para fabrico aditivo e injeção;
- ASA – ideal para fabrico aditivo.

O motivo da escolha destes materiais pode ser dividido em 2 grupos:

- Polímeros – por serem os mais utilizados na indústria produtora de autocarros;
- Metais – por serem os mais adequados para os métodos de fabrico em estudo.

Antes da verificação das simulações, faz sentido apresentar de uma maneira muito geral, as propriedades dos materiais atuais e das alternativas, para que se entendam melhor os resultados.

As peças atuais, são fabricadas em alumínio (AW-1050A-H24) e em aço (S355 J2).

No que toca ao alumínio, esta série, tem uma ótima maleabilidade, sendo excelente para o trabalho geral de chapa como quinagem, soldadura, corte, conformação plástica, entre outros. Uma vez que é ótimo para aplicações que exijam alguma resistência ao esforço, a sua aplicação nas diagonais é ideal.

Passando para o aço S355J2, é um aço muito comum na indústria dos autocarros, estrutural, com uma tensão limite elástica de 355 MPa. Como maior parte dos componentes em S355 num

Resultados e Discussão

autocarro estão expostos às condições climáticas exteriores, opta-se sempre pela qualidade J2, que apresenta uma melhor tenacidade, quando exposto a climas mais frios.

Relativamente aos novos materiais, no que diz respeito aos metais, a escolha incidiu principalmente na capacidade de serem processados pelos processos de fabrico definidos e na resistência que os mesmos apresentam ao desgaste (por abrasão essencialmente). Já os polímeros, comparativamente aos metais, a sua densidade reduzida é um ponto muito forte para a seleção. Se analisarmos o caso em concreto do ASA, a sua ótima resistência ao calor, aos raios UV e a elevada resistência ao impacto, fazem deste material, uma boa opção para usos externos. Na Tabela 11 podem ser observadas as principais propriedades dos materiais, que serão importantes para a análise dos resultados.

Tabela 11 - Propriedades dos materiais em estudo

Propriedades	Material							
	1050A-H24	S355J2	Inox 316L	AlSi9Cu3	AlSi12	PA 6.6	ABS	ASA
Massa volúmica g/cm ³	2,705*	7,800*	7,990*	2,768*	2,660*	1,170*	1,070*	1,070*
Módulo elasticidade GPa	69,0*	210,0*	193,0*	73,0*	71,0*	3,3**	2,04*	2,13*
Tensão limite elástica MPa	103,0*	355,0*	290,0*	165,0*	145,0*	72,1*	44,7*	44,3*
Resistência tração MPa	110,0*	470,0*	558,0*	330,0*	296*	81,8*	38,6*	45,0*
Módulo corte GPa	26,0*	80,0*	77,0*	28,0*	26,7*	0,970***	0,320**	0,8**
Coefficiente expansão térmica µm/ (m · ° C)	25,5*	12,0*	16,0*	22,1*	20,4*	81,3*	82,8*	91,1*
Calor específico J/ (G · ° C)	0,900*	0,460*	0,500*	0,963*	0,963*	1,570**	1,72*	1,3**

*Info retirada da MatWeb; **Info retirada dam Makeitfrom; ***Info retirada da base de dados do Solidworks

4.1. Diagonal dos Tabuleiros

Neste subcapítulo, irão ser detalhados todos os resultados dos estudos feitos à diagonal dos tabuleiros, utilizando tanto a ferramenta de *design* generativo como a ferramenta de otimização topológica.

4.1.1. Resultados *Design* Generativo

Como previamente referido, foi efetuada uma simulação de *design* generativo à diagonal dos tabuleiros, tendo por base seis materiais:

- Aço Inox 316L;
- Alumínio AlSi9Cu3;
- Alumínio AlSi12;
- PA 6.6;
- ABS;
- ASA.

Fazendo uma primeira análise, o aço Inox 316L podia ser inicialmente eliminado, devido à sua elevada densidade, que irá resultar em peças bem mais pesadas, contudo, e para verificar que tipo de formas esta matéria-prima irá produzir, vai ser tido em conta no estudo.

Desta forma, foi gerada a simulação, sendo convergidos um total de 19 resultados, que podem ser observados na Figura 76.

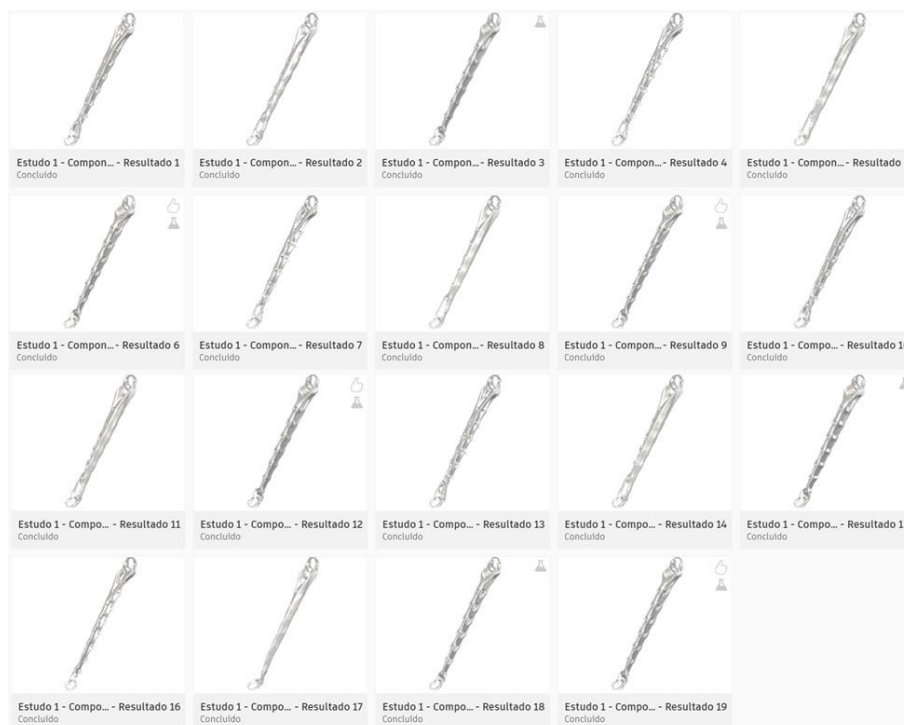


Figura 76 - Resultados modelo diagonal convergido

Resultados e Discussão

De entre os resultados obtidos, e para facilitar a análise, eliminaram-se todos aqueles que não cumpriam com o objetivo principal de diminuir a massa inicial (116,81 g), reduzindo o espaço de soluções para 9 opções, conforme se pode observar na Figura 77. Como seria de esperar, todas as soluções eliminadas, pertenciam ao grupo dos metais.

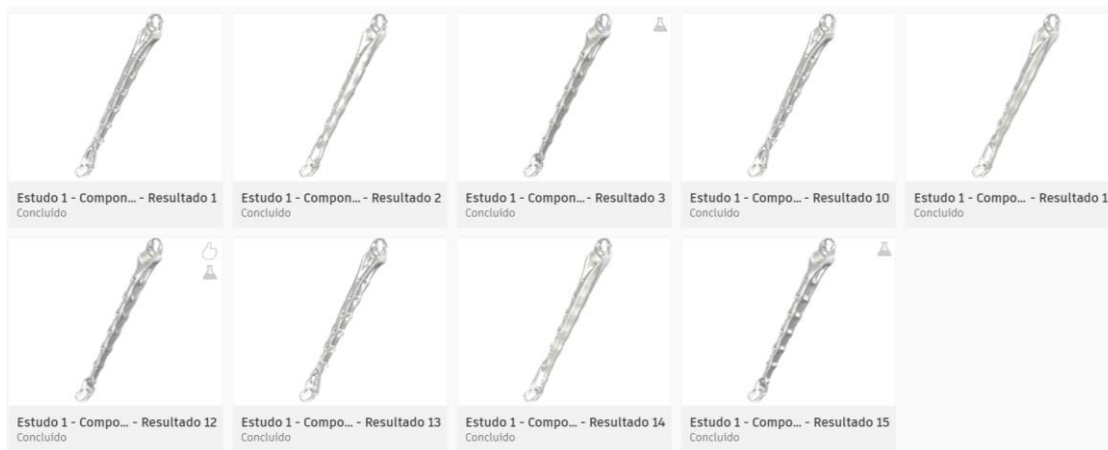


Figura 77 - Soluções da diagonal com massa inferior a 116 g

Após esta seleção, o universo de soluções continua elevado e, como tal, eliminaram-se todas as peças cujo processo de fabrico fosse inviabilizado pelo material e cuja massa não cumprisse, por uma diferença elevada, o objetivo principal (massa \leq 60% massa inicial), ou seja, 70 g. Posto isto, e usando o critério da menor massa e do menor deslocamento como seleção, foram escolhidos 2 resultados, o 3 e o 15 em ABS e PA 6.6, respetivamente. A Figura 78, apresenta um esquema com as quatro opções selecionadas, duas para serem estudadas (a verde) e as restantes duas como salvaguarda no caso de ser necessário reforçar as soluções principais e aumentar em demasia a sua massa.



Figura 78 - Seleção resultados diagonal

De frisar que o sistema fornece quatro resultados favoráveis ao estudo, no entanto, três deles não cumpriam com o objetivo de minimização da massa e um, tendo em conta a matéria-prima, não permitia que o seu fabrico fosse feito pelo processo definido pelo sistema, sendo necessário reformular as opções.

Numa fase inicial, procedeu-se à descrição das principais características das soluções escolhidas para uma primeira comparação, como pode ser observado na Figura 79.

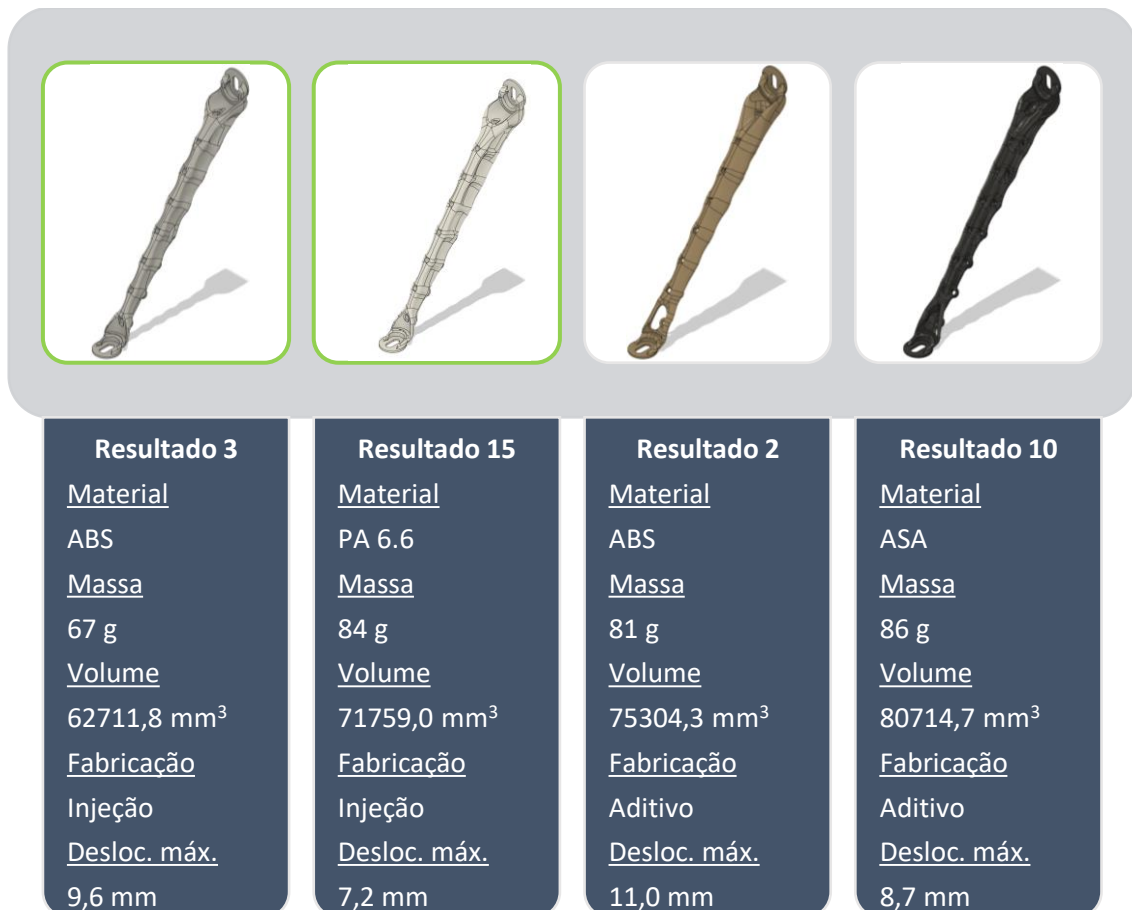


Figura 79 - Propriedades resultados diagonal

As conclusões que se podem tirar é que, os *designs* obtidos cumprem com o desejado, ou seja, reduziram bastante a massa da peça original (116,81 g). No entanto, dois deles (3 e 2), apresentam um deslocamento muito elevado, sendo necessário reforçar a peça.

Apesar das semelhanças, e como dito anteriormente, vão ser analisados apenas dois resultados, o que apresenta menor massa (3) e o que apresenta o menor deslocamento (15) e as comparações vão ser feitas. A análise consiste em realizar uma simulação estática de tensões às peças e avaliar as seguintes componentes:

- Tensão;
- Deslocamento.

Todas as simulações, tiveram em conta as condições de fixação e carga aplicadas no estudo de *design* generativo.

Resultados e Discussão

Como referência comparativa, foi efetuada uma simulação à peça original, tendo sido obtidos uma tensão e deslocamento máximos de 54,6 MPa e 1,4 mm, respetivamente.

Simulou-se a solução 3 em ABS e os resultados foram obtidos.

Analisando a tensão, foi obtido um valor máximo de 98 MPa na zona de transição para a fixação superior. Este valor é crítico, pois a tensão limite elástica do ABS é de 44,7 MPa, o que faz com que o material se deforme permanentemente ou quebre. No que toca ao deslocamento, o valor máximo obtido foi de 11,1 mm na face de fixação inferior, valor esse que é considerado elevado para a correta função destes componentes, tendo em conta o valor de 1,4 mm da peça original. Na Figura 80, os resultados podem ser verificados. Convém lembrar que o sistema, por defeito, define como limite mínimo um fator de segurança de 3 e, neste caso, foi obtido um fator de 0,46, fazendo, desde logo, com que esta opção (sem alterações) seja descartada.

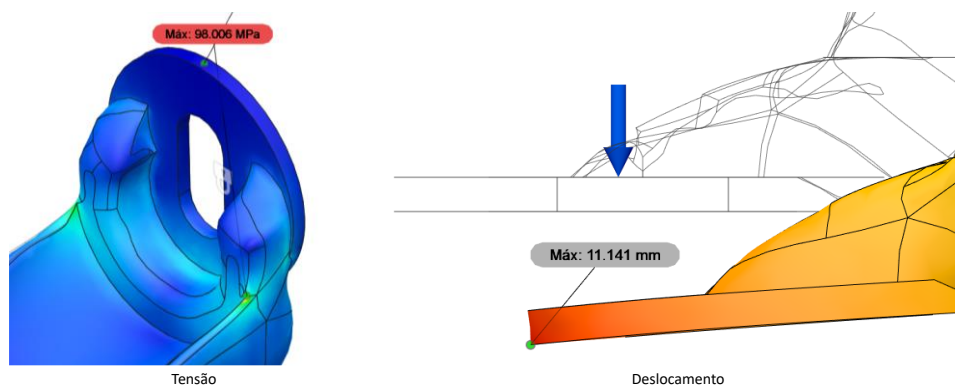


Figura 80 – Diagonal resultado 3: simulação 1

Em jeito de melhoria, e como pode ser observado na Figura 81, foram adicionados gussets na zona de fixação superior, para fortalecer a zona mais afetada, retirando as arestas vivas que existiam e, de alguma forma, bloquear movimento da peça, reduzindo o seu deslocamento. Esta adição de material, promoveu um aumento de massa de 2 g, passando a peça a pesar 69 g.

Foi então realizada uma nova simulação para averiguar a eficácia das modificações efetuadas.

A segunda simulação mostrou claras melhorias em ambos os parâmetros (Figura 82). A tensão máxima diminuiu bastante, ficando abaixo da tensão máxima admissível, com um valor de 24 MPa, novamente, na zona de fixação superior, no entanto, com um arranjo superficial, é possível reduzir ainda mais as tensões nessa zona. Já o deslocamento, diminuiu cerca de 4 mm, passando para um valor de 7,2 mm, mais baixo, mas longe do valor de referência.



Figura 81 - Diagonal resultado 3: primeira alteração

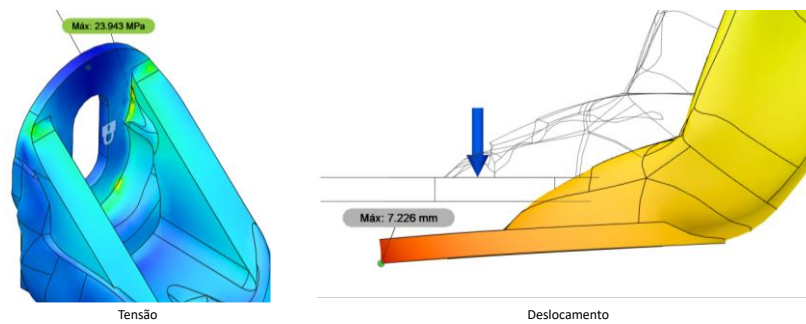


Figura 82 - Diagonal resultado 3: simulação 2

Na tentativa de obter melhores resultados, foi realizada uma última alteração na peça, alteração essa que aumentou a massa do componente para cerca de 75 g. Como dito anteriormente, para reduzir as tensões, procedeu-se a um arranjo superficial da peça e um arredondamento das arestas. No que toca ao deslocamento, foram criados mais dois gussets, desta vez, na fixação inferior, evitando, desta forma, a flexão da parte inferior da peça (Figura 83).

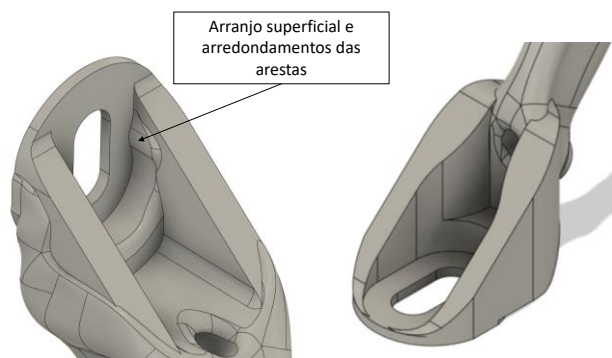


Figura 83 - Diagonal resultado 3: segunda alteração

Depois de definidas todas as modificações, foi realizada uma terceira simulação, cujos resultados podem ser observados na Figura 84.

Mais uma vez, foram obtidos bons resultados, mas apenas ao nível do deslocamento, havendo uma diminuição de cerca de 0,8 mm. No que toca às tensões, estas sofreram um pequeno aumento de 0,3 MPa, que em nada influenciam o bom funcionamento da peça. No entanto, se verificarmos o coeficiente de segurança de 1,84, o sistema aprova o modelo, apesar de o considerar marginal, ou seja, se existir algum esforço extra, o software assume que a peça pode quebrar. Posto isto, podemos concluir que estamos perante um *design* válido, no entanto, faz sentido estudar o resultado 15 que, apesar de ter uma maior massa, poderá oferecer melhores resultados.

Resultados e Discussão

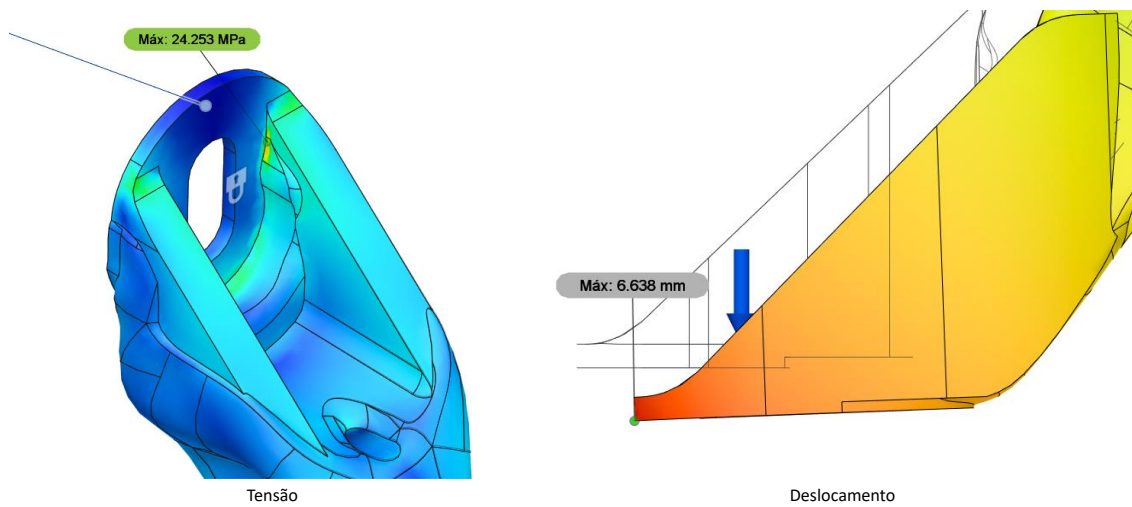


Figura 84 - Diagonal resultado 3 - simulação 3

Realizou-se a simulação à solução 15, uma peça feita em Nylon 6.6 com uma massa de 84 g, a qual necessitou um arranjo superficial inicial na zona dos furos centrais, para que fosse possível gerar a malha corretamente.

Esta nova simulação, levou a resultados iniciais bem melhores que as anteriores. Na tensão, como ponto de partida, há uma tensão máxima de 59,4 MPa na fixação superior, que já é inferior à tensão máxima admissível pelo material de 72,1 MPa. Relativamente ao deslocamento, sem fazer qualquer tipo de alteração à peça, o valor ronda os 8,5 mm o que, para uma primeira simulação, é bastante positivo, no entanto não é ideal, o objetivo passa por ter, no máximo, entre 5 mm de deslocamento. A Figura 85 apresenta os resultados obtidos.

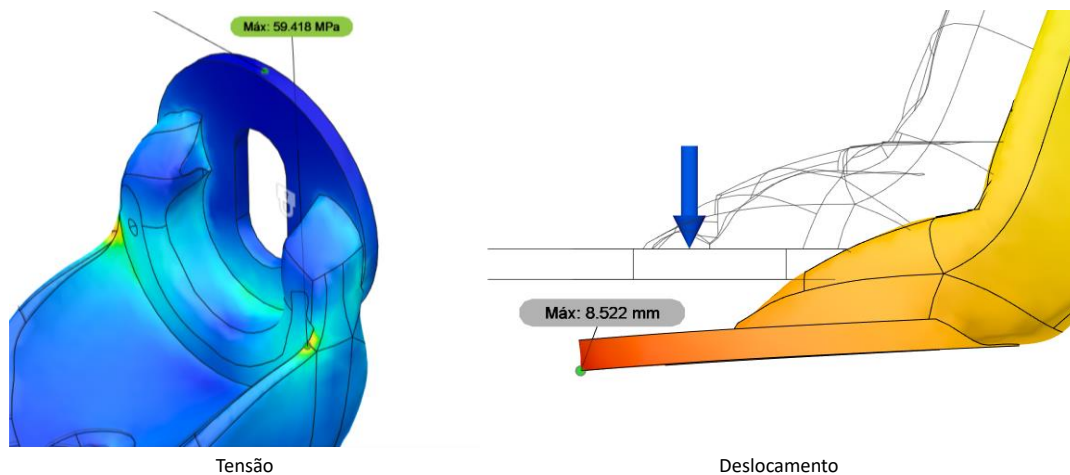


Figura 85 – Diagonal resultado 15: simulação 1

Não fugindo à regra, a primeira modificação passa por criar gussets na zona superior, na tentativa de bloquear uma certa flexão entre a base de fixação e a diagonal da peça, conforme representado na Figura 86. Esta parece ser sempre a solução mais óbvia e que adiciona menos massa ao conjunto. Neste caso, os gussets incrementaram 2,5 g (87 g) o que, para o efeito, é muito favorável.

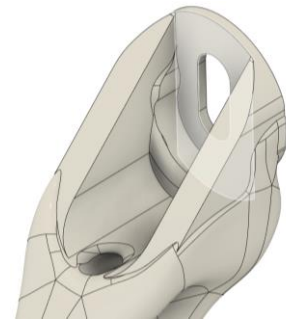


Figura 86 - Diagonal resultado 15: primeira alteração

Procedeu-se à segunda simulação e os resultados foram positivos, tanto ao nível das tensões como do deslocamento. Começando pelas tensões, as mesmas mantiveram-se na zona superior, contudo, reduziram para 19,5 MPa, mantendo-se ainda mais abaixo do limite máximo imposto pelo material. Já no deslocamento, foi obtido um valor de 4,9 mm que se encontra acima do limite original (1,4 mm), mas dentro dos limites que se consideram aceitáveis, tendo em conta o funcionamento do componente, sendo considerado um deslocamento insignificante. Para que não restem mais dúvidas em relação a esta solução, pode ser avaliado o fator de segurança obtido de 3,7, fator esse que se encontra acima do mínimo considerado pelo software (3) e que conclui que a solução é estável. A Figura 87 apresenta os valores obtidos, bem como a localização das tensões e a zona de maior deslocamento e permite concluir que, de facto, estamos perante um resultado bastante favorável.

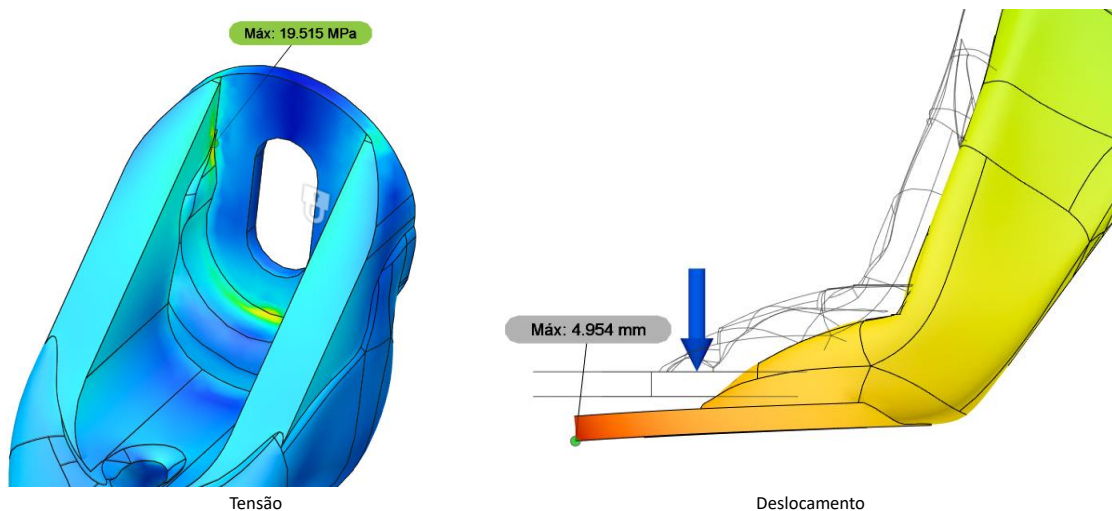


Figura 87 - Diagonal resultado 15: simulação 2

Resumindo, a escolha para este cenário recai sobre o resultado 15, uma peça em PA 6.6, feita por injeção, com aplicação de dois gussets na zona de fixação superior, com uma massa total de 87 g que representa 74,5% da massa inicial (Figura 88). De frisar que é importante o reforço das zonas de fixação, pois com o aperto dos parafusos no plástico, o mesmo pode fraturar. Este é um dos inconvenientes das ligações mecânicas em polímeros.

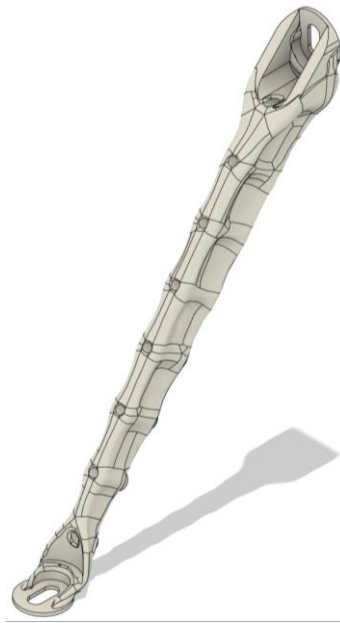


Figura 88 - Modelo final diagonal dos tabuleiros

4.1.2. Resultados Otimização Topológica

Para dar início ao estudo de otimização topológica, utilizando o material de origem, indicaram-se os parâmetros referidos no ponto 3.1.2, a simulação foi executada, dando origem ao modelo presente na Figura 89. Como se pode verificar, o *design* gerado divide-se em duas zonas, uma onde há criação de malha e outra onde não há criação de malha, ou seja, as zonas que não se podem eliminar e as que se podem eliminar, respetivamente.

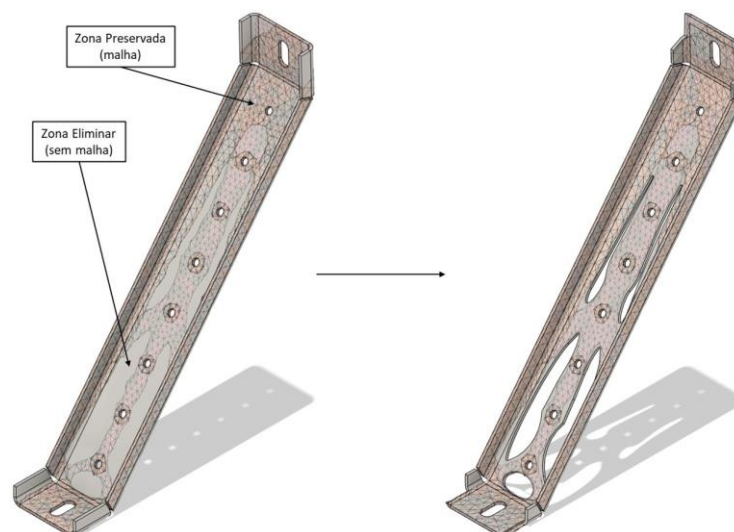


Figura 89 – Diagonal otimização topológica modelo gerado e final

Após a eliminação do material excedente, a peça viu a sua massa ser reduzida em cerca de 17 g o que, para o caso é favorável, visto que, a peça pode ser produzida por métodos de fabrico mais acessíveis como corte laser e quinagem. No entanto, para comprovar a fiabilidade desta

ferramenta, procedeu-se a uma simulação estática de tensões. Para uma correta simulação, é importante criar um contacto nas zonas onde, segundo o desenho, a peça tem de ser soldada (Figura 90).

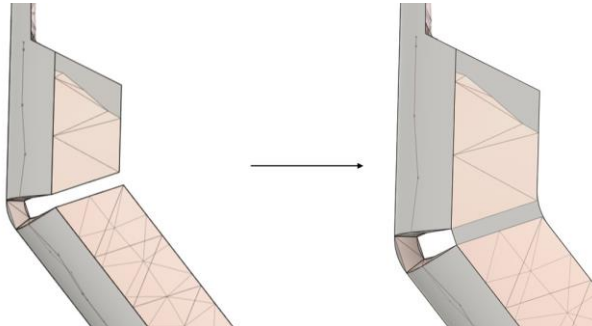


Figura 90 - Zonas soldadas da diagonal

Como pode ser verificado na Figura 91, os resultados foram bastante positivos, um deslocamento ínfimo, perto do original e que em nada afeta o funcionamento do componente e uma tensão máxima bastante inferior à tensão limite elástica de 103 MPa. Posto isto, pode-se afirmar que esta ferramenta é bastante poderosa e fiável.

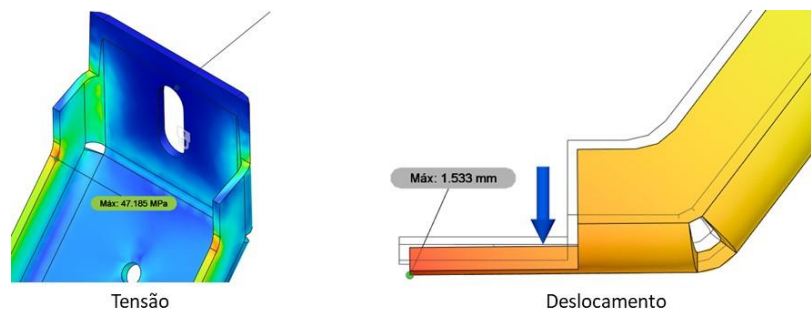


Figura 91 - Diagonal resultados simulação otimização topológica

4.2. Suporte Limpa Para-brisas

Aqui serão descritas, aprofundadamente, todas as soluções obtidas pelas ferramentas de *design* generativo e otimização topológica sobre o suporte do limpa para-brisas. Para além dessa descrição, irão ser apresentadas oportunidades de melhoria.

4.2.1. Resultados *Design* Generativo

Após efetuada toda a definição prévia para o processo de *design* generativo, procedeu-se à resolução da simulação, simulação essa que tinha como objetivo maximizar a rigidez, com uma massa $\leq 60\%$ da massa inicial ($\leq 1344,6$ kg). Mais uma vez, o estudo foi realizado tendo como base os 6 materiais referidos no início do capítulo 4, o alumínio AlSi9Cu3, o alumínio AlSi12, o aço 316 L, o PA 6.6, o ABS e o ASA, materiais aptos a ser trabalhados pelos meios de fabrico definidos, o fabrico aditivo, a injeção e a fresagem com 5 eixos, método que foi adicionado devido à geometria da peça, que permite o uso deste processo. Como referência na

Resultados e Discussão

comparação/aceitação dos resultados obtidos, foi efetuada uma simulação à peça original, tendo sido obtidos valores de tensão e deslocamento de 0,202 MPa e 0,0 mm, respetivamente.

Uma vez realizada a simulação, foram obtidos 35 resultados (Figura 92), que terão de ser reduzidos a 2 para estudo e outros 2 como reserva.

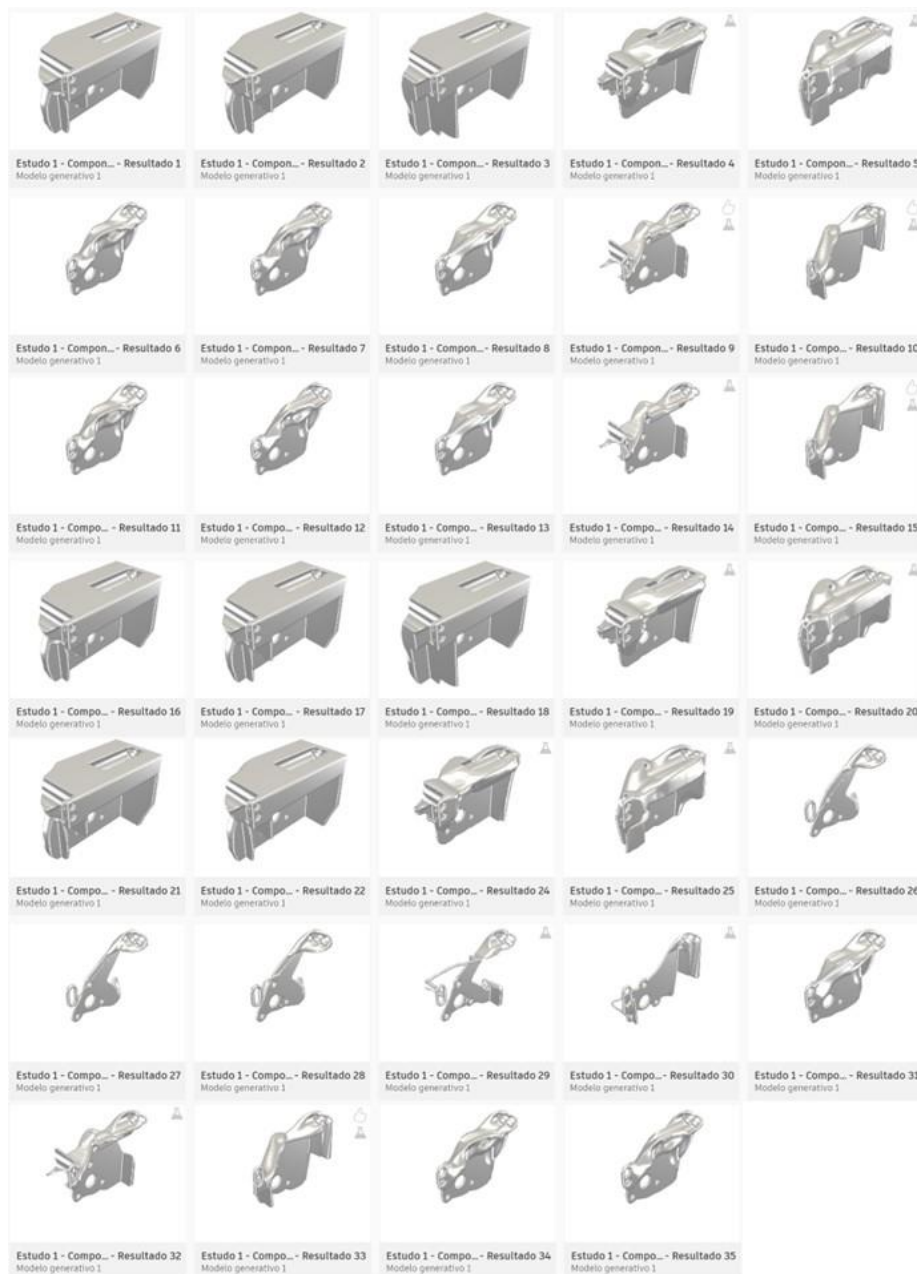


Figura 92 - Resultados modelo suporte limpa para-brisas convergido

Com o intuito de reduzir o espaço de soluções para duas soluções ótimas e mais duas de reserva, foram eliminados todos os resultados cujo processo de fabrico não correspondia ao material e, de seguida, organizaram-se todos os resultados por ordem ascendente de massa, sendo seleccionados os resultados mais leves e cujo material não fosse repetido. Posto isto, a

Figura 93 apresenta um esquema com os quatro resultados definidos, caracterizando-os e referenciando a verde, os dois escolhidos para serem estudados.



Figura 93 - Propriedades resultados suporte limpa para-brisas

Como se pode verificar, todos os *designs* cumprem com o limite definido para a massa, estando bastante abaixo dos 1344,6 kg. Outro ponto positivo, é a forma das soluções selecionadas que são muito distintas, tornando o estudo mais rico.

Fazendo uma breve comparação com o modelo anterior, as diagonais, neste caso, existem dois componentes produzidos em metal o que, à primeira vista, será mais vantajoso em termos mecânicos. Para comprovar a viabilidade das seleções efetuadas, as peças foram sujeitas a uma simulação, começando pelo resultado 26.

Como seria de esperar, o aço Inox 316L deu origem a resultados bastante positivos. Como se pode verificar pela Figura 94, e analisando o ponto da tensão máxima, verifica-se que a peça cumpre perfeitamente com a sua função, apresentando uma tensão máxima de cerca de 4,9 MPa, valor que se encontra bem distante do máximo admissível pelo material (290 MPa). Aliando estes valores ao do deslocamento (0,001 mm), a peça afirma-se ainda mais.

Resultados e Discussão

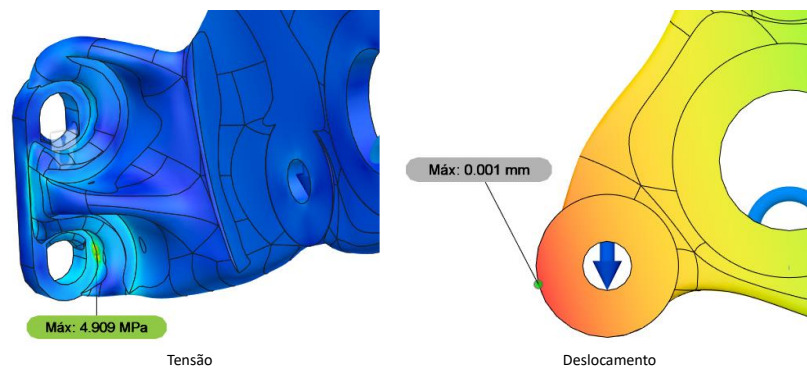


Figura 94 – Suporte limpa para-brisas resultado 26: simulação 1

Apesar dos resultados positivos, faz todo o sentido a aplicação de uma força equivalente a uma pressão efetuada por um dedo, cerca de 1,5 kg, na ramificação que conecta a peça principal à fixação paralela ao plano xOy, devido à sua aparente fragilidade (Figura 95).

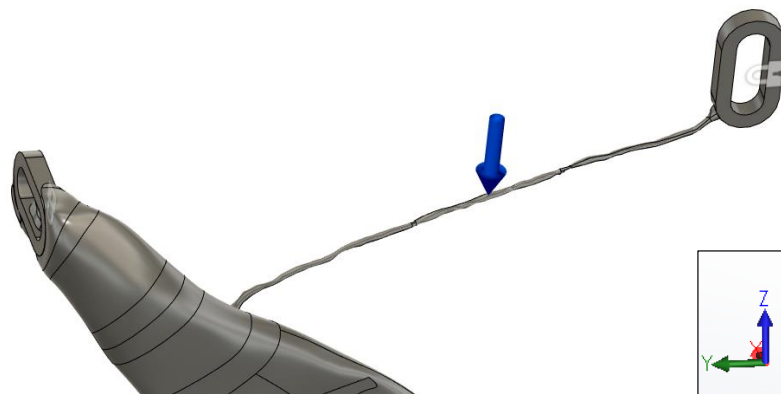


Figura 95 - Suporte limpa para-brisas ramificação peça principal - fixação

Como seria de prever, aplicando uma força equivalente a 1,5 kg, na zona indicada na figura anterior, a peça cede, chegando mesmo a quebrar, apresentando uma tensão máxima de 927 MPa, tensão essa muito superior à máxima admissível pelo material. Posto isto, conclui-se que este tramo da peça pode ser eliminado. Contudo, e por forma a garantir o bloqueio do movimento da peça no eixo X, evitando assim vibrações, este *design* não pode ser validado e, como tal, a opção recai sobre o *design* 6.

Ao ser efetuada a simulação do *design* 6, a mesma apresentou resultados bastante favoráveis, apresentando, desde logo, um fator de segurança de 15, demonstrando o sobre desenvolvimento da peça. Ao lançar um olhar mais atento às tensões existentes, verifica-se que o valor máximo de 2,3 MPa, em nada influencia o componente e a sua função, garantindo a total fiabilidade do mesmo. O deslocamento só vem reforçar tudo aquilo que foi dito anteriormente, uma vez que a peça se mantém praticamente imóvel, idêntico ao valor original de 0,001 mm.

Em jeito de conclusão, o resultado mais fiável, é obtido utilizando o AlSi12 aliado ao fabrico aditivo (Figura 96), reduzindo a massa do componente principal em 980 g (1261 g).

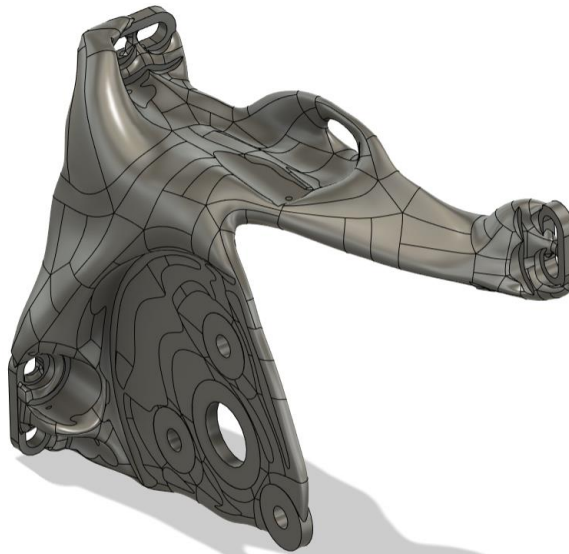


Figura 96 - Novo modelo suporte limpa para-brisas

4.2.2. Resultados Otimização Topológica

Foi, de igual forma, efetuado um estudo de otimização topológica ao suporte, tendo como base o material de origem, o aço S355J2. Este teste foi feito com o mesmo objetivo do *design* generativo, maximizar a rigidez, com uma massa $\leq 60\%$ da massa inicial.

Posto isto, os resultados obtidos foram os apresentados na Figura 97.

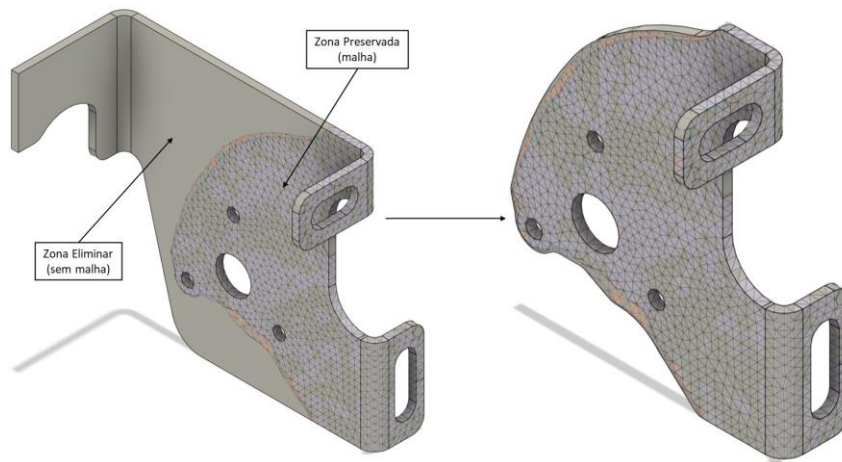


Figura 97 - Suporte limpa para-brisas modelo gerado e final

Ao eliminar todo o material cuja malha não preencheu, o componente reduziu a massa para 1238 g, o correspondente a 55% da massa inicial. No entanto, apesar da solução apresentada pelo sistema, é necessário perceber se a peça suporta as cargas aplicadas e, para tal, foi efetuada uma simulação estática de tensões.

No que toca às restrições e cargas, mantiveram-se as mesmas da simulação de otimização de forma, e os resultados obtidos foram bastante positivos.

Como se pode verificar pela Figura 98, foi obtida uma tensão máxima de 0,5 MPa na fixação superior da peça, tensão irrisória quando comparada à máxima admissível do material em estudo de 355 MPa. Como seria de calcular, aliado a tensões desta magnitude, está um deslocamento praticamente nulo, que valida totalmente o resultado obtido.

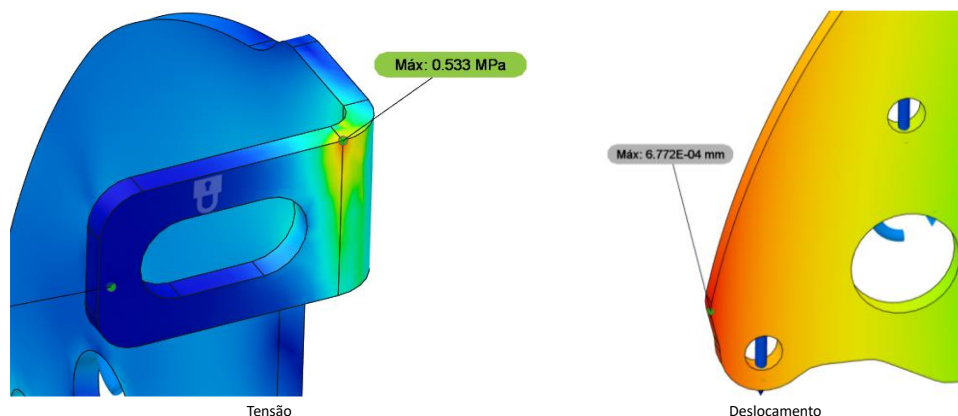


Figura 98 - Suporte limpa para-brisas validação otimização topológica

4.3. Base de Bilhética

Uma vez mais, esta parte da dissertação irá ser fundamental para a análise de resultados das duas ferramentas em estudo, aplicadas sobre a base da bilhética. Esses resultados, irão ser analisados ao pormenor e melhorias vão ser apresentadas, se necessário.

4.3.1. Resultados *Design* Generativo

O estudo do *design* generativo foi executado, tendo como principal objetivo maximizar a rigidez e reduzir a massa final em, pelo menos, 40%. A simulação teve por base os 6 materiais referidos no início do capítulo 4 e regeu-se pelos seguintes processos de fabrico:

- Fabrico aditivo;
- Injeção.

A fresagem com 5 eixos não foi contabilizada devido à geometria da peça, pois a probabilidade de o *design* final ser uma caixa fechada era muito elevada.

Os resultados provenientes da simulação encontram-se na Figura 99 e demonstram as variadíssimas formas que esta ferramenta consegue produzir. Para uma correta aceitação dos resultados obtidos, foi simulada a peça original, tendo sido obtidos valores de tensão e deslocamento máximos de 9,2 MPa e 0,085 mm, respetivamente.



Figura 99 - Designs base bilhética gerados

De todas as soluções, e conforme se pode verificar no esquema apresentado na Figura 100, havia 4 que se destacavam, pela sua massa, processo de fabrico díspar e material. No entanto, e seguindo a mesma regra das restantes peças, apenas 2 soluções (marcadas a verde) serão alvo de estudo.



Figura 100 - Propriedades resultados base bilhética

Numa perspetiva geral, todos os *designs* desenvolvidos cumprem com o objetivo de minimizar a massa em 40% (- 1235,3 g), e as suas formas variam desde peças mais maciças, até peças mais orgânicas, com menos material.

Analisando mais ao detalhe as 4 soluções, temos novamente um polímero como primeira opção, dando origem a uma peça mais leve quando comparada com as restantes. Apesar da massa reduzida, tem de se ter sempre a noção que a resistência pode ser inferior, uma vez que a tensão limite elástica deste material é inferior quando comparada, por exemplo, à do Inox 316L que, como se pode observar, para criar um modelo resistente, necessita de menos material. Analisando os resultados 11 e 14, ressalta a grande semelhança, tanto na forma, como no tipo de material e processo de fabrico.

Para que seja possível tirar conclusões mais concretas, relativamente à viabilidade dos 2 *designs* selecionados, resta submetê-los a uma simulação estática de tensões, tendo como base as mesmas premissas aplicadas na definição do *design* generativo.

Antes de iniciar o estudo no resultado 43, foi efetuada uma alteração no componente, alteração essa que consistia em remover material, para criar espaço para inserir uma porca de rebitar ou de “aranha”, como demonstrado na Figura 101, para permitir a fixação desta base.



Figura 101 - Tipos de porcas

Sendo assim, o antes e o depois das alterações, pode ser observado na Figura 102.

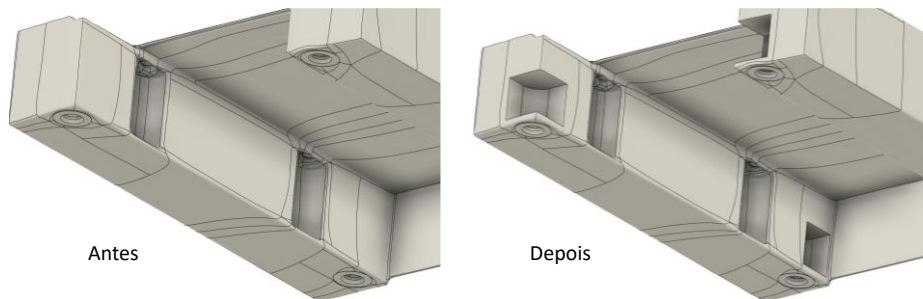


Figura 102 - Base bilhética antes da alteração e depois da mesma

Após garantir a estrutura para o correto funcionamento do componente, avançou-se com a simulação, sendo os resultados descritos a seguir.

A primeira simulação apresentou resultados bastante favoráveis (Figura 103). Começando pela tensão, estamos perante um material cuja tensão limite elástica é de 72,1 MPa, um valor baixo e que, de acordo com a simulação, encontra-se muito longe de ser atingido, uma vez que o valor máximo obtido foi de, 0,187 MPa nos pontos de fixação da peça. Observando agora o deslocamento, existe um valor irrisório de 0,008 mm, no centro da peça, o que, no fundo, só mostra que a peça não se deforma tendo em conta a carga a que está sujeita.

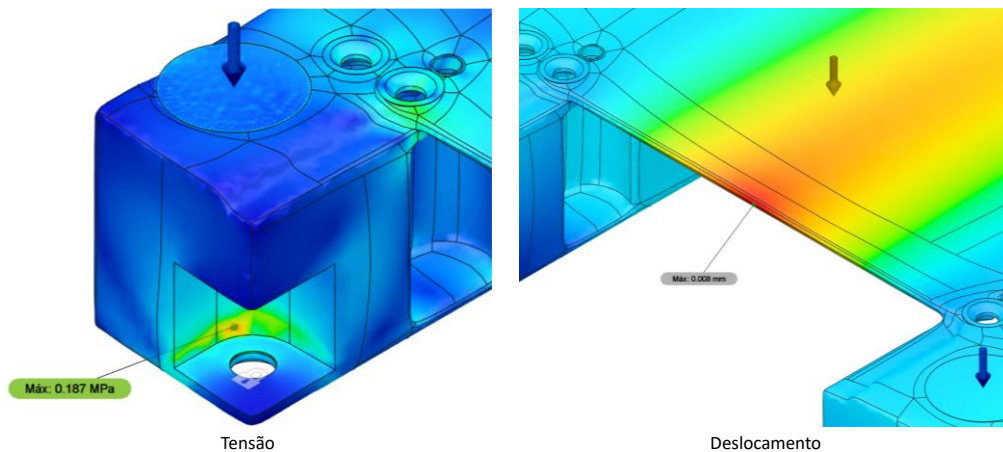


Figura 103 – Base bilhética resultados simulação 1

Pegando nos dois parâmetros analisados, é possível concluir que estamos perante uma peça passível de ser utilizada e que cumpre com os objetivos definidos inicialmente. Posto isto, deixa de ser necessário estudar o *design* 50, até porque, estaríamos perante um modelo mais pesado e cujo processo de fabrico, tendo em conta o material utilizado, é mais dispendioso. Para a base bilhética, a opção recai sobre uma peça executada pelo método de fabrico aditivo, utilizando o material PA 6.6, que apresenta uma massa de 1434 g (Figura 104).

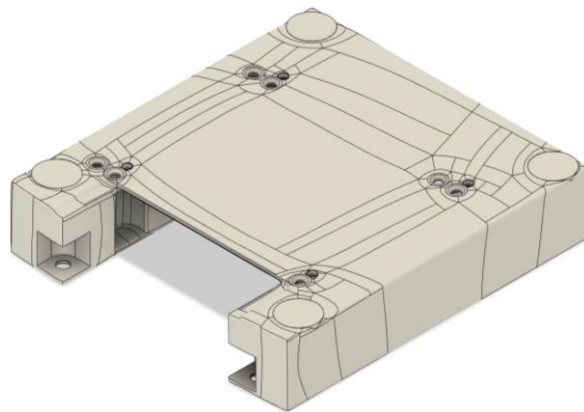


Figura 104 - Modelo final obtido para a base bilhética

Para a base bilhética, a opção recai sobre uma peça executada pelo método de fabrico aditivo, utilizando o material PA 6.6, que apresenta uma massa de 1434 g (Figura 104).

4.3.2. Resultados Otimização Topológica

Para completar o estudo à base bilhética, o componente foi sujeito a uma simulação de otimização de forma, para perceber se conseguiríamos melhores resultados, utilizando o material de origem.

A Figura 105 mostra a conclusão da simulação, onde é possível distinguir as áreas a eliminar, onde não houve criação de malha e as áreas a manter e a peça final, pronta a ser testada, com o propósito de entender se a mesma suporta os esforços a que vai estar sujeita.

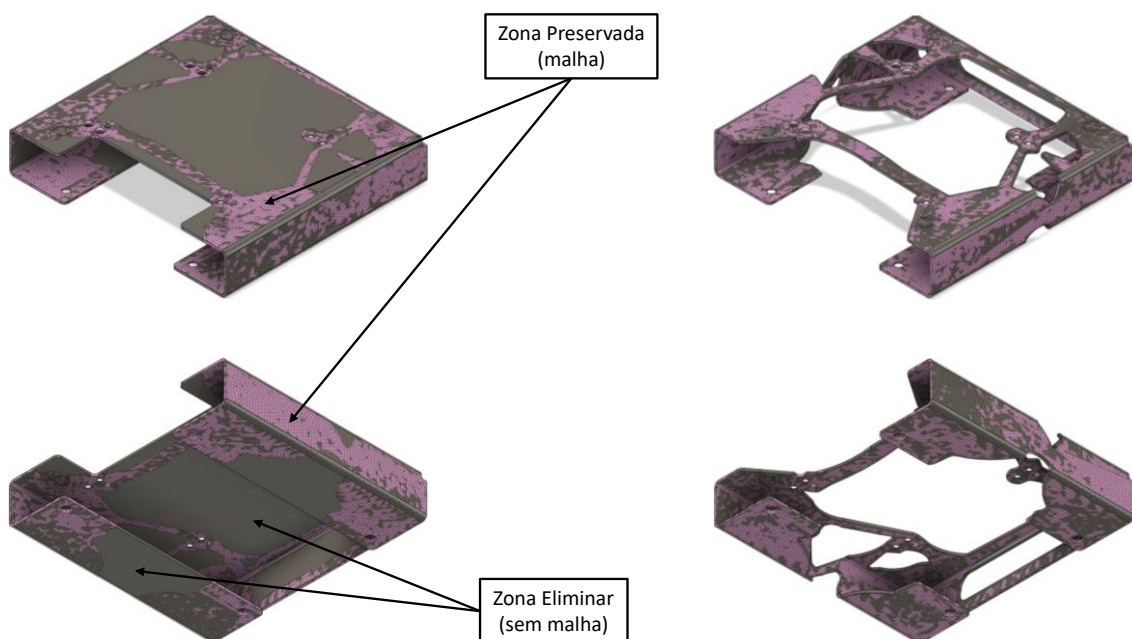


Figura 105 - Base bilhética modelo gerado e final

Como pode ser observado na figura anterior, o material foi removido, permitindo uma redução de massa de 1298,29 g (1790 g). À primeira vista, a redução é bastante interessante, o que demonstra o poder desta ferramenta. Contudo, foi efetuada uma simulação estática de tensões, para se comprovar a fiabilidade da ferramenta na obtenção de uma solução ótima cumprindo com as tensões previamente definidas.

Na sequência do que foi dito no parágrafo anterior, os resultados obtidos na simulação de tensões, encontram-se na Figura 106, de onde se pode concluir que o modelo é seguro para cumprir a sua função, dado que, no que toca às tensões, as máximas obtidas são de 27,8 MPa nos furos de fixação inferior, valor esse que se encontra muito longe do máximo admitido pelo material. Para complementar a informação, o deslocamento de 0,037 mm na parte superior da peça, só reforça a ideia de que estamos perante um componente eficaz para o seu propósito.

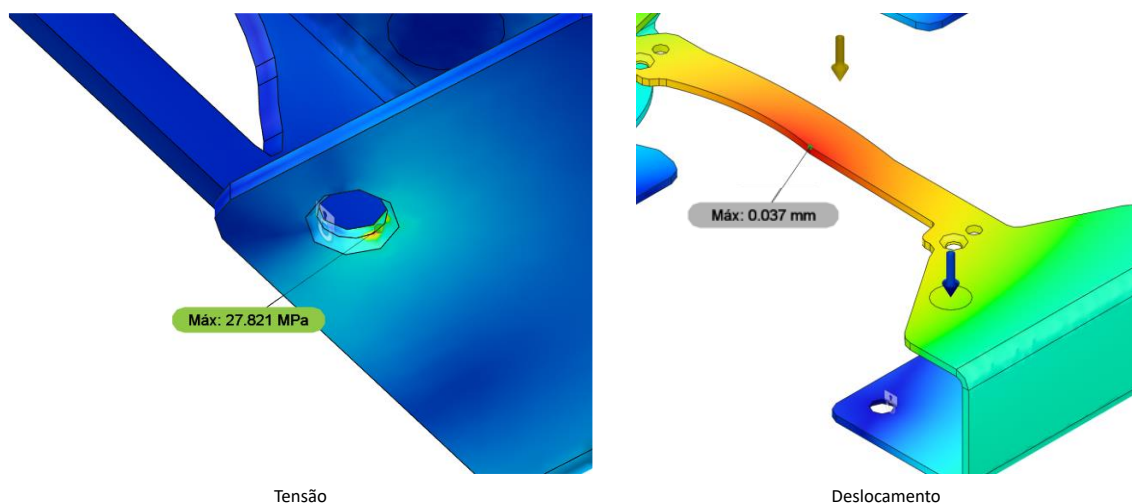


Figura 106 - Resultado simulação otimização base bilhética

Em suma, ambas as ferramentas são poderosas, aliás, como se foi comprovando ao longo deste trabalho, no entanto, e fazendo uma comparação mais concreta entre ambas, quando aplicadas à base bilhética, verifica-se que a otimização topológica, fornece resultados mais positivos, tanto a nível da massa, como do deslocamento. Aliado a isso, existe o facto de mantermos o material inicial e os respetivos processos de fabrico.

4.4. Caixa de Bateria

Neste ponto, vão ser analisados os resultados da última peça em estudo, quando submetida às duas ferramentas, *design* generativo e otimização topológica.

4.4.1. Resultados *Design* Generativo

Para não fugir à regra, a simulação foi efetuada tendo por base o mesmo objetivo das restantes.

Resultados e Discussão

Tanto os materiais como os processos de fabrico, foram mantidos, para manter a coerência dos estudos.

Para uma correta comparação dos resultados, foi simulada a peça original, tendo sido obtidos valores de tensão e deslocamento de 117,41 MPa e 0,17 mm, respetivamente.

Posto isto, foram gerados 28 resultados, conforme se pode confirmar pela Figura 107.

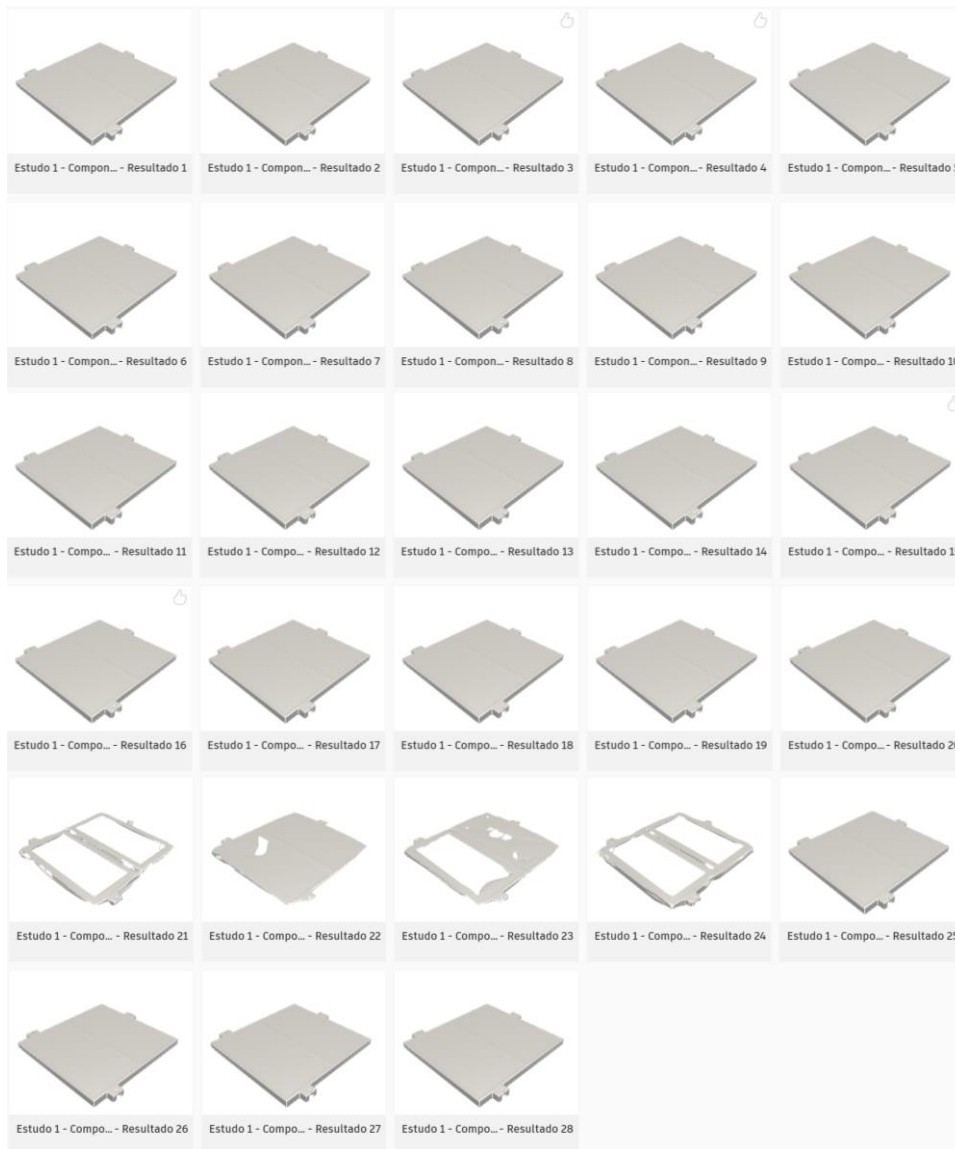


Figura 107 - Designs caixa bateria gerados

Para este caso em específico, o interesse do estudo passa por comprovar unicamente a força que esta ferramenta tem na modificação da forma e dos materiais utilizados, com vista à diminuição da massa, ignorando a rigidez. Como tal, não haverá uma seleção de 2 *designs* “favoritos” para serem sujeitos a uma simulação estática de tensões. E porquê?

Se analisarmos a função deste componente e a sua aplicação num autocarro, o mesmo tem o intuito de suportar/alocar as baterias adicionais. A sua rigidez seria um ponto importante, se a

peça estivesse suspensa e tivesse de suportar os 33 kg descarregados por cada bateria, no entanto, o componente encontra-se pousado e fixo mecanicamente sobre a cava de roda esquerda, uma estrutura em aço, bastante resistente. Como tal, o deslocamento encontra-se “bloqueado” e a cava é que irá resistir a todos os esforços.

Analisando agora os resultados, todos os obtidos, o mais favorável tendo em conta a diminuição da massa, é o resultado 14, uma peça criada por meio do fabrico aditivo, utilizando o ASA como matéria-prima, dando origem a uma base de baterias com 647 g, uma redução de cerca de 2 kg. O componente obtido encontra-se representado na Figura 108 após um arranjo superficial, para garantir a homogeneidade da superfície.

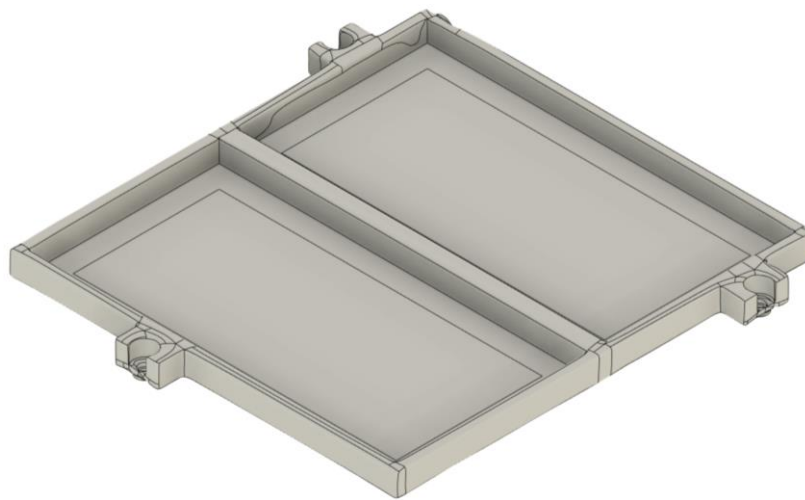


Figura 108 - Design final da caixa de baterias

Como é possível observar, a ferramenta gerou uma peça muito semelhante à original, alterando, apenas, a espessura e as zonas de fixação, simplesmente para dar uma maior consistência. Uma vez que se trata de um polímero, para evitar potenciais danos provocados pelo aperto dos parafusos e por forças ao corte, faz todo o sentido aplicar insertos metálicos nos pontos de fixação.

4.4.2. Resultados Otimização topológica

Uma vez gerados os *designs* generativos, resta aplicar a otimização topológica e, no final, perceber qual das duas ferramentas se mostra mais eficaz.

Apenas para lembrar, a otimização topológica tem como base o material original do componente, neste caso, o aço S355J2 e promove um rearranjo superficial, eliminando todas as zonas desnecessárias, retirando massa ao componente.

Mais uma vez, foram mantidos os critérios de fixação e de carga utilizados até ao momento na análise deste elemento e o estudo foi gerado, dando origem ao modelo representado na Figura 109, modelo esse que se encontra em bruto, ou seja, que apresenta tanto as zonas a manter (com malha) como as zonas a eliminar (sem malha).

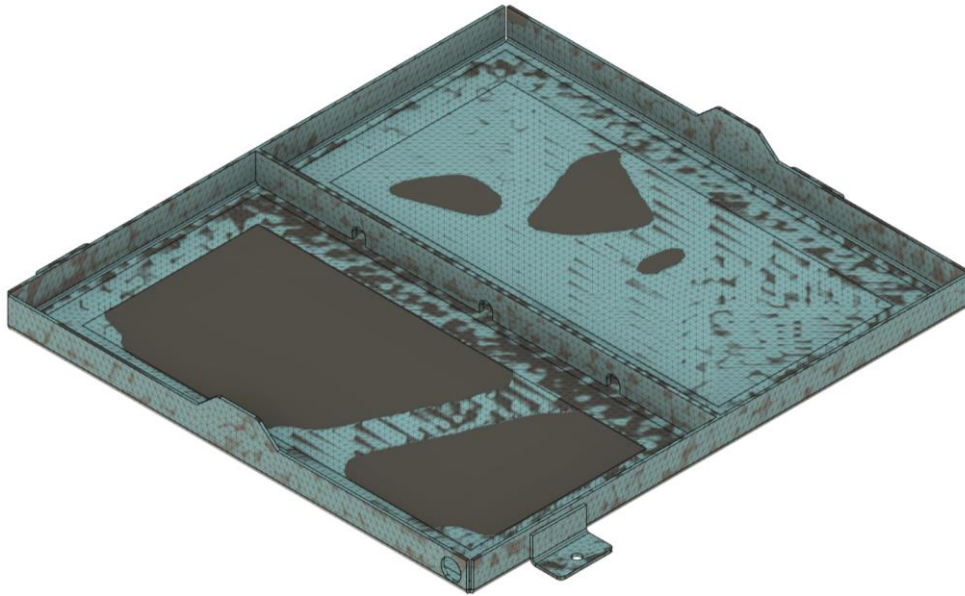


Figura 109 - Modelo inicial otimização topológica base baterias

Após removido o material excedente, foi obtido um modelo final em aço S355J2, com uma massa de 2157 g, conforme se pode verificar na Figura 110.

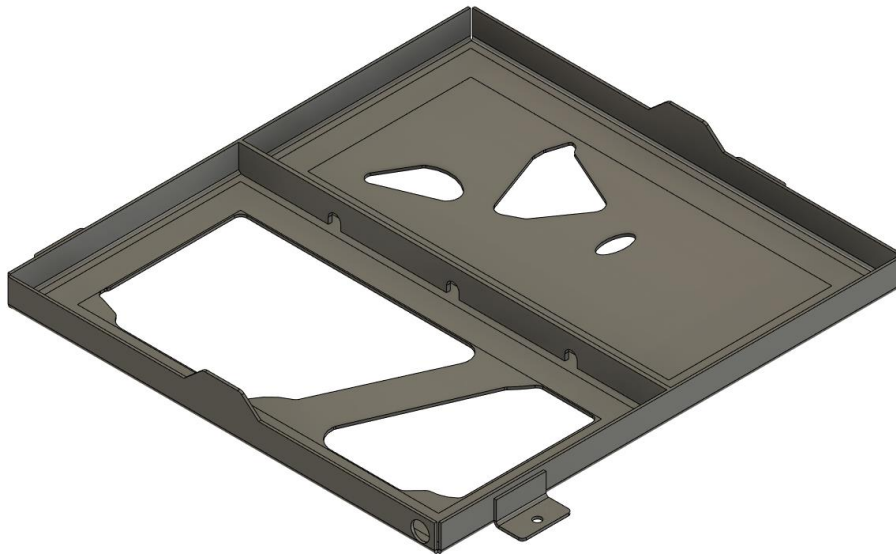


Figura 110 - Modelo final otimização topológica base baterias

Em suma, e tendo conta os resultados das duas ferramentas, pode-se afirmar que o *design* generativo se tornou mais eficaz, dando origem a uma peça mais leve e capaz de cumprir com a sua função.

5. Conclusão

Neste 5º e último capítulo, irão ser apresentadas as conclusões finais do trabalho, bem como, propostas para a continuação deste estudo.

5.1. Conclusões finais

Em suma, e como foi possível comprovar, o *design* generativo e a otimização topológica, são duas ferramentas bastante eficientes que, efetivamente, permitem alterar a forma/*design* das peças, ao ponto de reduzir a sua massa e aumentar a rigidez.

Desta forma e para que seja perceptível o poder dos dois métodos em análise, nas Tabela 12, é possível verificar a síntese de todos os resultados.

Conclui-se que, de facto, estas novas técnicas de desenvolvimento trazem ganhos para o setor automóvel, especialmente quando se fala no *design* generativo, que mostrou ser mais eficiente que a otimização topológica, uma vez que, em praticamente todas as peças, obteve uma maior percentagem de redução.

É importante salientar que, para manter os critérios de rigidez, nem sempre foi possível cumprir o objetivo da massa (reduzir em pelo menos 40%), o que faz com que, pelo menos no caso da diagonal, não tenha sido possível cumprir com o definido. No entanto, nenhuma das peças ultrapassou as tensões limite elásticas dos respetivos materiais, sendo garantida a integridade do componente durante o seu funcionamento. Relativamente aos resultados dos deslocamentos, tirando, mais uma vez, a componente diagonal, todos os componentes estudados garantiram valores de deslocamento idênticos aos das peças originais.

Para complementar tudo o que foi dito acima e as informações presentes nas tabelas seguintes, com o *design* generativo, foi possível uma redução total de 4749,52 g e com a otimização topológica, uma redução de 2890,71 g. É natural que a diferença na otimização topológica seja menor, pelo simples facto de a ferramenta não ter um grau de liberdade de formas tão elevado. Estes valores são insignificativos quando se visualiza o autocarro como um todo, no entanto, aplicando esta metodologia a mais componentes, será possível obter uma redução mais eloquente.

Conclusão

Tabela 12 – Síntese dos melhores resultados da peça diagonal

Peça	Material	Processo fabrico	Massa un./total 21 un. (g)	Redução (%)
Original	AW-1050A-H24	Corte laser, quinagem e soldadura	116,81/2453,01	-
Design generativo	PA 6.6	Injeção	87/1827	25,5
Otimização topológica	AW-1050A-H24	Corte laser, quinagem e soldadura	99,81/2096,01	14,6

Tabela 13 – Síntese dos melhores resultados da peça suporte limpa para-brisas

Peça	Material	Processo fabrico	Massa (g)	Redução (%)
Original	S355 J2	Corte laser e quinagem	2241	-
Design generativo	AlSi12	Fabrico aditivo	1261	43,7
Otimização topológica	S355 J2	Corte laser e quinagem	1238	44,8

Tabela 14 – Síntese dos melhores resultados da peça base bilhética

Peça	Material	Processo fabrico	Massa (g)	Redução (%)
Original	S355 J2	Corte laser, quinagem e soldadura	3088,29	-
Design generativo	PA 6.6	Fabrico aditivo	1434	53,6
Otimização topológica	S355 J2	Corte laser, quinagem e soldadura	1790	42

Tabela 15 – Síntese dos melhores resultados da peça base baterias

Peça	Material	Processo fabrico	Massa (g)	Redução (%)
Original	S355 J2	Corte laser, quinagem e soldadura	2729,42	-
Design generativo	ASA	Fabrico aditivo	647	76,3
Otimização topológica	S355 J2	Corte laser, quinagem e soldadura	2157	21

Para finalizar, e entrando mais numa vertente de gestão, é importante aliar estas reduções de massas com novas tecnologias de desenvolvimento aos respetivos custos e, para isso, foram elaborados os custos de produção de duas peças, a diagonal e a base de bilhética. No caso da diagonal, a peça pode ser obtida por 1,22€ (ANEXO A) por fabrico aditivo sem contar com pós processamentos e a base, pode ser produzida pelo mesmo processo por 10,51€, mais uma vez, sem pós processamentos. Comparando estes valores com os valores de obtenção das peças originais, 2,85€ (ANEXO B) e 20€, respetivamente, através de corte laser, quinagem e soldadura, podemos concluir que estamos perante uma boa solução para o futuro do mundo automóvel. No entanto, é importante referir que, certos processos de fabrico, como é o caso da injeção, devido à necessidade de criação de um molde, vão encarecer mais o produto, contudo, se as quantidades de produção forem elevadas, como o caso que estamos a analisar, onde as peças são comuns a todos os carros e o volume de produção é de cerca de 100 carros por ano, estes processos acabam por compensar e por ser uma mais-valia.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Neste trabalho muito ficou por fazer. O mesmo enriquecia se todas as peças definidas fossem produzidas e testadas num autocarro, a fim de verificar a resistência, durabilidade, funcionamento e custo das mesmas. Se estes testes tivessem sido feitos, a veracidade dos resultados podia ter sido comprovada mais eficazmente.

Uma vez que as duas ferramentas nunca fornecem um resultado perfeito, num trabalho futuro as peças podiam ser novamente alteradas e testadas, em busca da melhoria contínua, sendo o objetivo final alterado. Por exemplo, em vez de pelo menos 40% de redução de massa, esse valor poderia ser aumentado para 50% ou até mesmo 60%.

Um dos trabalhos futuros seria a aplicação das ferramentas em análise noutras peças não estruturais de autocarros urbanos, para que a redução de massa seja mais significativa no seu todo.

Conclusão

Referências

- [1] A. Zdobytskyi, M. Lobur, R. Panchak, R. Sika, and K. Kalinowski, "Increasing the strength of materials by topological optimization methods," in *2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2021 - Proceedings*, Feb. 2021, pp. 6–9, doi: 10.1109/CADSM52681.2021.9385222.
- [2] H. Lasi, P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [3] S. Khan and M. J. Awan, "A generative design technique for exploring shape variations," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 38, pp. 712–724, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.aei.2018.10.005.
- [4] M. S. Muhammad, L. Kerbache, and A. Elomri, "Potential of additive manufacturing for upstream automotive supply chains," *Supply Chain Forum*, vol. 23, no. 1, pp. 1–19, 2022, doi: 10.1080/16258312.2021.1973872.
- [5] M. Pollák and J. Török, "Use of Generative Design Tools in the Production of Design Products using 3D Printing Technology," *TEM J.*, vol. 11, no. 1, pp. 249–255, Feb. 2022, doi: 10.18421/TEM111-31.
- [6] S. Krish, "A practical generative design method," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 43, no. 1, pp. 88–100, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.cad.2010.09.009.
- [7] S. C. Chase, "Generative design tools for novice designers: Issues for selection," in *Automation in Construction*, Dec. 2005, vol. 14, no. 6, pp. 689–698, doi: 10.1016/j.autcon.2004.12.004.
- [8] K. Shea, R. Aish, and M. Gourtovaia, "Towards integrated performance-driven generative design tools," *Autom. Constr.*, vol. 14, no. 2 SPEC. ISS., pp. 253–264, 2005, doi: 10.1016/j.autcon.2004.07.002.
- [9] M. Pollak, J. Kascak, M. Torokova, M. Kocisko, and J. Dobransky, "Topological Optimization of a Supporting Part of a 3D Printer Pad," *Manuf. Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 492–499, 2020, doi: 10.21062/mft.2020.067.
- [10] S. Jang, S. Yoo, and N. Kang, "Generative Design by Reinforcement Learning: Enhancing the Diversity of Topology Optimization Designs," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 146, p. 103225, 2022, doi: 10.1016/j.cad.2022.103225.
- [11] T. Markovits and B. Szederkényi, "Investigation of generative design for powder bed fusion technology in case of Formula Student race car components using Ti6Al4V alloy," *J. Manuf. Process.*, vol. 80, no. June, pp. 220–231, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.05.058.
- [12] N. A. Kallioras and N. D. Lagaros, "DzAI \mathbb{N} : Deep learning based generative design," *Procedia Manuf.*, vol. 44, pp. 591–598, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.251.
- [13] D. Mun, S. Han, J. Kim, and Y. Oh, "A set of standard modeling commands for the history-based parametric approach," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 35, no. 13, pp. 1171–1179, 2003, doi: 10.1016/S0010-4485(03)00022-8.
- [14] M. Leary, "Generative design," *Des. Addit. Manuf.*, no. Chapter 2, pp. 203–222, 2020, doi: 10.1016/b978-0-12-816721-2.00007-5.

Referências

- [15] Z. Jiang, H. Wen, F. Han, Y. Tang, and Y. Xiong, "Data-driven generative design for mass customization: A case study," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 54, no. October, p. 101786, 2022, doi: 10.1016/j.aei.2022.101786.
- [16] S. Ahmed and M. K. Gupta, "Investigations on motorbike frame material and comparative analysis using generative design and topology optimization," *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 1440–1446, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.040.
- [17] O. Sigmund and K. Maute, "Topology optimization approaches: A comparative review," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 48, no. 6, pp. 1031–1055, 2013, doi: 10.1007/s00158-013-0978-6.
- [18] J. Wu, O. Sigmund, and J. P. Groen, "Topology optimization of multi-scale structures: a review," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 63, no. 3, pp. 1455–1480, 2021, doi: 10.1007/s00158-021-02881-8.
- [19] J. Mesicek, M. Pagac, J. Petru, P. Novak, J. Hajnys, and K. Kutiova, "Topological optimization of the formula student bell crank," *MM Sci. J.*, vol. 2019, no. October, pp. 2964–2968, 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019_10_201893.
- [20] L. Meng *et al.*, "From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 27, no. 3, pp. 805–830, 2020, doi: 10.1007/s11831-019-09331-1.
- [21] A. Review, "Applied sciences Design and Optimization of Lattice Structures : A Review," 2020.
- [22] S. Qian, W. Wang, C. Ge, S. Lou, E. Miao, and B. Tang, "Topology optimization of fluid flow channel in cold plate for active phased array antenna," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 57, no. 6, pp. 2223–2232, 2018, doi: 10.1007/s00158-017-1852-8.
- [23] X. Huang and Y. M. Xie, "A further review of ESO type methods for topology optimization," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 41, no. 5, pp. 671–683, 2010, doi: 10.1007/s00158-010-0487-9.
- [24] T. Theodoridis and J. Kraemer, *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title.*
- [25] G. I. N. Rozvany, "Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 21, no. 2, pp. 90–108, 2001, doi: 10.1007/s001580050174.
- [26] Y. Tang, A. Kurtz, and Y. F. Zhao, "Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) based design method for lattice structure to be fabricated by additive manufacturing," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 69, pp. 91–101, 2015, doi: 10.1016/j.cad.2015.06.001.
- [27] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals," *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371–392, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- [28] F. P. W. Melchels, J. Feijen, and D. W. Grijpma, "A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering," *Biomaterials*, vol. 31, no. 24, pp. 6121–6130, 2010, doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Ricardo Emanuel Teixeira Fraga

ISEP, Porto, 14 de junho de 2024

Anexo A

Color Scheme

Line Type	Time	Percent	Used filament	Display
Inner wall	19m41s	10.1%	3.58 m 9.05 g	✓
Outer wall	45m5s	23.1%	3.29 m 8.32 g	✓
Overhang wall	25s	0.2%	0.03 m 0.08 g	✓
Sparse infill	41m4s	21.4%	3.78 m 9.55 g	✓
Internal solid infill	22m54s	11.8%	2.46 m 6.21 g	✓
Top surface	2m5s	1.1%	0.10 m 0.25 g	✓
Bottom surface	1m7s	0.6%	0.08 m 0.20 g	✓
Bridge	1m56s	1.0%	0.21 m 0.54 g	✓
Gap infill	1m2s	0.5%	0.02 m 0.05 g	✓
Brim	15m21s	7.9%	1.11 m 2.80 g	✓
Support	3m35s	1.8%	0.30 m 0.75 g	✓
Support interface	2m47s	1.4%	0.15 m 0.37 g	✓
Custom	6m57s	3.6%	0.03 m 0.08 g	✓
Travel	30m26s	15.6%		✓
Retract				✓
Unretract				✓
Wipe				✓
Seams				✓

Total Estimation	
Total Filament:	15.14 m 38.24 g
Model Filament:	14.70 m 37.12 g
Cost:	1.22
Prepare time:	6m41s
Model printing time:	3h15m
Total time:	3h15m

Anexo B

Printer
Bambu Lab P1S 0.4 nozzle

Plate type
Textured PEI Plate

Filament
 1 Bambu ASA @BBL_X1...
 2 Bambu PETG Basic
 3 Bambu ASA @BBL_X1...
 4 Bambu ASA @BBL_X1...
 5 Bambu TPU 95A

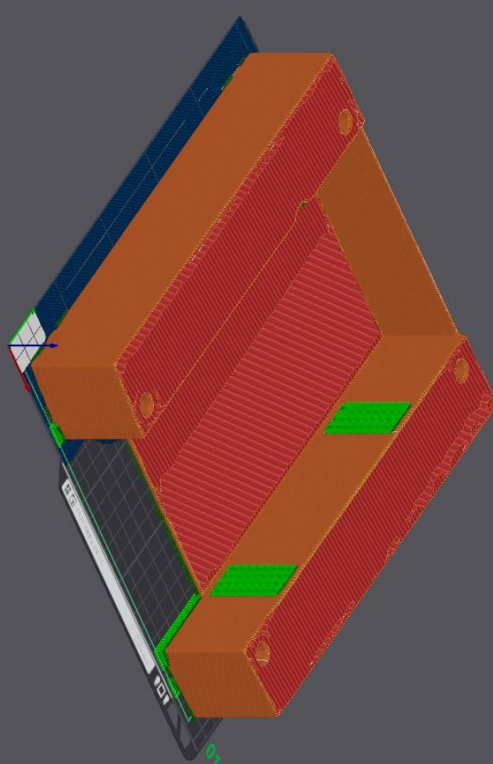
Process Global Objects Advanced

Quality **Strength** Speed Support Others

Walls
Detect thin wall 2

Top/bottom shells
 Top surface pattern: Monotonic...
 Top shell layers: 6 mm
 Top shell thickness: 1 mm
 Bottom surface pattern: Monotonic
 Bottom shell layers: 4 mm
 Bottom shell thickness: 0 mm
 Internal solid infill pattern: Rectilinear

Sparse Infill
 Sparse infill density: 15 %
 Sparse infill pattern: Gyroid
 Length of sparse infill anchor: 400% mm or %
 Maximum length of sparse infill anchor: 20 mm or %



Color Scheme Line Type

Line Type	Time	Percent	Used filament	Display
Inner wall	1h2m	5.5%	13.22 m 33.38 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Outer wall	2h26m	13.0%	12.26 m 31.02 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Overhang wall	2m2s	0.2%	0.15 m 0.38 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Sparse infill	9h50m	52.5%	58.29 m 14.721 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Internal solid infill	3h52m	10.0%	25.31 m 63.91 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Top surface	19m37s	1.7%	3.05 m 7.73 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Bottom surface	4m8s	0.4%	0.56 m 1.40 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Bridge	1h16m	6.7%	8.52 m 21.53 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Gap infill	1m23s	0.1%	0.02 m 0.06 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Brim	11m1s	1.0%	0.97 m 2.44 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Support	29m4s	2.7%	6.01 m 15.18 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Support interface	17m42s	1.6%	1.63 m 4.11 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Custom	6m58s	0.6%	0.03 m 0.08 g	<input checked="" type="checkbox"/>
Travel	45m79s	4.0%		<input checked="" type="checkbox"/>
Retract				<input checked="" type="checkbox"/>
Unretract				<input checked="" type="checkbox"/>
Wipe				<input checked="" type="checkbox"/>
Seams				<input checked="" type="checkbox"/>

Total Estimation
 Total Filament: 130.05 m 328.45 g
 Model Filament: 122.41 m 309.15 g
 Cost: 10.51
 Prepare time: 6m42s
 Model printing time: 18h57m
 Total time: 18h44m

Error: A G-code path goes beyond plate boundaries.

Configuration can update now.

Processing model: Base bihitec PA 6.6 step with more than 1M triangles could be slow. It is highly recommended to simplify the model.

Glossário

Isotrópico

Reage da mesma forma em todas as direções.

Anisotrópico

Reage de forma diferente dependendo da direção.

Frontbox

Aparelho situado sob o tablier, que bombeia o ar para a zona do motorista pelas grelhas de ar.