



**Henrique Manuel Afonso Barata**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Projeto de componentes em alumínio injetado – contributo para a melhoria da configuração geométrica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado,  
FCT-UNL

Coorientador: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins, Professor  
Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Manuel Vicente Fradinho,  
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Arguentes: Professor Doutor Marco Alexandre de Oliveira Leite,  
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Engenheiro Nuno Alexandre de Carvalho Guerin,  
Hanon Systems Portugal S.A.

Vogais: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira  
Martins, Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2018**





**Projeto de componentes em alumínio injetado – contributo para a melhoria da configuração geométrica**

Copyright © Henrique Manuel Afonso Barata, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao orientador Professor Doutor António Mourão pela oportunidade de realizar esta dissertação, pela sua disponibilidade para me ajudar ao longo do trabalho e pelos conhecimentos transmitidos.

Do mesmo modo, deixo o meu agradecimento ao coorientador Professor Doutor Rui Martins pelo apoio e esclarecimento de dúvidas, por vezes várias vezes no mesmo dia. Agradeço-lhe pelo seu auxílio e pelas críticas construtivas, que ajudaram bastante na evolução do trabalho realizado.

Agradeço igualmente ao Engenheiro Nuno Guérin da Hanon Systems Portugal S.A, pela oportunidade e ao Engenheiro Hugo Madeira pela disponibilidade, simpatia e paciência demonstrada ao me auxiliar durante a dissertação.

Gostaria de agradecer à minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã pelo seu apoio durante estes longos cinco anos e em todas as fases da minha vida.

Por fim, agradeço aos meus amigos Gonçalo Vieira, Joana Raminhos, Rui Alface Santos, Tiago Rodrigues, João Chambel Santos, Ivo Marques e Beatriz Antunes pelo seu apoio, e pelos bons momentos proporcionados que contribuíram para a descontração, importante também para a superação dos momentos mais enervantes da realização da dissertação.

A todos, muito obrigado!



# Resumo

O relevo atribuído ao projeto para a redução da massa dos componentes por parte dos fabricantes da indústria automóvel é cada vez maior; isto devido à crescente exigência imposta pela necessidade de serem concebidas soluções mais eficientes no consumo de combustível e que permitam a diminuição das emissões de gases poluentes.

As principais abordagens consideradas para o cumprimento do objetivo da redução da massa passam pela utilização de materiais mais leves e pela otimização da configuração geométrica. Nesta dissertação, com foco apenas na segunda abordagem referida, procura-se estabelecer uma metodologia, que, apoiada na utilização de *software* de engenharia, disponível comercialmente, permita a otimização da configuração geométrica de componentes para a redução da sua massa mantendo a sua funcionalidade.

Como caso de aplicação, foi estudado um componente de alumínio injetado presente num compressor elétrico do sistema de ar-condicionado de um automóvel. A partir da modelação tridimensional da peça no *software* de desenho assistido por computador *Solidworks*, realizou-se a análise estrutural pelo método dos elementos finitos através do módulo *Solidworks Simulation*, tendo sido identificadas as zonas da peça que apresentavam possibilidade de melhoria. Com isto e, utilizando a ferramenta *Design Study*, também presente no programa *Solidworks*, foi feita a otimização da configuração geométrica do componente.

Finalizando, como resultado, respeitando os requisitos funcionais, foi obtida uma configuração geométrica alternativa que permite a redução da massa do componente em 22% e a diminuição da espessura da parede do corpo principal do mesmo, com o intuito de redução da ocorrência de defeitos de fundição.

**Termos-chave:** Projeto de componentes; Melhoria da configuração geométrica; Redução de massa; *Solidworks*; *Design Study*.



# Abstract

The emphasis given by the automobile manufacturers on lightweight design continues to increase. This is due to the need to devise fuel efficient solutions, as well as environmentally sustainable designs.

The main approaches to accomplish these goals are the use of lighter materials and the design optimization of the components. In this dissertation, the focus is on the second approach. Hence, a methodology based on the use of a computer-aided engineering software was sought to allow the geometric optimization of components' features in order to achieve weight reduction while functionality is preserved.

Specifically, contributions for the weight reduction of an aluminium die-cast component belonging to an electric compressor, present in a car's climate control system, were studied during the elaboration of this dissertation. A three-dimensional model of the part was generated using Solidworks computer-aided design software; then, a finite elements analysis was carried out using the Solidworks Simulation module and the features susceptible to be optimised were identified. Finally, and using the Design Study tool of Solidworks, the geometric optimization of the component was performed.

As a result, a new design for the part under study was obtained, which allowed a weight reduction of 22% and the fulfilment of design specifications, like the reduction of the main body's wall thickness, with the purpose of reducing the occurrence of die-casting defects.

**Keywords:** Components design; Geometric optimization of components; Weight reduction; Solidworks; Design Study.



# Índice de Conteúdos

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1-	ENQUADRAMENTO.....	1
1.2-	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	4
1.3-	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
2.1-	ESTUDOS COMPARATIVOS .....	9
<b>3</b>	<b>OTIMIZAÇÃO ATRAVÉS DO SOFTWARE SOLIDWORKS .....</b>	<b>17</b>
3.1-	INTRODUÇÃO.....	17
3.2-	O MÓDULO <i>DESIGN STUDY</i> PARA A OTIMIZAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DE COMPONENTES.....	18
3.3-	RELAÇÃO DO PLANEAMENTO DE EXPERIÊNCIAS COM A FERRAMENTA <i>DESIGN STUDY</i> .....	21
3.3.1-	<i>Introdução</i> .....	21
3.3.2-	<i>Planeamento de experiências</i> .....	21
3.3.3-	<i>Modelo de Planeamento de Experiências utilizado na ferramenta Design Study</i> .....	23
3.3.3.1-	<i>Planeamento de experiências de Box-Behnken</i> .....	23
3.4-	UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA <i>DESIGN STUDY</i> PARA A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO .....	24
3.4.1-	<i>Introdução</i> .....	24
3.4.2-	<i>Definição das variáveis de projeto</i> .....	25
3.4.3-	<i>Definição dos Constrangimentos</i> .....	27
3.4.4-	<i>Definição da função objetivo</i> .....	28
<b>4</b>	<b>DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....</b>	<b>31</b>
4.1-	MODELAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO COMPONENTE <i>MOTORHOUSING</i> .....	31
4.2-	MATERIAL .....	34
4.3-	ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	35
4.4-	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA .....	39
4.5-	DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO INTERNA MÁXIMA .....	41
<b>5</b>	<b>OTIMIZAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DO <i>MOTORHOUSING</i>.....</b>	<b>43</b>
5.1-	IDENTIFICAÇÃO DAS ZONAS COM POSSIBILIDADE DE MELHORIA PARA A OTIMIZAÇÃO .....	43
5.2-	OTIMIZAÇÃO DOS RASGOS DA FLANGE .....	44
5.3-	OTIMIZAÇÃO DE UM ANEL DE REFORÇO PARA A ZONA DA FLANGE .....	47
5.4-	OTIMIZAÇÃO DA ESPESSURA DE PAREDE DO CORPO.....	50
5.5-	OTIMIZAÇÃO DOS RASGOS DA FLANGE PARA A NOVA CONFIGURAÇÃO.....	56
5.6-	OTIMIZAÇÃO DA ESPESSURA DE PAREDE DA FLANGE.....	58
5.7-	ALTERAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO TOPO .....	60
5.7.1-	<i>Criação de rasgos no topo</i> .....	60

5.7.2- <i>Diferentes alternativas para a configuração do topo</i> .....	64
5.7.3- <i>Redução da espessura de parede do topo</i> .....	66
<b>6 METODOLOGIA</b> .....	<b>71</b>
6.1 – CONSIDERAÇÕES TOMADAS NA MODELAÇÃO CAD PARA O USO DA FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO .....	71
6.2 – SEQUÊNCIA PROPOSTA PARA A MODELAÇÃO .....	76
<b>7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>85</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>87</b>

# Índice de Figuras

Figura 1.1. Relação entre o peso do automóvel e as suas emissões de CO <sub>2</sub> por milha. ....	1
Figura 1.2. Custo total da produção em função da redução do peso dos veículos .....	3
Figura 1.3. Compressor elétrico modelado tridimensionalmente.....	4
Figura 1.4. Os cinco componentes abrangidos pelo sistema de climatização de um automóvel.....	5
Figura 1.5. <i>Motorhousing</i> , <i>Centerhousing</i> e <i>Rearhead</i> , da esquerda para a direita respetivamente. ....	5
Figura 2.1. a) Modelo parametrizado da secção transversal da jante e b) aplicação do modelo de elementos finitos.....	10
Figura 2.2. Modelo de elementos finitos da estrutura tubular do carro.....	10
Figura 2.3. Otimização da espessura da estrutura do encosto de um banco de um automóvel. ....	11
Figura 2.4. Otimização topológica de um suporte da suspensão de um camião. ....	12
Figura 2.5. Otimização de uma manga de eixo de um automóvel.....	13
Figura 2.6. Vista em corte do volante de inércia com os 4 parâmetros avaliados assinalados a vermelho. ....	14
Figura 2.7. Modelação tridimensional do braço robótico.....	14
Figura 3.1. Seleção de cotas (assinaladas a vermelho) através da interface gráfica do <i>Solidworks</i> , para serem utilizadas como variáveis de projeto.....	19
Figura 3.2. Interface gráfica do <i>Solidworks</i> que permite a formulação do problema de otimização. ...	19
Figura 3.3. Exemplo demonstrativo da operação do módulo <i>Design Study</i> . Avaliação de diferentes cenários para a configuração geométrica dos rasgos em torno de um cilindro. ....	20
Figura 3.4. a) Organização do planeamento 2 <sup>3</sup> pela ordem de Yates e b) representação geométrica ...	22
Figura 3.5. Exemplo de definição das variáveis de projeto na interface gráfica do <i>SolidWorks</i> .....	26
Figura 3.6. Exemplo de definição dos constrangimentos na interface gráfica do <i>SolidWorks</i> .....	28
Figura 3.7. Exemplo de definição da função objetivo na interface gráfica do <i>SolidWorks</i> .....	29
Figura 4.1. <i>Motorhousing</i> , na sua configuração geométrica inicial. ....	31
Figura 4.2. Fluxograma das etapas cumpridas de forma a determinar o comportamento funcional do componente na sua configuração original. ....	32
Figura 4.3. Vista em perspetiva isométrica do <i>Motorhousing</i> modelado em 3D. ....	32
Figura 4.4. Vistas laterais e frontal do <i>Motorhousing</i> modelado tridimensionalmente.....	33
Figura 4.5. Divisão em zonas e nomenclatura utilizada na sua identificação. ....	33
Figura 4.6. Vista em corte do <i>Motorhousing</i> .....	34
Figura 4.7. Condição de apoio para a análise estrutural do <i>Motorhousing</i> . ....	35
Figura 4.8. Modelação da montagem do compressor e pressões internas consideradas para cada componente da cobertura.....	36
Figura 4.9. Vista em corte da montagem e pressões internas.....	36

Figura 4.10. Esforços aplicados, pressão interna representada pelas setas a vermelho e força aplicada na flange assinalada a azul. ....	37
Figura 4.11. Diagrama tensão-extensão típico para um parafuso, identificando a tensão de prova $S_p$ , tensão de cedência $S_y$ e tensão de rotura $S_{ut}$ . ....	37
Figura 4.12. Distribuição das tensões de Von Mises induzidas no <i>Motorhousing</i> . ....	38
Figura 4.13. Gráfico da análise de convergência. ....	40
Figura 4.14. Malha de elementos finitos criada para a simulação numérica do <i>Motorhousing</i> . ....	40
Figura 4.15. Relação tensão-extensão para diferentes níveis de pressão interna. ....	42
Figura 5.1. Identificação das zonas com possibilidade de melhoria para a realização da otimização. .	43
Figura 5.2. a) Configuração inicial da flange e b) configuração ótima. ....	45
Figura 5.3. a) Distribuição das tensões de Von Mises na configuração inicial da geometria da flange e b) na configuração ótima. ....	46
Figura 5.4. a) Configuração original e b) configuração com anel de reforço. ....	47
Figura 5.5. Esboço que define o anel de reforço. ....	47
Figura 5.6. a) Configuração inicial do anel de reforço e b) configuração ótima. ....	48
Figura 5.7. Tensão de Von Mises ao longo do componente com anel de reforço. ....	49
Figura 5.8. Zona do corpo do componente alvo de redução de espessura de parede. ....	50
Figura 5.9. a) Corpo com espessura de parede de 5 mm e b) anéis de reforço. ....	51
Figura 5.10. Apoio fixo utilizado na análise estrutural base. ....	51
Figura 5.11. Fluxograma das etapas cumpridas para a otimização da massa e da redução da espessura de parede do corpo. ....	52
Figura 5.12. a) Configuração ótima para os anéis de reforço e b) resultado para a distribuição de tensões de Von Mises. ....	53
Figura 5.13. <i>Motorhousing</i> com espessura de parede do corpo de 5 mm e anéis de reforço. ....	54
Figura 5.14. Distribuição das tensões de Von Mises induzidas no <i>Motorhousing</i> com espessura de parede do corpo de 5 mm e anéis de reforço. ....	55
Figura 5.15. a) Configuração ótima para a sobreposição dos estudos de otimização da espessura de parede do corpo e da otimização da geometria dos rasgos da flange e b) acrescento dos aspetos geométricos retirados para simplificação. ....	56
Figura 5.16. Resultado para a distribuição das tensões de Von Mises da configuração ótima dos rasgos da flange. ....	57
Figura 5.17. a) Vista em corte da configuração original e b) vista em corte da configuração obtida. ..	58
Figura 5.18. a) Parede da flange e b) variável de projeto utilizada na sua otimização, assinalada pelo retângulo azul. ....	58
Figura 5.19. Zona do topo do componente alvo do estudo apresentado nesta secção, assinalada a vermelho. ....	60
Figura 5.20. Esboço a partir da qual são criados os rasgos do topo. ....	61

Figura 5.21. a) Configuração com rasgos no topo e b) resultado da distribuição de tensões de Von Mises induzidas no componente. ....	62
Figura 5.22. a) Vista em corte da configuração inicial e b) vista em corte da configuração com rasgos no topo. ....	63
Figura 5.23. a) Configuração original do topo, b) configuração alternativa para o topo em forma triangular e c) configuração alternativa para o topo em forma de estrela. ....	64
Figura 5.24. a) Superfícies funcionais do <i>Motorhousing</i> , assinaladas a vermelho; b) superfícies funcionais da tampa do <i>Inverter Carrier</i> assinaladas a azul; c) montagem entre as duas peças. ...	65
Figura 5.25. Resultado na distribuição das tensões de Von Mises ao longo do componente para as novas configurações geométricas do topo. ....	65
Figura 5.26. Assinaladas por circunferências a cor vermelha as zonas com efeitos nefastos no processo de injeção obtidas em 5.7.1. ....	66
Figura 5.27. a) Vista em corte do componente original e b) vista em corte da nova configuração com espessura de parede reduzida. ....	67
Figura 5.28. a) Configuração com o topo triangular e redução de espessura e b) resultado para a distribuição de tensões de Von Mises induzidas no <i>Motorhousing</i> . ....	68
Figura 5.29. a) Configuração com o topo em estrela e redução da espessura de parede e b) resultado para a distribuição de tensões de Von Mises induzidas no <i>Motorhousing</i> . ....	68
Figura 5.30. Desenho que define o topo em forma de estrela. ....	69
Figura 5.31. Configuração geométrica original do componente (1,126 kg), à esquerda; configuração obtida no estudo de otimização (0,878 kg), à direita. ....	70
Figura 5.32. Sumário do estudo de otimização da configuração geométrica do componente <i>Motorhousing</i> . ....	70
Figura 6.1. a) Rasgos da flange assinalados a vermelho e b) desenho que os define no modelo CAD da configuração geométrica inicial. ....	72
Figura 6.2. Nova definição dos rasgos da flange. ....	72
Figura 6.3. a) Pormenores geométricos removidos na otimização dos rasgos da flange e b) <i>Motorhousing</i> com os rasgos da flange simplificados. ....	73
Figura 6.4. a) Configuração com apoio com espessura de 9,2 mm e b) com apoio com espessura de 4,2 mm e conseqüente aumento do comprimento da base da nervura. ....	74
Figura 6.5. Exploração de diferentes alternativas para a configuração da flange do <i>Motorhousing</i> . ....	75
Figura 6.6. Exploração de diferentes alternativas para a configuração do topo do <i>Motorhousing</i> . ....	75
Figura 6.7. Fluxograma A. ....	76
Figura 6.8. Fluxograma 1. ....	78
Figura 6.9. Fluxograma 2. ....	79



## Lista de tabelas

Tabela 3.1. Número de experiências simuladas na ferramenta <i>Design Study</i> , consoante o número de variáveis de projeto avaliadas.....	24
Tabela 4.1. Estudo de convergência do refinamento da malha. ....	39
Tabela 4.2. Valores da tensão de Von Mises máxima e extensão máxima para diferentes valores de pressão interna. ....	41
Tabela 5.1. Formulação do problema de otimização para a geometria dos rasgos. ....	44
Tabela 5.2. Formulação do problema de otimização para a geometria dos rasgos, utilizando variáveis discretas. ....	45
Tabela 5.3. Formulação do problema de otimização para o anel de reforço. ....	48
Tabela 5.4. Formulação do problema de otimização dos anéis de reforço para o corpo do <i>Motorhousing</i> . .....	53
Tabela 5.5. Formulação do problema de otimização da espessura de parede da flange do <i>Motorhousing</i> . .....	59
Tabela 5.6. Formulação do problema de otimização dos rasgos do topo do <i>Motorhousing</i> . ....	61



# Lista de abreviaturas, acrónimos e símbolos

- 2<sup>k</sup>** - Planeamento fatorial de 2 níveis (do inglês, *Two-level factorial design*).
- 3<sup>k</sup>** - Planeamento fatorial de 3 níveis (do inglês, *Three-level factorial design*).
- ASTM** - *American Society for Testing and Materials*.
- A** - Área projetada
- A<sub>c</sub>** - Altura do anel de reforço para o corpo.
- A<sub>t</sub>** - Área da secção resistente do parafuso.
- CAD** - Desenho assistido por computador (do inglês, *Computer-aided design*).
- CAE** - *Computer-aided engineering*.
- d<sub>m</sub>** - Diâmetro médio do parafuso.
- DOE** - Planeamento de experiências (do inglês, *Design of experiments*).
- EN** - *European Standard*.
- F** - Força aplicada na flange.
- F<sub>a</sub>** - Força total devida à ação dos parafusos.
- F<sub>ai</sub>** - Força axial em cada parafuso.
- F<sub>pi</sub>** - Força resultante da pressão interna.
- HPDC** - *High pressure die casting*.
- JIS** - *Japanese Industrial Standards*.
- l** - Passo real do parafuso.
- L<sub>a</sub>** - Largura do anel de reforço para a zona da flange.
- L<sub>c</sub>** - Largura do anel de reforço para o corpo.
- L<sub>r</sub>** - Largura do rasgo da flange.
- L<sub>t</sub>** - Largura do rasgo para o topo.
- MEF** - Método dos Elementos Finitos.
- N** - Número de entradas de rosca do parafuso.
- N<sub>c</sub>** - Número de anéis de reforço para o corpo.
- OEM** - *Original equipment manufacturer*.
- p** - Passo aparente do parafuso.
- P<sub>a</sub>** - Profundidade do rasgo para criar o anel de reforço na zona da flange.
- P<sub>r</sub>** - Profundidade do rasgo da flange.
- P<sub>t</sub>** - Profundidade do rasgo para o topo.
- RSM** - Metodologia da superfície de resposta (do inglês, *Response Surface Methodology*)
- α** - Ângulo de rosca do parafuso.
- ε<sub>máx</sub>** - Extensão máxima.
- σ<sub>VMmáx</sub>** - Tensão de Von Mises máxima.



# 1

## Introdução

### 1.1- Enquadramento

Devido à inclusão de diversos sistemas para aumentar o conforto dos passageiros e, também, devido ao maior rigor nos requisitos estruturais para maior segurança em caso de acidente, os carros modernos são significativamente mais pesados quando comparados com os seus relativos mais antigos. Porém, novas políticas ambientais e de sustentabilidade estão a fazer reverter esta tendência com uma aposta cada vez maior na diminuição da massa dos automóveis.

Com o desafio da crescente exigência relativamente ao controlo de emissões e no aumento da eficiência no consumo de combustível, a redução da massa dos componentes tornou-se num objetivo de elevado interesse para as construtoras automóveis, que as tem levado a repensar, desde a fase de projeto, os componentes dos seus veículos no que diz respeito à escolha dos materiais, à geometria dos componentes e aos respetivos processos e tecnologias utilizados na produção.

A Figura 1.1 expressa uma correlação de dados que permite verificar que a emissão de CO<sub>2</sub> por milha relaciona-se linearmente com a massa dos veículos (Lutsey, 2010). Este facto conduz as construtoras e OEMs (*Original Equipment Manufacturers* – fabricantes de equipamento original, em português) a focarem o alvo cada vez mais na investigação e no projeto para a redução da massa, já que isto lhes permite reduzir consistentemente as emissões poluentes e atingir as metas estabelecidas pelas políticas ambientais (Delogu et al., 2018).

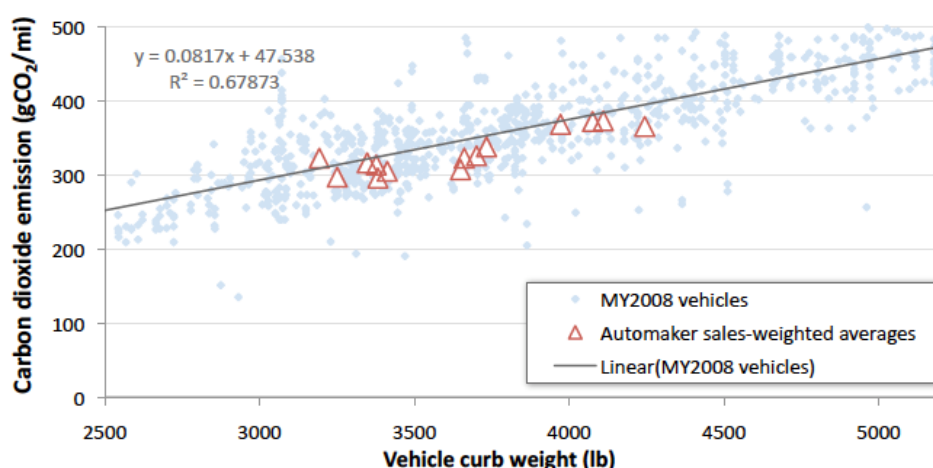


Figura 1.1. Relação entre a massa do automóvel e as suas emissões de CO<sub>2</sub> por milha (Lutsey, 2010).

Um menor valor de massa num automóvel resulta também numa redução no consumo de combustível, e na diminuição da potência necessária. Isto permite a utilização de motores mais pequenos e com menos massa. Estas reduções de tamanho e de massa estendem-se a outros componentes, como os presentes nos sistemas de transmissão, de travagem e acessórios do motor, sendo que esta propensão para a redução de massa dos subsistemas dos veículos e seus componentes devido à redução de massa dos sistemas principais é designada na literatura como redução de massa secundária (Rowe, 2012) (Bjelkengren, 2008).

Para a redução da massa total dos veículos, os ganhos provenientes da redução de massa secundária podem ser bastante consideráveis quando os seus resultados se congregam ao longo dos vários subsistemas. Daí que, o projeto para a diminuição da massa de componentes que não têm aparente importância para o peso global do automóvel em que se incluem, como, no caso desta dissertação, os componentes da cobertura de um compressor do sistema de climatização, pode ter um contributo significativo no alcançar dos objetivos económicos, de sustentabilidade e de *performance* que se pretendem cumprir.

Os benefícios inerentes à minimização da massa dão também um enorme contributo para o crescente crédito dado a soluções alternativas como os veículos híbridos e os veículos elétricos, trazendo impactos positivos para atributos como *performance*, custo, autonomia e durabilidade.

Segundo (Lutsey, 2010), o aumento da consideração dada ao aspeto da diminuição da massa dos componentes na fase de projeto pode conduzir a uma redução de 20% na massa nos novos veículos, sendo que isto terá como consequência a redução de 12% a 16% das emissões de CO<sub>2</sub> até 2020. Em comparação com outras áreas de investigação no projeto automóvel, (Bjelkengren, 2008) refere que melhorias de 10% nos aspetos aerodinâmicos e do atrito de rolamento dos veículos levam a uma melhoria de 3% nos consumos de combustível, enquanto que uma redução da massa dos componentes de uma ordem idêntica conduz a uma melhoria de 7%.

As melhores abordagens, estratégias e métodos identificados para a redução da massa em projeto incluem:

- a) O uso de materiais menos densos, por exemplo, ligas de alumínio ou materiais compósitos em vez de aços-carbono;
- b) A diminuição do volume de material existente nos componentes sem afetar a respetiva funcionalidade, por exemplo, com a diminuição das espessuras nos componentes estruturais, o que é conseguido através da otimização das suas configurações.

Um novo leque de soluções para a otimização das configurações geométricas dos componentes é um dos principais benefícios trazidos pelos programas computacionais de engenharia existentes, que permitem o desenho assistido por computador (CAD – *Computer-aided Design*) e a simulação numérica utilizando o método dos elementos finitos (MEF) (Glennan, 2007).

Uma das vantagens dos métodos que têm por base a otimização e melhorias no projeto face às estratégias sustentadas na substituição do material é evidenciada pela informação apresentada no gráfico presente na Figura 1.2, que representa o custo total da produção em função da percentagem de redução de massa nos veículos (Isenstadt et al., 2016).

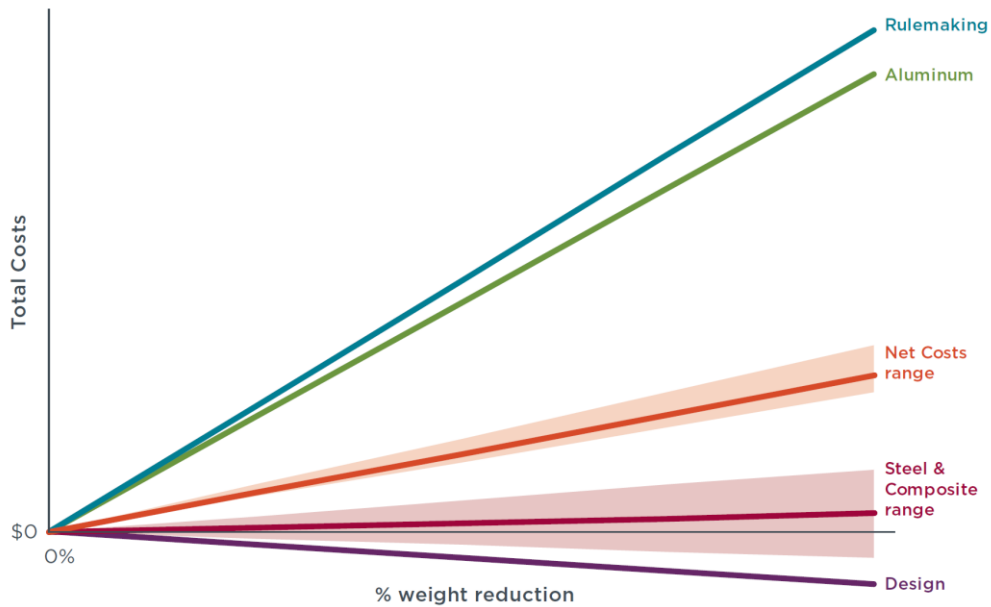


Figura 1.2. Custo total da produção em função da redução da massa dos veículos (Isenstadt *et al.*, 2016)

A abordagem baseada na substituição do material (aço) com a utilização de ligas de alumínio tem um custo superior ao da utilização de aços de alta resistência e de materiais compósitos, sendo que, em comparação o caminho que passa por melhorias no projeto dos componentes incluindo a sua otimização, conduz simultaneamente às reduções da massa e do custo da produção.

Deste modo, a criação de metodologias sustentadas em abordagens que permitem a obtenção de configurações geométricas que minimizam a quantidade de material necessária no fabrico dos componentes, logo reduzindo a sua massa, enquanto que é mantida a funcionalidade e o respeito dos requisitos de projeto, é um aspeto que ganha cada vez mais relevância nas considerações a tomar durante o projeto de componentes de sistemas mecânicos.

## 1.2- Motivação e objetivos

Os sistemas de climatização são um dos grupos de componentes presentes nos automóveis onde as mudanças nas necessidades de mercado e da indústria no que diz respeito à crescente prioridade dada ao conforto dos passageiros, às tecnologias amigas do ambiente e à diminuição no consumo de combustível tem ganho cada vez mais ênfase.

Tendo isto em consideração, a Hanon Systems Portugal S.A., empresa que se ocupa com o projeto, desenvolvimento e fabrico de aparelhos de ar condicionado, controlo térmico e de sistemas de arrefecimento para automóveis, procura inovar e sobretudo otimizar os seus produtos. Um dos componentes por si produzidos é o *R744 E-Compressor* (Figura 1.3). O *R744 E-Compressor* é um compressor elétrico para ser aplicado em veículos híbridos e elétricos, que usa um refrigerante constituído principalmente por dióxido de carbono, o *R744*. Este tipo de refrigerante é considerado inofensivo para o ambiente, com potencial muito reduzido para contribuir para a depleção da camada de ozono e para o aquecimento global.

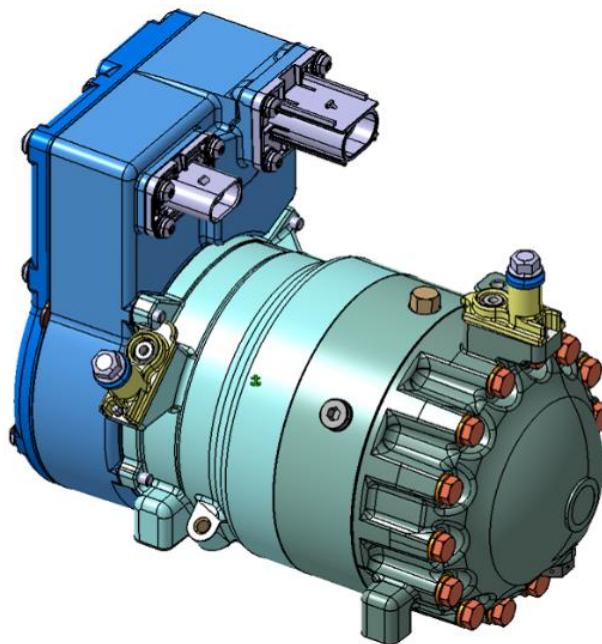


Figura 1.3. Compressor elétrico modelado tridimensionalmente.

Este compressor contém um motor elétrico no seu interior, o que permite que o sistema de ar condicionado funcione de forma independente, possibilitando o arrefecimento ou aquecimento do habitáculo com o motor do veículo desligado. Na Figura 1.4 apresenta-se a localização do compressor e dos outros componentes integrados num sistema de climatização de um automóvel.

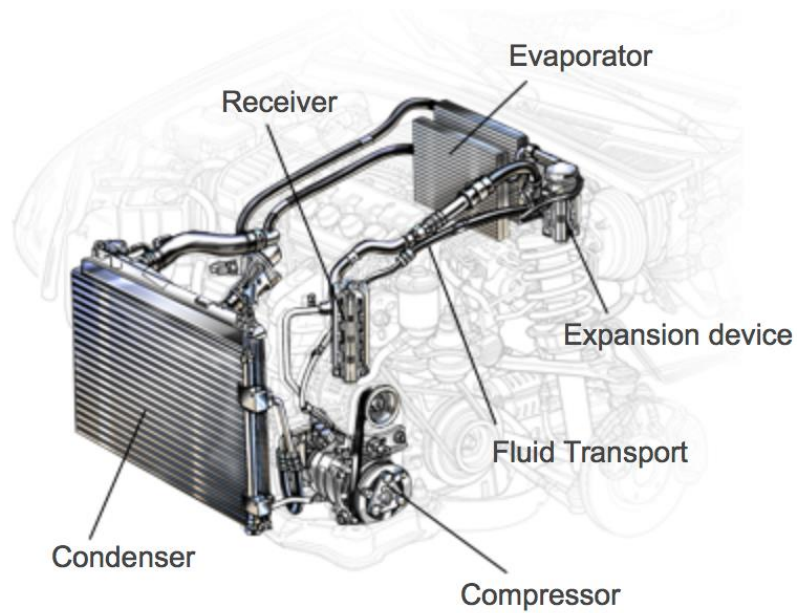


Figura 1.4. Os cinco componentes abrangidos pelo sistema de climatização de um automóvel, (fonte: <http://www.hanonsystems.com>).

Os componentes internos do R744 E-Compressor são incorporados numa cobertura que é dividida em três peças (Figura 1.5), o *Motorhousing* (cobertura do motor elétrico), o *Centerhousing* (cobertura central), e a *Rearhead* (cobertura do *scroll* do compressor). Estes componentes são produzidos por fundição injetada de alumínio, num processo de *High Pressure Die Casting* (HPDC) e pelo processo de *Rheocasting*.

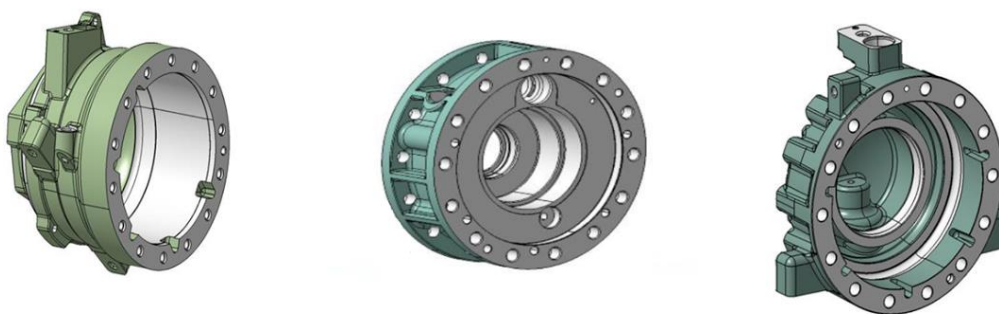


Figura 1.5. *Motorhousing*, *Centerhousing* e *Rearhead*, da esquerda para a direita respetivamente.

Estes componentes cumprem a sua funcionalidade, mas a questão que se impõe e que serve de ponto de partida para esta dissertação é:

- Será que a sua configuração geométrica está otimizada de forma a minimizar a massa?

Tenciona-se encontrar um método para explorar alternativas para as configurações geométricas dos componentes, como os da Figura 1.5, de modo a que a sua massa diminua, sem que seja posto em causa o cumprimento dos requisitos de segurança, rigidez e resistência impostos para o seu propósito de funcionamento.

Como foi introduzido anteriormente, na secção de enquadramento do tema, os avanços tecnológicos dos *softwares* CAE (*Computer-aided Engineering*) e CAD, potenciam as estratégias para a redução da massa dos componentes que têm por base a otimização das suas configurações geométricas. Deste modo, o principal objetivo desta dissertação passa por usufruir das potencialidades destes *softwares* para a realização de otimização, com a finalidade da redução da massa dos componentes, mantendo a sua funcionalidade. Para isto, procurou-se basear o trabalho desenvolvido na utilização de um *software* utilizado regularmente em projeto mecânico.

A estratégia passará então por otimizar os aspetos geométricos dos componentes com o auxílio do *software SolidWorks*. Mais concretamente, com as ferramentas *SolidWorks Simulation* e *Design Study*. A primeira permite utilizar o MEF para realizar simulações numéricas e verificar o respeito pelas especificações de projeto e condições de funcionamento. Por sua vez, a ferramenta *Design Study* aliando-se à capacidade de reconfiguração do modelo tridimensional, permite especificar variáveis de projeto com base nos parâmetros dimensionais dos componentes e realizar operações de otimização da massa, tendo por base experiências simuladas. Estas experiências são organizadas através de modelos de Planeamento de Experiências (DOE- *Design of Experiments*), para a criação de diferentes cenários para a configuração geométrica do componente.

Como caso de aplicação, irá ser aplicada esta estratégia na redução da massa e melhoria das funcionalidades do componente *Motorhousing*. O qual está sujeito a pressão interna e a outros carregamentos devido às diferenças de pressão interna entre este e os restantes componentes que compõem a cobertura do compressor.

Será realizada a modelação tridimensional da configuração original do componente, para posteriormente ser feita uma análise estrutural pelo MEF e, assim, estabelecer o seu comportamento funcional. Tendo por base a análise estrutural, serão identificadas as zonas com potencialidade de melhoria e será realizada a sua otimização, na procura por uma configuração geométrica que reduza a massa do componente e, simultaneamente, cumpra a funcionalidade.

## 1.3- Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em sete capítulos.

No capítulo 1 foi feita uma breve introdução a partir da apresentação do enquadramento do tema relativamente ao contexto global da importância do projeto para a redução da massa dos componentes na indústria automóvel. Para além disto, foi apresentada a motivação e os objetivos da dissertação.

No capítulo 2 são apresentados conteúdos provenientes da pesquisa bibliográfica realizada, envolvendo estudos que permitem conhecer outras abordagens para a redução da massa dos componentes.

No capítulo 3 é explorada a ferramenta *Design Study* de forma a conferir as suas funcionalidades e a apresentar o modo como pode ser utilizada, para a otimização das configurações geométricas de componentes. Apresenta-se também uma revisão sobre conceitos como a otimização, planeamento de experiências, e a relação destes conceitos com a utilização da ferramenta *Design Study*.

No capítulo 4 é exposto o caso de estudo, a definição do problema e é realizada a modelação tridimensional do componente *Motorhousing*, bem como a sua análise estrutural pelo MEF, de forma a determinar o seu comportamento funcional quando sujeito às condições de funcionamento. Apresenta-se também os resultados da análise de convergência da malha de elementos finitos utilizada e um estudo que permitiu determinar a pressão interna máxima que leva o componente à plastificação localizada do material.

No capítulo 5 são identificadas as zonas do componente com possibilidade de melhoria e é feita a sua otimização de modo a se encontrar uma configuração geométrica alternativa, que permita minimizar a massa do *Motorhousing*, mantendo a sua funcionalidade.

No capítulo 6 são apresentadas as considerações que foram necessárias tomar para a modelação CAD do componente, tendo em vista a sua otimização utilizando a ferramenta *Design Study*. E é, também, proposta uma sequência para a modelação de componentes tendo em conta o objetivo da sua otimização, de forma a se tomar o maior partido possível das funcionalidades da ferramenta *Design Study*.

No capítulo 7 são discutidos os resultados e são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e em anexo mais pormenores dos estudos realizados e seus resultados.



# 2

## Revisão bibliográfica

### 2.1- Estudos comparativos

Neste capítulo são apresentados estudos encontrados no decorrer da pesquisa bibliográfica realizada. Esta pesquisa teve como principal objetivo encontrar os níveis de redução de massa conseguidos noutros estudos, para assim se ganhar maior noção dos resultados que podem ser alcançados com esta dissertação, bem como conhecer quais as estratégias consideradas por outros autores no projeto de componentes com o objetivo de contribuir para a melhoria da configuração geométrica.

Embora que as metodologias mencionadas nos estudos apresentados não sejam exatamente idênticas às utilizadas nesta dissertação, é partilhado o objetivo da redução do peso dos componentes, fazendo-se para isso a otimização da configuração geométrica dos mesmos.

Em (Wang, 2013) é apresentada a possibilidade de se substituir a secção transversal de uma jante, que era originalmente de espessura constante, por uma com espessura variável, definida por arcos e *splines* parametrizados, para com isto obter uma configuração geométrica para a jante que permitisse reduzir a sua massa fazendo variar a espessura por troços da secção (Figura 2.1 (a) e (b)).

Nesse estudo foi criado um modelo tridimensional parametrizado utilizando o *SolidWorks*. Com o *software Abaqus* foi realizada a análise da distribuição de tensões e dos deslocamentos na jante quando esta era sujeita a um carregamento radial e a uma pressão representativa daquela que é exercida devido à presença de ar dentro do pneu. Selecionaram-se dezoito dimensões para parâmetros que definiam os arcos e *splines* da secção transversal da jante e procedeu-se à otimização através de uma metodologia com base no algoritmo genético e programação quadrática sequencial.

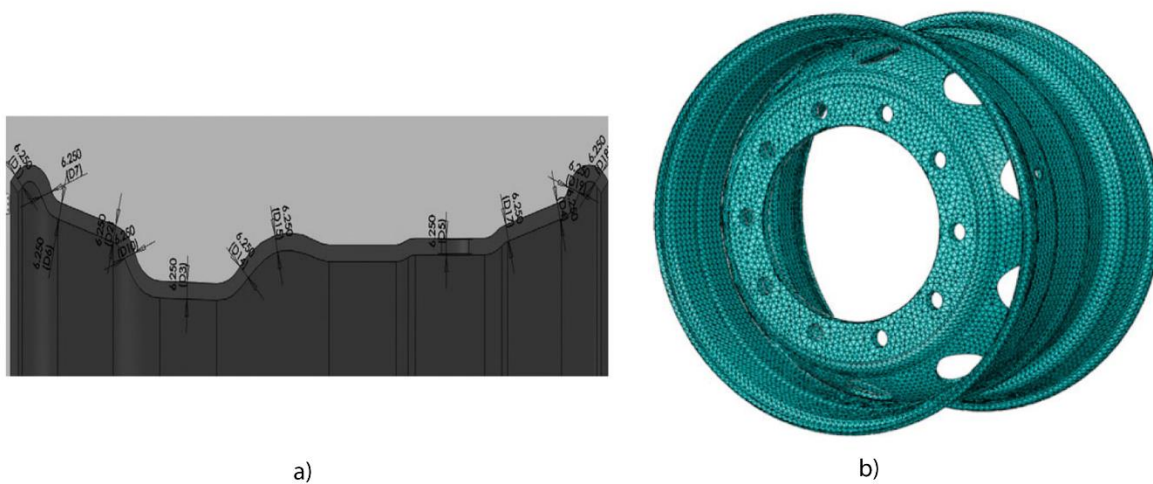


Figura 2.1. a) Modelo parametrizado da secção transversal da jante e b) aplicação do modelo de elementos finitos (Wang, 2013).

Neste trabalho a massa da jante foi reduzida em 7.1% mantendo as condições de funcionamento. A redução da massa da jante conseguida é muito significativa para a eficiência energética do veículo, visto se tratar de um componente rotativo.

Para além de componentes móveis, os elementos estruturais dos veículos automóveis são também alvo de estudos que têm por base metodologias para a otimização da massa dos componentes. O estudo apresentado em (Jiang et al., 2013) baseia-se nas análises modal e estrutural, pelo MEF, de uma estrutura tubular de um carro de *Formula Student* (Figura 2.2), para encontrar as variáveis de projeto através de uma análise de sensibilidade. Com isto, conseguiram otimizar a espessura dos tubos da estrutura para cumprir os requisitos funcionais e assim contribuir para a redução do seu peso.

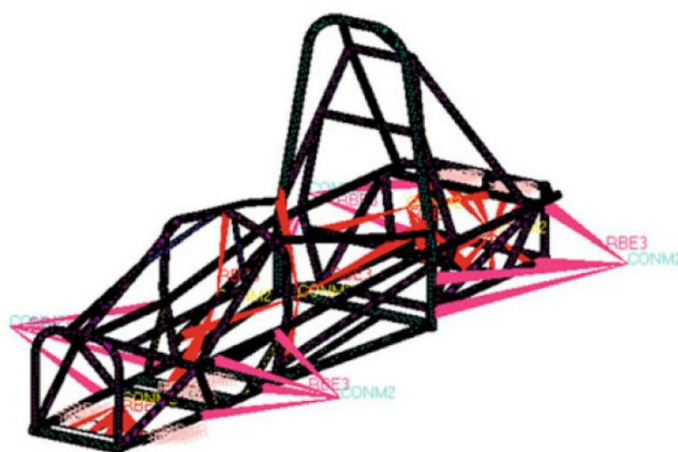


Figura 2.2. Modelo de elementos finitos da estrutura tubular do carro (Jiang et al., 2013).

A estrutura foi modelada tridimensionalmente com o software CAD *CATIA* e as análises pelo MEF foram realizadas utilizando o software *Hypermesh*. A estrutura tubular ótima foi encontrada a partir da utilização do software *OptiStruct* que permite realizar otimização topológica de estruturas, tendo sido alcançado como resultado uma redução de massa de 7,18%.

Estratégia semelhante foi adotada em (Polavarapu, 2008) no estudo das características de uma estrutura do encosto de um banco dianteiro de um automóvel (Figura 2.3) produzido por fundição injetada para desenvolver um método para a otimização da rigidez e massa do componente sujeito a diversos carregamentos. O procedimento passou pela modelação tridimensional do componente em software CAD e posterior análise pelo MEF com a otimização topológica em mente para minimização da massa, tendo sido alcançada uma redução de 12,95%.

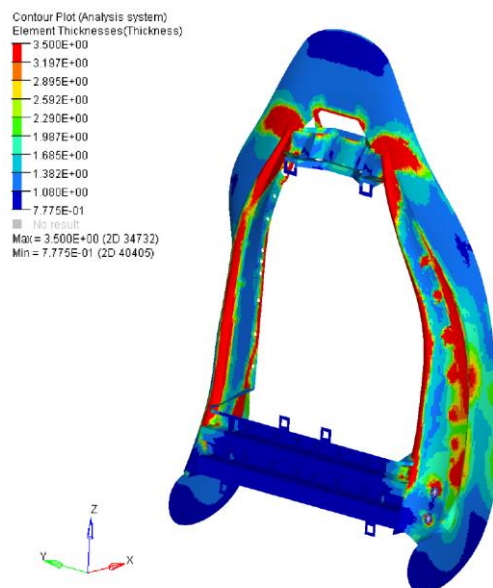


Figura 2.3. Otimização da espessura da estrutura do encosto de um banco de um automóvel (Polavarapu, 2008).

Em (Risberg, 2009) apresenta-se um projeto da Swerea SWECAST (*Swedish Institute of Casting Technology*) com o objetivo de reunir conhecimentos acerca de soluções para a redução da massa de peças fundidas. Foram referidos casos de aplicação de otimização topológica, com base na utilização do programa *OptiStruct*, em componentes utilizados em camiões e maquinaria pesada, como um suporte da suspensão presente em camiões da Volvo e da Renault (Figura 2.4). A otimização permitiu a redução da massa do componente de 6%.

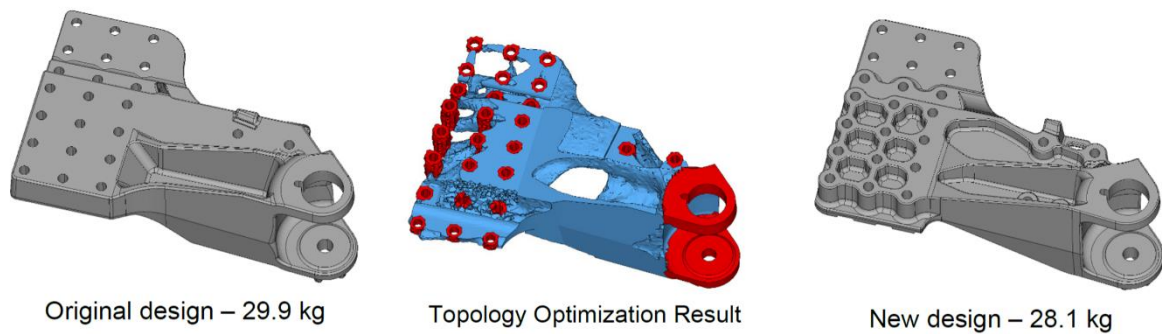


Figura 2.4. Otimização topológica de um suporte da suspensão de um camião (adaptado de (Risberg, 2009)).

Em (Harzheim e Graf, 2006) estão salientadas algumas das limitações da aplicação de otimização topológica, como o facto de esta ter a tendência para resultar na criação de configurações geométricas que incluem zonas ocas e com espessuras que não estão em conformidade com os requisitos para peças fundidas e com isto ser necessário, após a otimização, executar alterações na modelação do componente para corrigir esta situação. É exposto que a utilização de uma estratégia baseada na utilização do *software TopShape*, que tem em conta constrangimentos relativos ao processo de fabrico, tendo assim potencial para mitigar as operações de modelação subsequentes à operação de otimização, permite obter configurações viáveis do ponto de vista do fabrico e mais próximas da configuração ótima resultante da otimização.

Um dos casos apresentados neste estudo foi a comparação dos resultados obtidos pela otimização topológica com os obtidos pela estratégia de otimização utilizando o software *TopShape*. Esta considera os constrangimentos de fabrico, quando aplicada a um componente do sistema de direção de um automóvel (Figura 2.5). Pela segunda estratégia foi possível um resultado de redução de massa 20% superior ao da primeira.

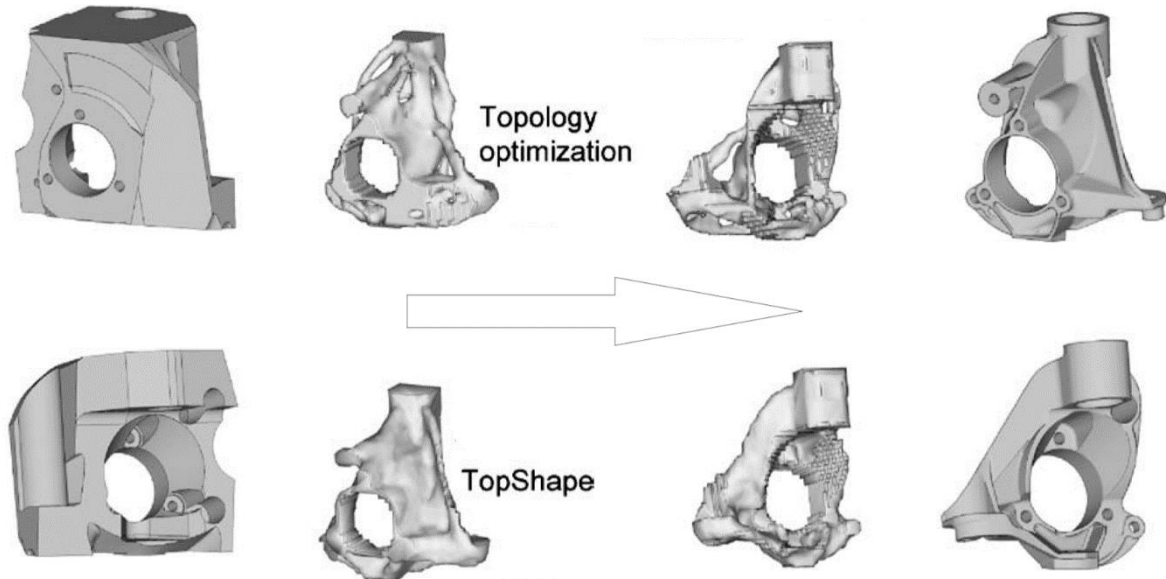


Figura 2.5. Otimização de uma manga de eixo de um automóvel (adaptado de (Harzheim and Graf, 2006)).

Os estudos anteriormente referidos baseiam a sua fase de otimização geométrica dos componentes em metodologias que têm por base o algoritmo genético e otimização topológica.

Em (Chiria et al., 2018) são mostradas as capacidades da ferramenta *Design Study* e do potencial do *SolidWorks* para a execução de análises pelo MEF para avaliarem diferentes configurações geométricas para um volante de um sistema de armazenamento de energia. A definição de 4 parâmetros distintos (Figura 2.6) através da escolha de dimensões do volante permitiu a avaliação de 44 cenários para a possível configuração ótima do componente, no que diz respeito à sua capacidade para armazenar energia.

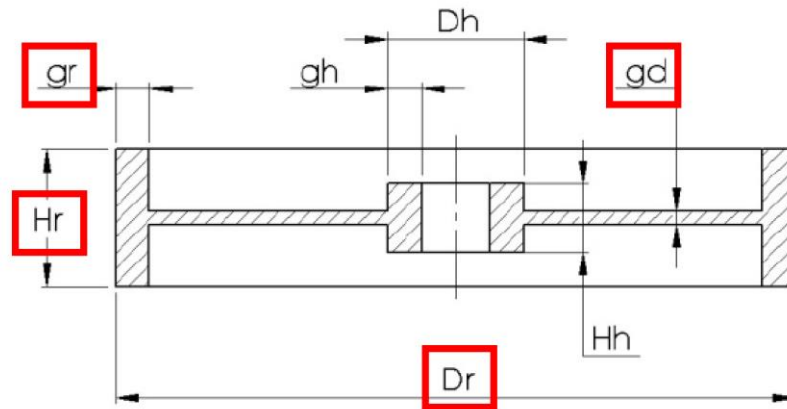


Figura 2.6. Vista em corte do volante de inércia com os 4 parâmetros avaliados assinalados a vermelho (adaptado de (Chiria et al., 2018).

Conforme apresentado em (*Solidworks Software Optimization (White Paper), 2010*), a utilização da ferramenta *Design Study* e as capacidades de simulação do *SolidWorks* permitiram a otimização dos braços robóticos utilizados em veículos da NASA para as missões de exploração de Marte (Figura 2.7), tendo a massa destes componentes sido reduzida em cerca de 20%.

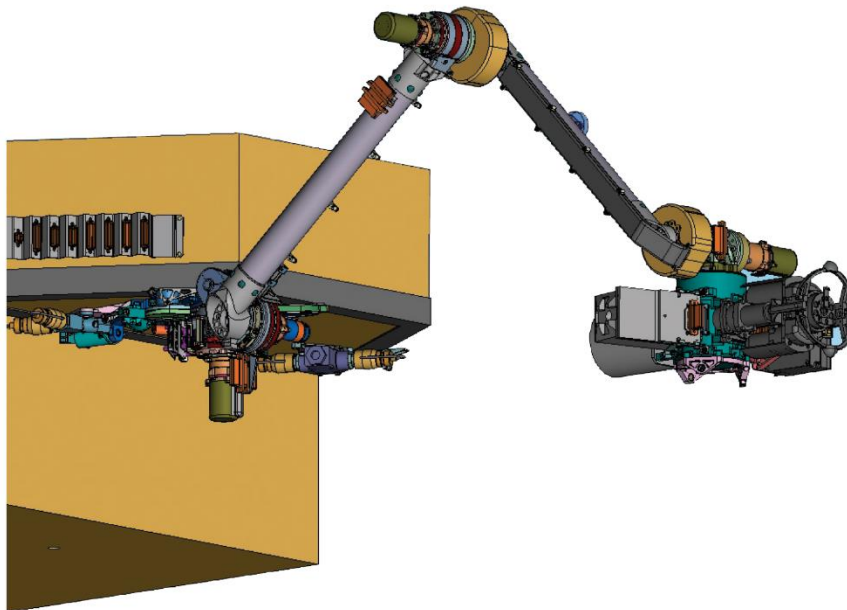


Figura 2.7. Modelação tridimensional do braço robótico (*Solidworks Software Optimization (White Paper), 2010*).

Comum a todos estes estudos está a conclusão de que, para além dos benefícios em relação ao desempenho dos componentes, a redução da sua massa, mesmo sendo em níveis reduzidos, traz uma enorme contribuição para a redução dos custos de produção, visto que há uma diminuição importante na quantidade material utilizada na produção. Embora existam diferenças no que diz respeito aos *softwares* utilizados, é comum a linha de trabalho que inclui sempre os passos da modelação

tridimensional do componente, seguindo-se a análise pelo MEF e, por fim, a otimização do componente. Estas três etapas estarão também presentes no trabalho realizado nesta dissertação.



# 3

## Otimização através do *software SolidWorks*

### 3.1- Introdução

No seu sentido mais abrangente, otimização é a obtenção do melhor resultado possível dentro de constrangimentos específicos. Os constrangimentos definem assim as fronteiras de liberdade de um projeto.

Na realização de uma operação de otimização procura-se fazer o cálculo do peso, tensões, custos, deformações, frequências naturais, etc., que são dependentes de variáveis como as dimensões, carregamentos, materiais e outros requisitos, com vista a alcançar um objetivo como, por exemplo, a minimização da massa ou a maximização da rigidez de um componente. A otimização permite, através da alteração de parâmetros que são controláveis- as variáveis de projeto -, alcançar um objetivo que não está diretamente sob controlo do engenheiro.

A existência de métodos de otimização deve-se sobretudo às contribuições de Newton, Lagrange e Cauchy. Os desenvolvimentos no cálculo diferencial e do método variacional conduzidos por Bernoulli, Euler, Weistrass e Lagrange levaram à criação do método de otimização para problemas com restrições. O aumento do poder computacional que surgiu na segunda metade do século XX permitiu o surgimento de novos métodos, sendo que os autores que conseguiram maior impacto com os seus estudos foram Kuhn e Tucker na década de cinquenta (Chang, 2015).

Para casos de difícil caracterização teórica, metodologias com base em conhecimento estatístico como o planeamento de experiências e a metodologia da superfície de resposta (*RSM-Response Surface Methodology*) são um contributo para a evolução dos processos de otimização, facilitando a organização das experiências para avaliar diferentes níveis das variáveis de projeto e criando uma forma eficiente de determinar os fatores que têm maior influência nos processos e que devem ser alterados de forma a levar à otimização (Montgomery, 1991).

A otimização estrutural pode ser dividida em quatro categorias: otimização dimensional, otimização topológica, otimização de material e otimização de forma ou configuração. Num problema de otimização dimensional, as variáveis de projeto são as dimensões da secção transversal do elemento estrutural a ser otimizado; na otimização de forma, é variável a fronteira delimitadora do domínio que ela ocupa. A otimização topológica procura descobrir qual a configuração que permite a utilização mais eficiente do material disponível dentro de uma área ou volume fixo.

Nesta dissertação é explorada uma via que combina as categorias de otimização dimensional e otimização de forma, sendo que são também aplicadas noções típicas da otimização topológica, como

a remoção de porções de material com nível baixo de tensão que não está a ser eficientemente utilizado na transmissão dos esforços internos.

Como será explicitado neste capítulo, a estratégia passa por utilizar uma ferramenta existente no *software Solidworks*, em que são escolhidas as cotas dos desenhos presentes no modelo CAD de um componente para serem utilizadas como variáveis de projeto. O *software* faz um planeamento de experiências para serem avaliadas as diferentes combinações dos níveis das variáveis de projeto e respetivos efeitos na configuração geométrica do componente. As experiências são simuladas numericamente utilizando o MEF e, dos resultados obtidos, o *software* determina qual delas corresponde à melhor solução para a configuração geométrica, tendo em conta o objetivo e os constrangimentos especificados.

### 3.2- O módulo *Design Study* para a otimização da configuração geométrica de componentes

Os estudos apresentados na revisão bibliográfica presente no capítulo 2 apontam para uma tendência no que diz respeito à opção por metodologias baseadas em estratégias de otimização topológica e na utilização de conceitos como o algoritmo genético no projeto de componentes, quando é pretendido encontrar configurações geométricas que reduzam a sua massa ou otimizem outra característica que contribua para a melhoria do seu desempenho.

Por sua vez, o módulo *Design Study* presente no *software Solidworks* permite a otimização da configuração geométrica dos componentes sustentando-se na capacidade do *software* CAD para a reconfiguração automática do modelo tridimensional do componente e na simulação pelo MEF realizada no módulo *Solidworks Simulation*, aliando a isto a utilização de conceitos de DOE para efetuar experiências que permitem a otimização do componente.

A simulação pelo MEF pode ser uma análise estrutural, térmica, de frequência, de encurvadura ou de fadiga, consoante o problema em causa, e é com base nela que são definidos no programa os constrangimentos do projeto.

A partir do modelo CAD, é possível, através desta ferramenta, a seleção de cotas dos desenhos e outros parâmetros utilizados na modelação dos componentes, para serem utilizados como variáveis de projeto na formulação de um problema de otimização. Na Figura 3.1 mostra-se, a partir de um modelo CAD de uma peça criado para fins exemplificativos, que esta seleção pode se realizar de forma direta através da interface gráfica do programa.

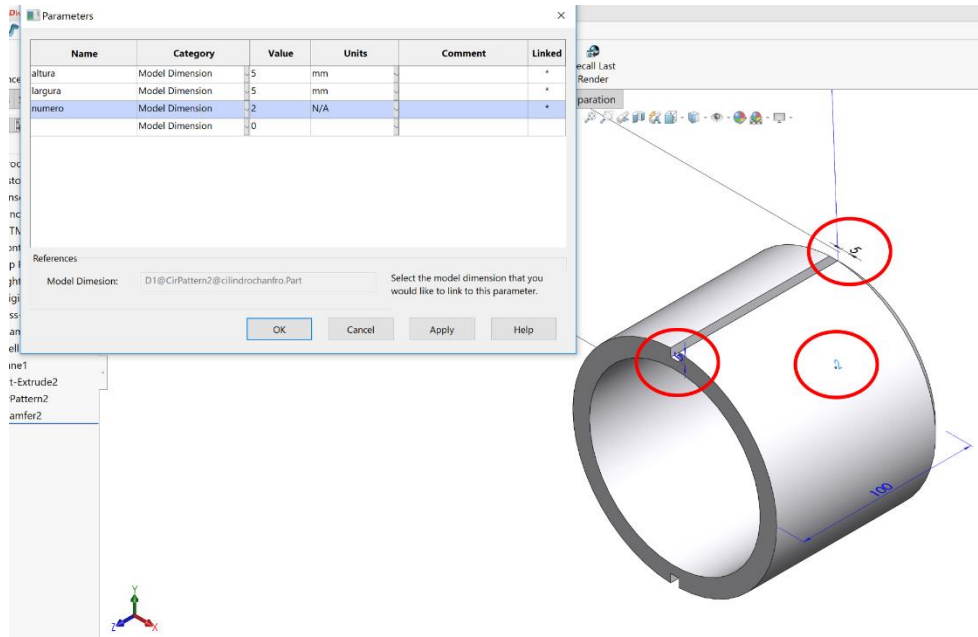


Figura 3.1. Seleção de cotas (assinaladas a vermelho) através da interface gráfica do *Solidworks*, para serem utilizadas como variáveis de projeto.

A enunciação do problema de otimização é realizada também através da interface gráfica do *software* Figura 3.2.

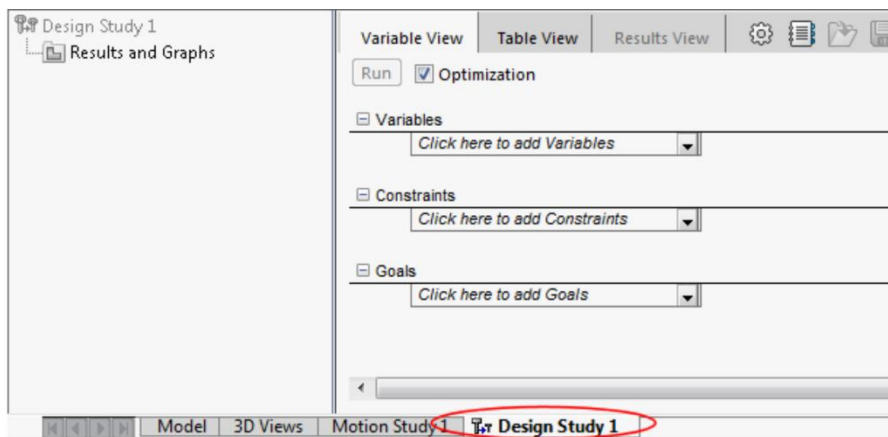


Figura 3.2. Interface gráfica do *Solidworks* que permite a formulação do problema de otimização.

A ferramenta *Design Study* faz uso de modelos de Planeamento de Experiências para definir diferentes cenários para a configuração geométrica do componente, construindo um conjunto de experiências, em que são feitos variar, entre níveis estabelecidos pelo utilizador, os valores das variáveis de projeto (Figura 3.3).

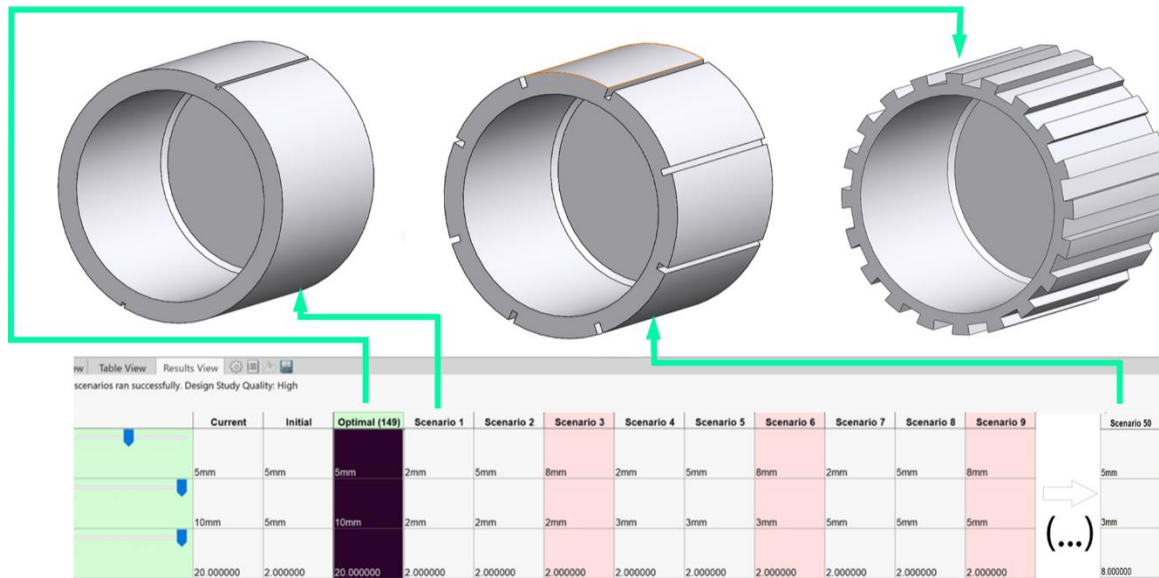


Figura 3.3. Exemplo demonstrativo da operação do módulo *Design Study*. Avaliação de diferentes cenários para a configuração geométrica dos rasgos em torno de um cilindro.

Para cada uma destas experiências, referidas no *software* como *design scenarios*, é realizada uma simulação pelo MEF. Desta forma, é feita uma avaliação da viabilidade de cada configuração geométrica obtida, no que diz respeito ao cumprimento dos constrangimentos do projeto.

O programa automaticamente distingue de entre as configurações geométricas avaliadas quais as que são viáveis tendo em conta os constrangimentos especificados e assinala aquela que dentro do conjunto de experiências simuladas revela ser a que otimiza a função objetivo escolhida.

Concluindo, a ferramenta *Design Study* demonstra ter capacidade para, a partir do modelo CAD de um componente e da realização de simulação pelo MEF, permitir executar de forma ágil estudos de otimização da configuração geométrica de componentes. Por isto, e aliado ao facto de esta ferramenta estar presente num *software* disponível comercialmente e utilizado amplamente em problemas de engenharia, conduz a considerar que se adequa a sua utilização nesta dissertação com o intuito de auxiliar na procura por uma configuração geométrica que permita reduzir a massa do componente *Motorhousing*, mantendo a sua funcionalidade.

## 3.3- Relação do Planeamento de Experiências com a ferramenta *Design Study*

### 3.3.1- Introdução

A ferramenta *Design Study*, que vai ser utilizada com vista à otimização geométrica dos componentes, tem por base um algoritmo desenvolvido a partir da metodologia de *Design of Experiments* (DOE). Esta metodologia é conhecida na língua portuguesa por Planeamento de Experiências.

O *software* compõe um conjunto de experiências segundo modelos de DOE. Por sua vez, estas experiências são simuladas, conduzindo à identificação de uma solução ótima. Isto, aliado à capacidade do *software* para executar a regeneração automática das configurações dos componentes modelados, permite a automatização do processo de otimização.

### 3.3.2- Planeamento de experiências

Grande parte do conhecimento em engenharia é derivado da experimentação. Uma experiência é uma série de testes conduzidos sistematicamente de forma a aumentar a compreensão sobre um processo ou para explorar novas opções para um produto/processo.

O planeamento de experiências é uma metodologia sistemática para determinar relações causa-efeito entre fatores que afetam um processo e o *output* desse processo. Esta metodologia utiliza ferramentas estatísticas e conceitos de experimentação, tornando-se extremamente importante quando não existe caracterização teórica evidente, não sendo possível a aplicação de leis determinísticas.

A aplicação da metodologia do planeamento de experiências tem particular interesse quando os mecanismos subjacentes do processo em estudo não são bem conhecidos, sendo necessário acumular informação para se proceder a uma melhoria (Wick e Veilleux, 1987). Esta informação pode ser obtida a partir da experimentação para determinar as consequências no desempenho do processo quando certas alterações são propositadamente introduzidas.

O propósito do planeamento de experiências passa por identificar os melhores níveis dos fatores que afetam o processo.

A abordagem mais comum ao problema é a de selecionar um intervalo de interesse para cada uma das variáveis e proceder a um conjunto de experiências variando apenas uma das variáveis de cada vez. Porém, esta abordagem incorre em alguns problemas, como o número elevado de experiências necessárias e a incapacidade para o reconhecimento de interações entre os fatores.

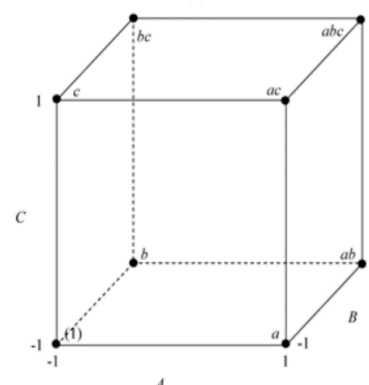
Assim, no sentido de combater as dificuldades referidas, existem modelos como o planeamento fatorial de 2 níveis, conhecido na língua inglesa por *two-level factorial design* e muitas vezes referido de forma simbólica por  $2^k$ , onde  $k$  é o número de fatores em estudo.

No planejamento  $2^k$ , cada fator é avaliado em apenas dois níveis e são necessárias  $2^k$  experiências. Por exemplo, um planejamento de nível dois com três fatores necessita de  $2^3=8$  experiências. Os dois níveis dos fatores são usualmente representados de forma codificada, como -1 para o primeiro nível e +1 para o segundo. Os níveis -1 e +1 correspondem a valores baixos e altos escolhidos para cada variável. Esta codificação dos fatores em estudo permite o seu tratamento matemático indiferenciado removendo a influência das unidades dimensionais.

Exemplificando, para o caso de um planejamento fatorial  $2^3$  (planeamento fatorial de dois níveis com três fatores) existem três fatores (A, B e C). São testados três efeitos principais, referidos à influência isolada de cada um dos três fatores (a, b e c), três efeitos decorrentes da interação entre dois fatores, (ab, bc e ac) e, por fim, um efeito decorrente da interação conjunta entre os três fatores (abc). Na Figura 3.4(a), estão as 8 combinações organizadas de forma a que os fatores sejam introduzidos um por um com cada novo fator sendo combinado com os termos precedentes. Esta organização das combinações é chamada de ordem de Yates. Também, na Figura 3.4(b) está representado geometricamente o planejamento  $2^3$  utilizando um cubo em que cada vértice corresponde a uma das oito combinações.

Treatment Name	Factors		
	A	B	C
(1)	-1	-1	-1
a	1	-1	-1
b	-1	1	-1
ab	1	1	-1
c	-1	-1	1
ac	1	-1	1
bc	-1	1	1
abc	1	1	1

(a)



(b)

Figura 3.4. a) Organização do planejamento  $2^3$  pela ordem de Yates e b) representação geométrica (fonte: reliawiki.org).

### 3.3.3- Modelo de Planeamento de Experiências utilizado na ferramenta *Design Study*

#### 3.3.3.1- Planeamento de experiências de Box-Behnken

Para compor o planeamento de experiências a ferramenta *Design Study* utiliza o modelo de Box-Behnken (*Solidworks Help*, 2017).

A avaliação dos efeitos de um elevado número de fatores pode ser algo dispendioso no que diz respeito ao número de experiências necessárias. Por exemplo, um problema com três níveis com quatro fatores requer  $3^4=81$  experiências. O planeamento de experiências de Box-Behnken surge como uma estratégia que permite reduzir o número de experiências necessárias quando se pretendem avaliar três níveis para as variáveis em estudo.

Este modelo sugere uma forma de selecionar uma fração de um planeamento  $3^k$  (Box e Behnken, 1960) através da combinação de planeamentos  $2^k$  com blocos incompletos, preenchidos com zeros. Os níveis de cada um dos  $k$  fatores são considerados como igualmente espaçados, deste modo os valores são codificados como -1, 0, e 1, correspondendo respetivamente aos níveis baixo, central e alto.

Exemplificando, num caso em que fosse pretendido determinar as melhores condições para produção por injeção de um componente de plástico, em que os fatores avaliados e respetivos níveis baixos e altos são:

- Temperatura: 190°C e 210°C;
- Pressão: 50MPa e 100MPa.

Pelo planeamento de Box-Behnken seriam avaliados os seguintes valores para as variáveis:

- Temperatura: 190°C, 200°C e 210°C.
- Pressão: 50MPa, 75MPa e 100MPa.

Em cada bloco um certo número de fatores são combinados, enquanto que os outros são mantidos no seu nível central. Exemplificando, um planeamento de Box-Behnken para três fatores envolve o uso de três blocos, e, em cada bloco, dois fatores são feitos variar através de quatro possibilidades de combinação dos respetivos níveis baixos e altos.

O número de experiências (*Solidworks Help*, 2017) para diferentes quantidades de variáveis de projeto em causa, realizadas pela ferramenta *Design Study* quando esta utiliza o planeamento de experiências de Box-Behnken é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Número de experiências simuladas na ferramenta *Design Study*, consoante o número de variáveis de projeto avaliadas (adaptado de (*Solidworks Help*, 2017)).

Número de variáveis de projeto	Número de experiências do planeamento de Box-Behnken
1	3
2	9
3	13
4	25
5	41
6	49
7	57

### 3.4- Utilização da ferramenta *Design Study* para a formulação do problema de otimização

#### 3.4.1- Introdução

Um problema de otimização é um problema em que certos parâmetros, chamados de variáveis de projeto, são determinados de forma a se alcançar a otimização de uma função objetivo considerando dados constrangimentos que têm de ser respeitados. De forma geral, um problema de otimização pode ser formulado matematicamente da seguinte forma (Chang, 2014):

$$\text{Minimizar: } f(x) \quad (3.1a)$$

$$\text{Sujeito a: } g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, m \quad (3.1b)$$

$$h_j(x) = 0, \quad j = 1, p \quad (3.1c)$$

$$x_k^l \leq x_k \leq x_k^u, \quad k = 1, n \quad (3.1d)$$

Onde  $f(x)$  é a função objectivo a ser minimizada ou maximizada,  $g_i(x)$  é a  $i$ -ésima inequação dos constrangimentos onde  $m$  é o número total de inequações,  $h_j(x)$  é a  $j$ -ésima equação dos constrangimentos onde  $p$  é o número total de equações,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  é o vetor das variáveis de projeto,  $n$  é o número total de variáveis de projecto e  $x_k^l$  e  $x_k^u$  são os limites mínimo e máximo da  $k$ -ésima variável de projeto  $x_k$ .

Um estudo de otimização é definido então pela relação entre a função objetivo, as variáveis de projeto e os constrangimentos.

Neste secção explora-se como a ferramenta *Design Study* pode ser utilizada para a otimização geométrica de componentes e apresenta-se o procedimento para definir as variáveis de projeto, os constrangimentos e a função objetivo, e desta forma, formular-se um problema de otimização, bem como, os passos a executar para se usufruir das suas potencialidades.

Como foi referido previamente, para a utilização desta ferramenta é necessário, em primeiro lugar, realizar a análise pelo MEF (através do módulo *Solidworks Simulation*) para uma configuração geométrica base do componente, pois é a partir desta simulação que podem ser especificados os constrangimentos do projeto. Esta simulação base será repetida em cada uma das experiências simuladas, de forma a serem avaliados os efeitos da variação dos níveis das variáveis de projeto e as consequentes alterações na configuração geométrica do componente no que diz respeito ao cumprimento dos constrangimentos.

De entre as configurações viáveis a melhor configuração, ou seja, aquela que produz um mínimo ou máximo na função objetivo (dependendo de o problema ser de minimização ou maximização respetivamente) é escolhida como solução ótima.

### 3.4.2- Definição das variáveis de projeto

Num qualquer estudo que tenha por base a otimização, têm de ser definidas inicialmente as variáveis de projeto. As variáveis de projeto são parâmetros que definem um sistema, na medida em que a sua alteração introduz modificações na configuração inicial do componente. As variáveis de projeto podem ser de duas naturezas distintas (*Practical Aspects of Structural Optimization*, 2014):

- Física: dimensões, forma, material, topologia;
- Numérica: contínua, discreta, inteira, real, binária.

Exemplificando, a cota de um diâmetro de um furo é uma variável de projeto física, enquanto que o número de repetições num padrão de rasgos numa chapa é uma variável de projeto numérica discreta.

As variáveis de projeto usadas num problema de otimização têm de ser independentes.

A escolha das variáveis de projeto é um passo importante na definição de um estudo de otimização, pois a sua seleção determina a eficácia na obtenção da melhor configuração para o componente.

No módulo *Design Study* formula-se o problema de otimização através da interface gráfica do *software*.

Para se iniciar a formulação do problema têm de ser definidas as variáveis de projeto. No *SolidWorks* estas variáveis são selecionadas diretamente a partir das cotas presentes no modelo CAD

ou, são definidas através da criação de parâmetros, que podem corresponder a dimensões geométricas do componente, desde espessuras de paredes a diâmetros de furos, ou podem corresponder também a propriedades de natureza numérica como o número de repetições num padrão geométrico ou ainda a propriedades do material utilizado na construção do componente.

A forma com que se pretende que estes parâmetros variem durante a otimização é especificada também nesta fase da formulação do problema. O *software* permite três formas de variação distintas (Figura 3.5):

- Especificando um intervalo de variação, escolhendo a opção *Range*;
- Especificando um intervalo de variação e o incremento entre os valores no intervalo, escolhendo a opção *Range with step*;
- Ou, escolhendo valores discretos para as variáveis, através da opção *Discrete Values*.



Figura 3.5. Exemplo de definição das variáveis de projeto na interface gráfica do *SolidWorks*.

A escolha destas predefinições determina se o *software* opera no espaço contínuo ou discreto durante a procura da solução ótima. A opção *Range* faz com que sejam consideradas variáveis contínuas, enquanto que as restantes opções fazem com que sejam consideradas variáveis discretas, sendo também possível uma combinação entre os dois tipos. O programa apenas utiliza algoritmos baseados no planeamento de experiências de Box-Behnken no caso da utilização de variáveis contínuas.

O uso de variáveis contínuas faz com que a solução ótima seja encontrada utilizando tantas experiências quanto aquelas que são indicadas pelo planeamento de experiências considerado.

No caso de serem utilizadas variáveis discretas, o *software* calcula os resultados para cada um dos cenários e encontra a solução ótima através da comparação direta entre os resultados obtidos.

Na ocasião da utilização de uma combinação entre variáveis contínuas e discretas a operação de otimização é realizada no espaço contínuo, mas na apresentação dos resultados o programa tem em conta os valores discretos.

Nem sempre se conhecem de antemão os parâmetros que mais podem ter influência na obtenção de uma solução para o problema de otimização e que podem ser utilizados como variáveis de projeto. Em problemas de engenharia mais simples a experiência do engenheiro pode ser suficiente para identificar as dimensões ou outras características que devem ser utilizadas como parâmetros. No entanto,

em grande parte dos problemas de engenharia a escolha destes parâmetros não é trivial, existindo metodologias para apoiar o engenheiro nesta decisão, como a RSM (Cornell, 1990) e as metodologias baseadas no estudo de sensibilidade, *sensitivity study* em inglês, que consegue apontar para os parâmetros mais significantes assim como o intervalo de valores com mais impacto nas grandezas a serem analisadas (*Solidworks Software Optimization (White Paper)*, 2010).

### 3.4.3- Definição dos Constrangimentos

Para além das variáveis de projeto, têm de ser definidos constrangimentos para a realização de um estudo de otimização.

Os constrangimentos determinam as fronteiras do espaço de projeto, isto é, limitam o domínio das variáveis de projeto. Os constrangimentos são escolhidos a partir dos resultados obtidos em análises pelo MEF, por exemplo, estáticas, de frequência ou térmicas e, são verificados também, através da análise destes modelos numéricos.

Sem a existência de constrangimentos o resultado de um problema de otimização com o objetivo de, por exemplo, a minimização da massa, seria aquele que corresponderia à situação em que o componente teria a menor quantidade de material permitida pelas suas variáveis de projeto. No entanto, em qualquer projeto existem requisitos operacionais, tais como a rigidez do componente ou a sua resistência mecânica que limitam as possibilidades de variação dos parâmetros, sendo que estas limitações são introduzidas pela escolha correta dos constrangimentos.

Os constrangimentos resultam numa medida da viabilidade de um projeto, na medida em que, é com a sua definição que se garante a funcionalidade do componente.

Dependendo da sua área de atuação, os constrangimentos podem ser de dois tipos:

- Constrangimentos nas variáveis de projeto:
  - Limitação na variação de dimensões.
  - Relacionamento entre dimensões.
- Constrangimentos no comportamento do sistema:
  - Leis físicas que regem o sistema.
  - Limitação no *output* de um sistema (deformação, tensão, carregamentos, energia, conservação da massa).

Na interface gráfica do *SolidWorks* a definição dos constrangimentos é realizada através da identificação das propriedades que devem ser avaliadas durante as experiências simuladas na otimização. Esta identificação faz-se criando aquilo que são chamados, no *software*, de sensores.

Os sensores podem ser definidos de modo a que sejam utilizados para constrangimentos resultados de simulações feitas anteriormente, propriedades como a massa do componente, dimensões e até dados referentes ao custo de produção do componente.

A definição do constrangimento só fica concluída depois de ser escolhido o modo de como o mesmo deve ser respeitado. Se se pretender que a propriedade ou dado a ser avaliado seja inferior a um determinado valor, essa escolha é feita selecionando *Is less than*, caso contrário se se pretender que seja superior a esse valor seleciona-se *Is greater than*. Pode-se escolher também que os valores a serem avaliados estejam dentro de um determinado intervalo selecionando *Is between*.

Exemplificando, na Figura 3.6 está definido um constrangimento em que se pretende que os valores das tensões de Von Mises obtidos numa análise estrutural sejam inferiores a 140 MPa.

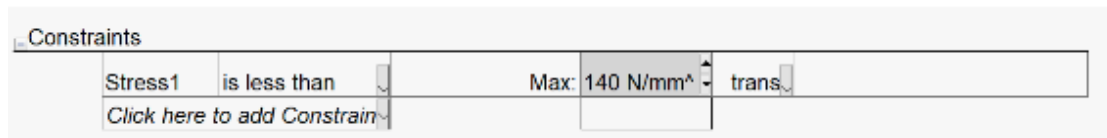


Figura 3.6. Exemplo de definição dos constrangimentos na interface gráfica do *SolidWorks*.

Existe ainda a possibilidade de, selecionando a opção *Monitor Only*, ser feita uma avaliação dos valores obtidos para os constrangimentos especificados para cada experiência simulada sem que o programa realize a otimização.

#### 3.4.4- Definição da função objetivo

A função objetivo define aquilo que se pretende alcançar com a otimização. Pode-se pretender minimizar a função objetivo, por exemplo quando se pretende minimizar a massa de um componente, ou pode-se pretender maximizá-la, por exemplo quando se pretende maximizar a frequência natural de um componente.

Tal com as variáveis de projeto, a função objetivo pode ter um carácter físico, quando se refere ao custo, peso, deformação ou tensão. Outras variáveis que não são mensuráveis podem ser também utilizadas como função objetivo, como é o caso do conforto, que pode ser avaliado indiretamente através de outras propriedades, como, por exemplo, a rigidez.

O objetivo que se pretende alcançar com a otimização é definido no *software* utilizando sensores, à semelhança do que é feito na definição dos constrangimentos.

A formulação do problema através da interface gráfica fica terminada com a seleção da forma com que se pretende otimizar a característica escolhida com a atribuição dos sensores referidos anteriormente. Se o propósito é maximizar a função objetivo, seleciona-se *Maximize*, em contrapartida, para minimizar a função objetivo, opta-se por selecionar *Minimize*.

O programa *SolidWorks* permite ainda realizar uma operação de otimização para problemas em que se deseja que a função objetivo tome um determinado valor exato, esta opção é feita escolhendo *Is exactly* na definição da função objetivo pela interface gráfica.

A liberdade para definir mais do que uma função objetivo possibilita a utilização deste *software* para otimização de problemas multiobjetivo. No estabelecimento dos vários objetivos são atribuídos pesos a cada um deles. Quanto maior o peso atribuído a um objetivo, maior é a importância dada pelo programa à otimização desse objetivo (Chang, 2015).

Na Figura 3.7 está presente a definição de um problema multiobjetivo em que se atribuiu um maior peso relativo para a minimização da massa em relação à minimização do deslocamento.

Goals			
Mass2	Minimize	Weight: 5.00	
Displacement1	Minimize	Weight: 3.00	trans
<a href="#">Click here to add Goals</a>			

Figura 3.7. Exemplo de definição da função objetivo na interface gráfica do *SolidWorks*.

Por fim, depois dos passos anteriores, é possível correr a otimização. O *software* faz um conjunto de experiências (simuladas) de acordo com o modelo de planejamento de experiências selecionado, e, por fim, comparando as soluções de cada experiência escolhe de entre elas aquela cuja configuração otimiza a função objetivo.



# 4

## Definição do problema

### 4.1- Modelação tridimensional do componente *Motorhousing*

Do grupo de componentes de alumínio injetado que compõem a cobertura do *R744 E-Compressor* foi escolhido para ser estudado o componente *Motorhousing* (Figura 4.1), que, como já foi referido anteriormente, é o componente responsável por cobrir e proteger o motor elétrico existente neste compressor.

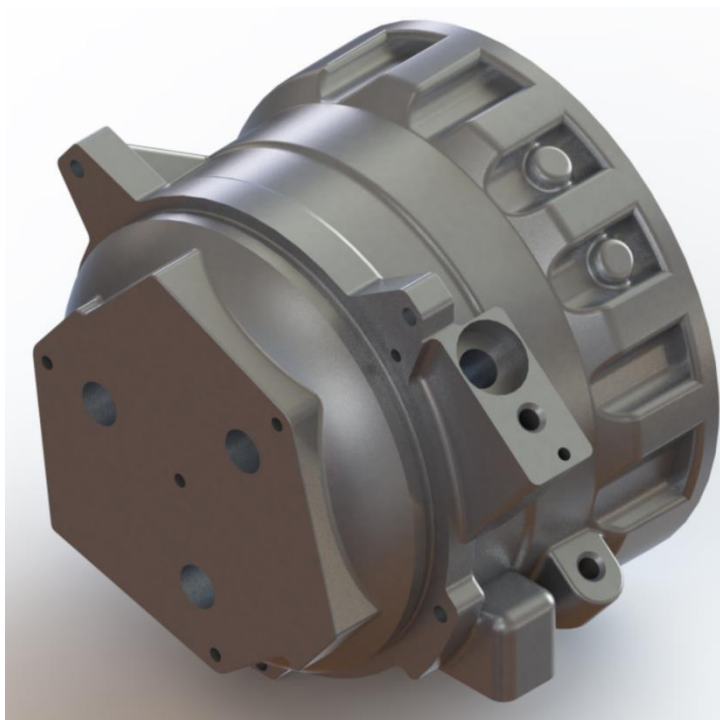


Figura 4.1. *Motorhousing*, na sua configuração geométrica inicial.

Como se pretende otimizar a configuração geométrica do componente mantendo a sua funcionalidade, é necessário, desde logo, determinar qual é o comportamento funcional do componente. A sua configuração geométrica original irá servir como base para as modificações futuras com vista à minimização da sua massa, ao cumprimento dos requisitos funcionais e à redução da espessura da parede do corpo do componente.

Na Figura 4.2 é apresentado o fluxograma que sumariza as tarefas cumpridas de forma a determinar o comportamento funcional do componente na sua configuração original.

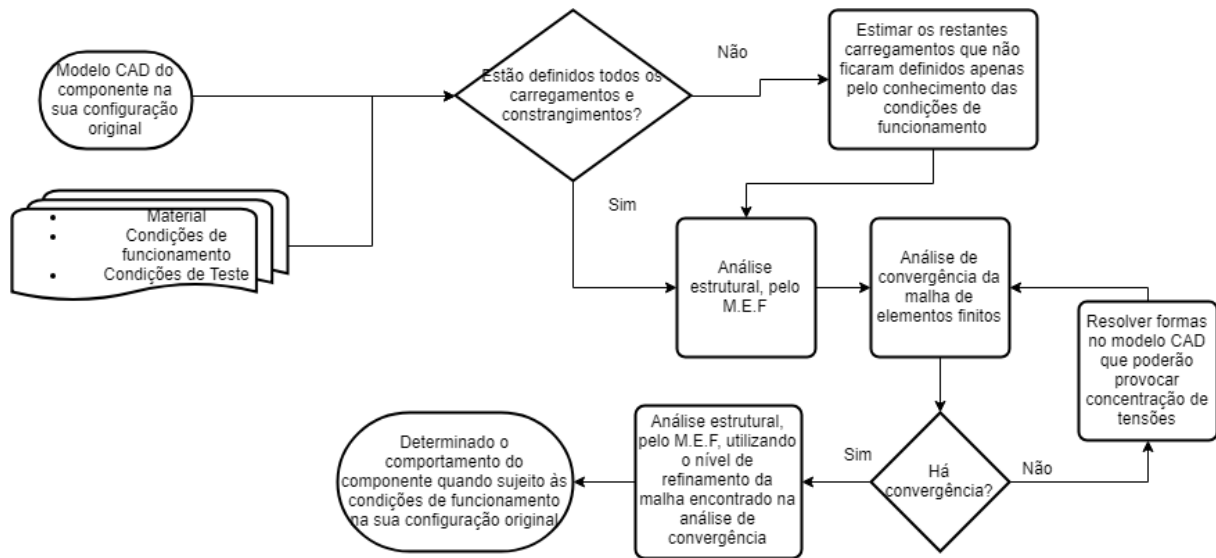


Figura 4.2. Fluxograma das etapas cumpridas de forma a determinar o comportamento funcional do componente na sua configuração original.

Seguindo o fluxograma, começou-se por realizar a modelação do componente no *software* CAD *SolidWorks*. Na Figura 4.3 pode ser visualizado o resultado da modelação tridimensional do *Motorhousing*.

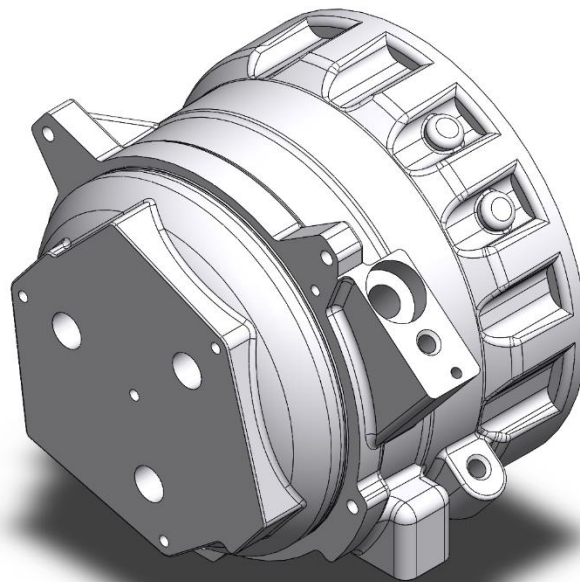


Figura 4.3. Vista em perspectiva isométrica do *Motorhousing* modelado em 3D.

Na Figura 4.4 estão representadas outras vistas do componente modelado. Tem particular interesse a vista frontal b), onde se evidenciam as superfícies interiores do componente. Para além disto, as vistas laterais a) e c) permitem notar que não existem relações de simetria em relação a nenhum dos eixos neste componente.

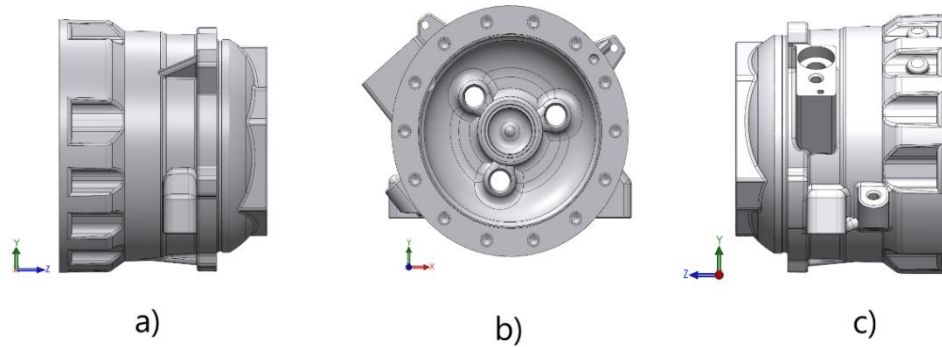


Figura 4.4. Vistas laterais e frontal do *Motorhousing* modelado tridimensionalmente.

Para uma melhor perceção das designações dadas a cada zona do componente ao longo desta dissertação, é apresentada na Figura 4.5 a divisão através de diferentes cores e indicação da nomenclatura utilizada para identificar as diferentes zonas.

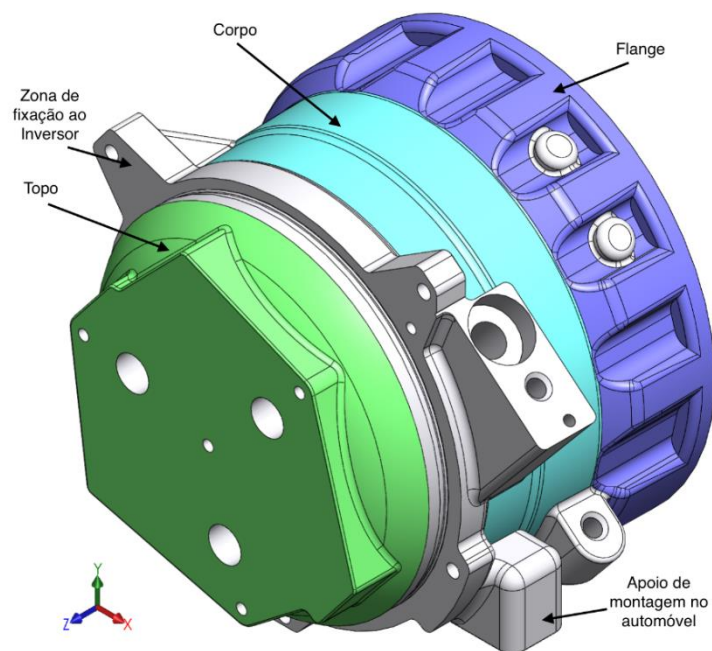


Figura 4.5. Divisão em zonas e nomenclatura utilizada na sua identificação.

A Figura 4.6 mostra uma vista em corte do componente onde, se evidencia que a espessura da parede do *Motorhousing* não é constante. O seu valor máximo é de 13,8 mm, na flange que contém os furos onde entram os parafusos responsáveis pela ligação com os outros componentes da cobertura do compressor. O corpo do componente tem espessura variável entre 7,7 e 13 mm.

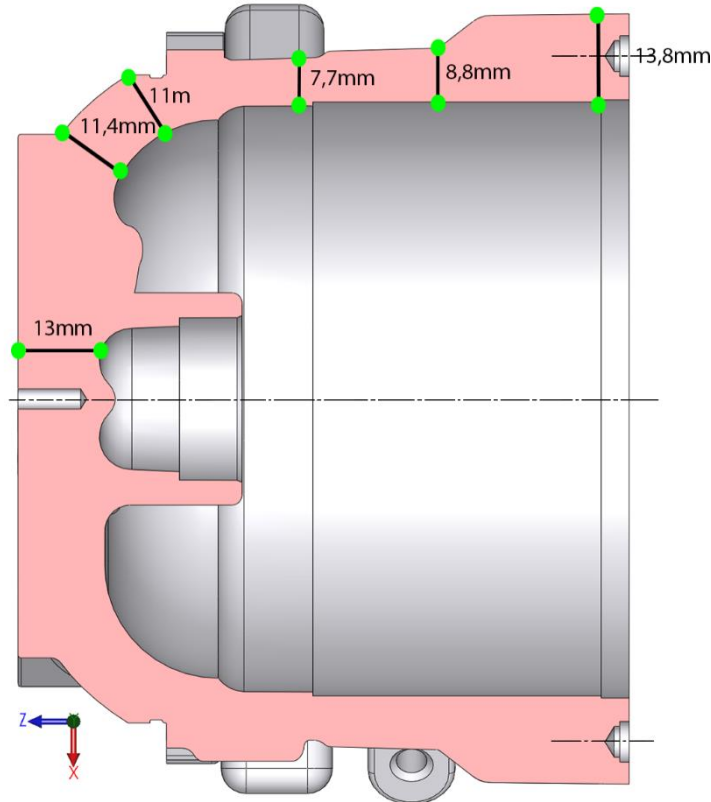


Figura 4.6. Vista em corte do *Motorhousing*.

## 4.2- Material

O material utilizado na construção do *Motorhousing* é a liga de alumínio para fundição por injeção de alta pressão conhecido na norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) por B85 383.0, na norma EN (*European Standard*) por AC-46000 e na norma JIS (*Japanese Industrial Standards*) por HI5302 ADC12. Esta liga tem um tratamento térmico T5.

Esta liga de alumínio destaca-se pela boa adequação à injeção por alta pressão e por ser de fácil maquinação. Para além disto, demonstra ser ideal não só para a produção de componentes com paredes finas e com formas geométricas complexas, como também para aplicações em componentes injetados sujeitos a tensões muito elevadas.

As principais propriedades mecânicas e físicas deste material podem ser consultadas no Anexo 1, de onde se assinala a tensão de cedência (140 MPa) e a tensão de rotura (240 MPa).

### 4.3- Análise estrutural pelo método dos elementos finitos

Na análise estrutural foram tidas em conta as condições de apoio do componente, a pressão exercida internamente devido ao funcionamento do compressor e, também, a força aplicada na flange onde se encontram os furos que permitem a ligação aparafusada com os componentes *Centerhousing* e *Rearhead*.

O compressor é apoiado nos suportes existentes no veículo através das zonas indicadas pelas setas de cor azul na Figura 4.7. Para além disto, a face indicada a cor vermelha na Figura 4.7 é fixa devido à existência de um outro componente, o inversor do compressor, chamado de *Inverter Carrier* (componente a cor azul na Figura 4.8).

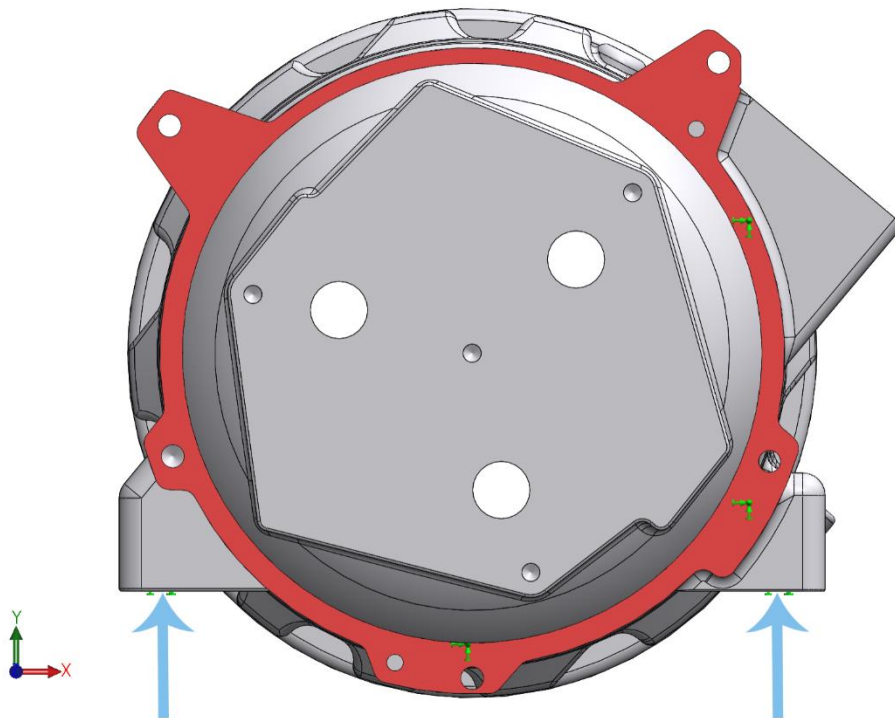


Figura 4.7. Condição de apoio para a análise estrutural do *Motorhousing*.

Em condição de serviço, a pressão interna no *Motorhousing* é de aproximadamente 20 bar; no entanto, para efeitos de simulação foram consideradas as pressões internas utilizadas no teste dos vários componentes da cobertura do compressor. A pressão interna considerada para o componente *Motorhousing* tem assim o valor de 65 bar. Para os componentes *Centerhousing* e *Rearhead* considerou-se respetivamente os valores de 120 e 170 bar (Figura 4.8). Este diferencial de pressão serve para testar a peça caso haja um pico de pressão no sistema de ar-condicionado. No entanto, no compressor existe uma válvula de segurança que atua caso a pressão ultrapasse o valor normal de funcionamento.

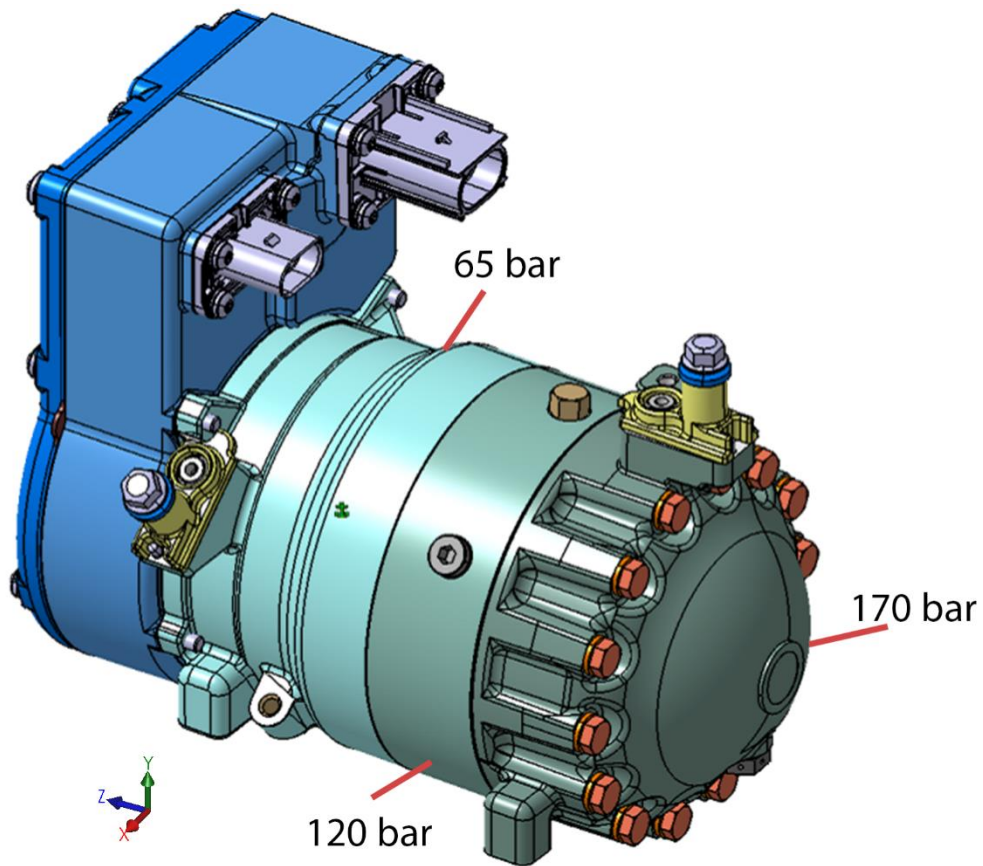


Figura 4.8. Modelação da montagem do compressor e pressões internas consideradas para cada componente da cobertura.

Na Figura 4.9 pode ser visto em corte a montagem entre os componentes e a indicação das pressões em cada uma das câmaras do compressor.

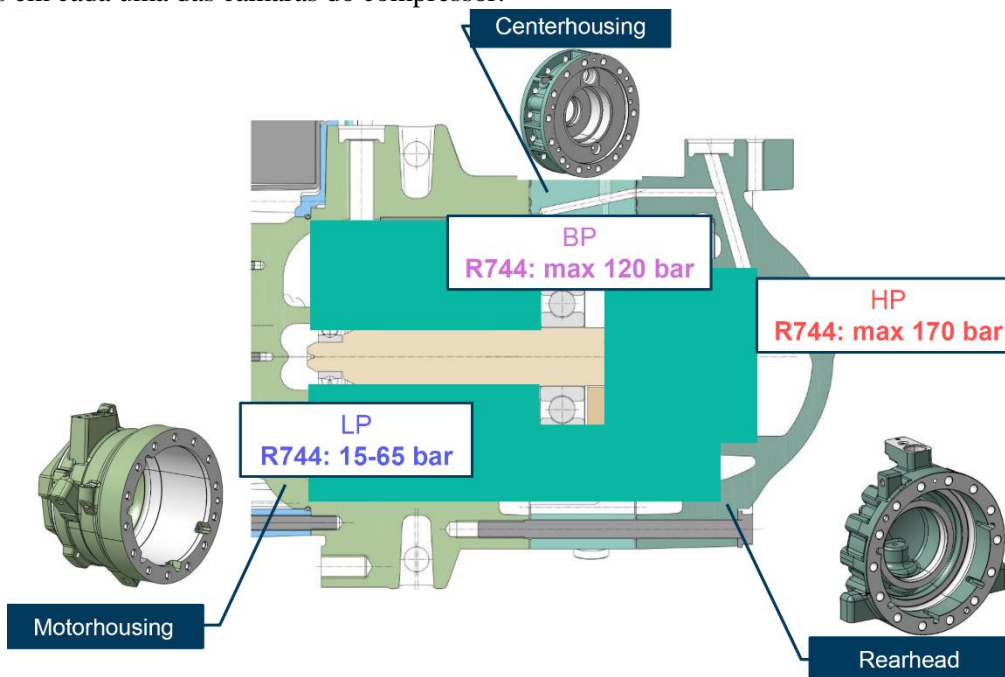


Figura 4.9. Vista em corte da montagem e pressões internas.

Para além da pressão interna, foi considerada uma força aplicada na flange do *Motorhousing* (Figura 4.10). Esta força foi definida de forma a representar o efeito conjunto da pressão interna no componente *Rearhead* e a ação oposta dos 14 parafusos que fixam os componentes.

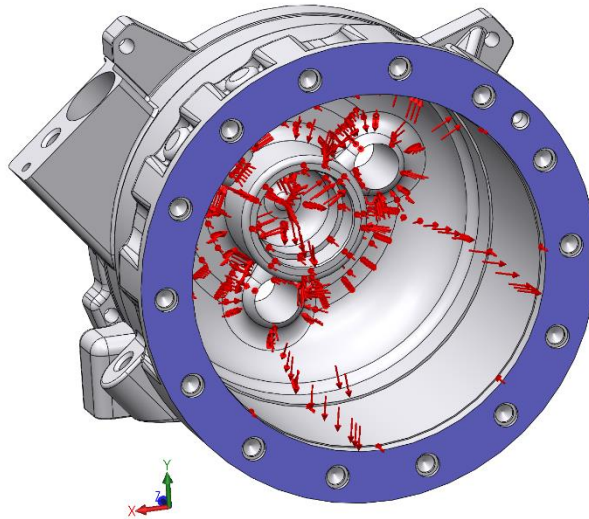


Figura 4.10. Esforços aplicados, pressão interna representada pelas setas a vermelho e força aplicada na flange assinalada a azul.

De seguida, apresentam-se os cálculos que permitiram estimar a força aplicada na flange.

A força resultante da pressão interna ( $F_{Pi}$ ) obtém-se multiplicando a pressão interna (170 bar = 17 MPa) pela área projetada (diâmetro interno = 95,5 mm):

$$F_{Pi} = P_i \times A = 17 \times \frac{\pi \times 95,5^2}{4} = 121,8 \text{ kN} \quad (4.1)$$

Segundo (G.Budynas e J.Keith Nisbett, 2011) não existe um ponto de cedência definido claramente no diagrama de tensão-extensão (Figura 4.11) para um parafuso de boa qualidade.

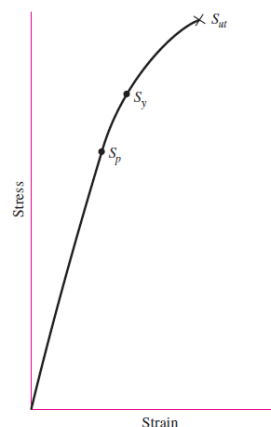


Figura 4.11. Diagrama tensão-extensão típico para um parafuso, identificando a tensão de prova  $S_p$ , tensão de cedência  $S_y$  e tensão de rotura  $S_{ut}$  (G.Budynas e J.Keith Nisbett, 2011).

Como se observa na Figura 4.11, o diagrama tem um progresso suave até ocorrer a fratura. Isto, significa que o parafuso retém a sua capacidade de carregamento após ser aplicado o momento de aperto. Sendo que, é este facto que faz manter o parafuso apertado e determina a força da ligação aparafusada.

Assim, tendo em conta que na ligação aparafusada entre os componentes da cobertura do compressor são utilizados parafusos M6 de classe 10.9, e seguindo as recomendações referidas em (G.Budynas e J.Keith Nisbett, 2011), a força devido à pré-carga do parafuso é obtida por:

$$F_i = 0,75F_p \quad (4.2)$$

Onde  $F_p$  é a carga de prova, obtida a partir de:

$$F_p = A_t S_p \quad (4.3)$$

Em que  $A_t$  é a área da secção resistente do parafuso, que consultando o Anexo 2 tem um valor de 20,1 mm<sup>2</sup>. Consultando o Anexo 3, é obtido o valor de 830 MPa para  $S_p$  (tensão de prova do parafuso).

Deste modo, a partir de (4.3) obtém-se  $F_p = 16,7$  kN.

Através de (4.2), obtém-se  $F_i = 12,5$  kN.

Assim, tendo em conta que são utilizados na ligação aparafusada 14 parafusos, o valor da força devido à ação dos parafusos é de  $F_a = 14F_i = 175$  kN.

O carregamento aplicado na flange do *Motorhousing* corresponde à sobreposição dos dois esforços estimados:  $F = F_a - F_{pi} = 175 - 121,8 = 53,2$  kN.

Para as condições referidas, o resultado da análise estrutural relativamente à tensão de Von Mises é apresentado na Figura 4.12.

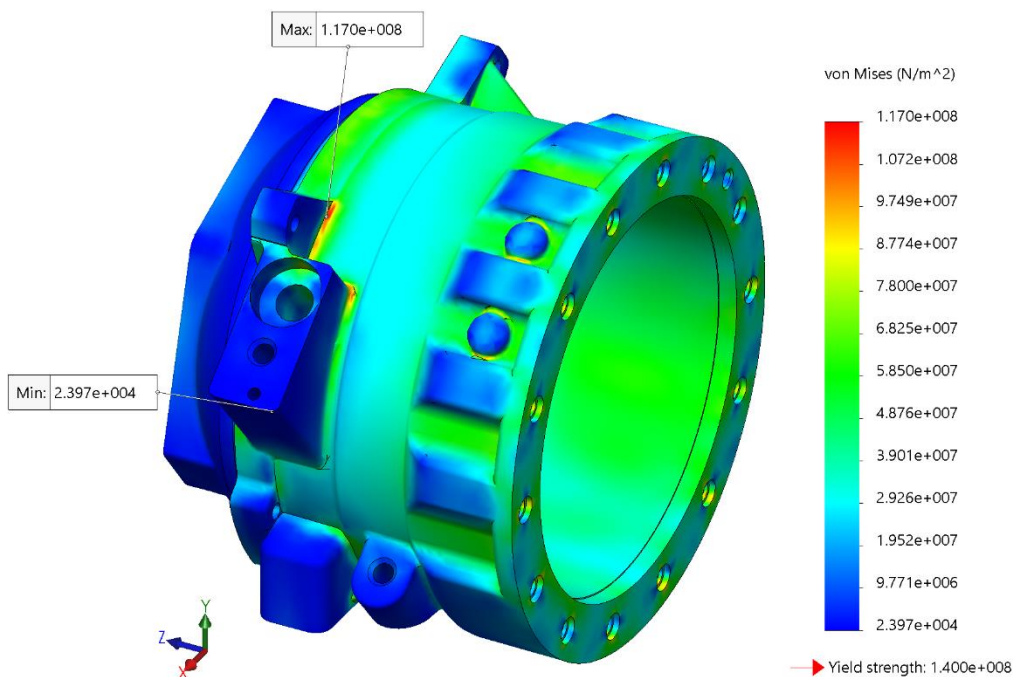


Figura 4.12. Distribuição das tensões de Von Mises induzidas no *Motorhousing*.

A tensão de Von Mises máxima obtida é de 117 MPa, porém este valor de tensão encontra-se muito localizado como é observado pela região a vermelho na Figura 4.12. O corpo do componente apresenta valores de tensão de Von Mises entre 29,3 MPa e 78 MPa, estando estes valores distantes do valor de 140 MPa que é a tensão de cedência (limite elástico) do material utilizado.

#### 4.4- Análise de convergência

De forma a validar o refinamento da malha de elementos finitos, foi feito um estudo de convergência. Para esse efeito, foram seleccionados diferentes níveis de refinamento da malha utilizada na análise e foram calculados os valores da tensão de Von Mises para cada um dos níveis de refinamento da malha, com vista a confirmar a existência de um comportamento assintótico de convergência para um valor de tensão à medida que a malha fica cada vez mais refinada através do controlo do tamanho dos seus elementos.

Na Tabela 4.1 estão registados os diferentes valores para o tamanho de elemento utilizado, os correspondentes números de nós e de elementos gerados, e o resultado observado para o valor de tensão de Von Mises máximo ( $\sigma_{VMmax}$ ) no componente para cada nível de refinamento da malha.

Tabela 4.1. Estudo de convergência do refinamento da malha.

<b>Tamanho global do elemento (mm)</b>	<b>Número de nós gerados</b>	<b>Número de elementos gerados</b>	<b><math>\sigma_{VMmax}</math> (MPa)</b>
5,57068	74078	45923	117,6
5,47783	75778	47073	116,6
5,38499	78866	49116	118,1
5,29214	80433	50134	111,4
5,1993	83553	52260	115,3
5,10646	84285	52679	114,8
5,01361	85877	53740	111,3
4,92077	87577	54847	110,9
4,82792	91380	57429	118,6
4,73508	94356	59349	119,3
4,64223	98809	62364	125,2
4,54939	101367	64107	119,1
4,45654	105725	67094	118,1
4,3637	108336	68624	118,8
4,27086	113728	72327	117,6
4,17801	119122	76085	115,5
4,08522	123986	79444	117,0
3,99232	130137	83525	116,0
3,89947	134773	86564	118,7
3,80666	140272	90323	118,2

Na Figura 4.13 é possível reparar que se verifica um comportamento convergente.

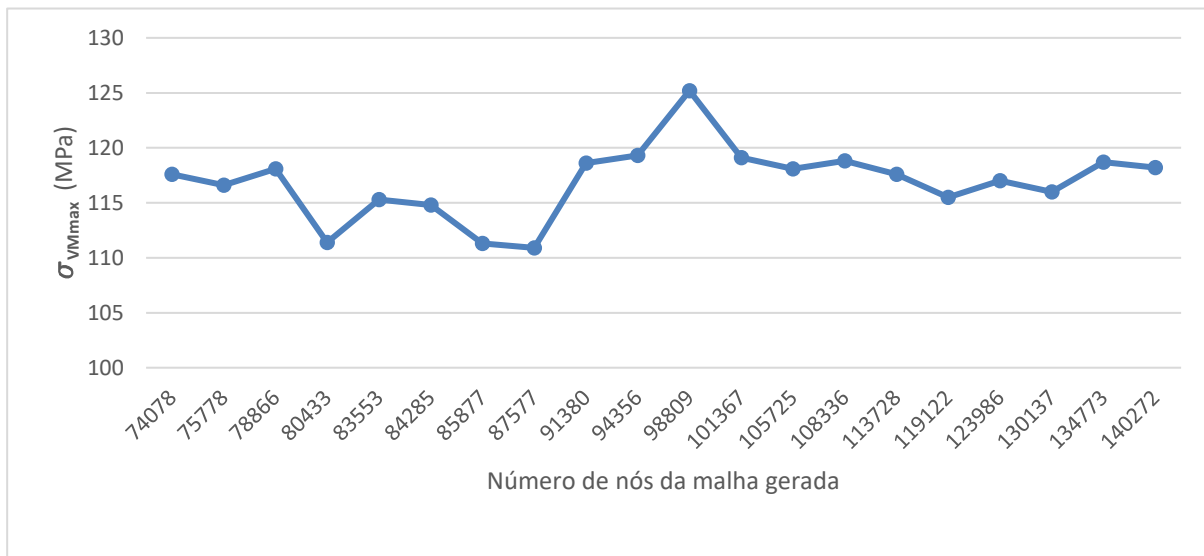


Figura 4.13. Gráfico da análise de convergência.

Considerando a análise de convergência, concluiu-se que para a obtenção de resultados realistas deve ser escolhido um valor de tamanho global do elemento variável entre 4,45654mm e 3,8066mm, visto que, para este intervalo de valores, o resultado para a tensão de Von Mises máxima no componente tende para o valor médio de 117 MPa, à medida que se refina a malha.

Na Figura 4.14 apresenta-se a malha de elementos finitos gerada para a análise estrutural realizada.

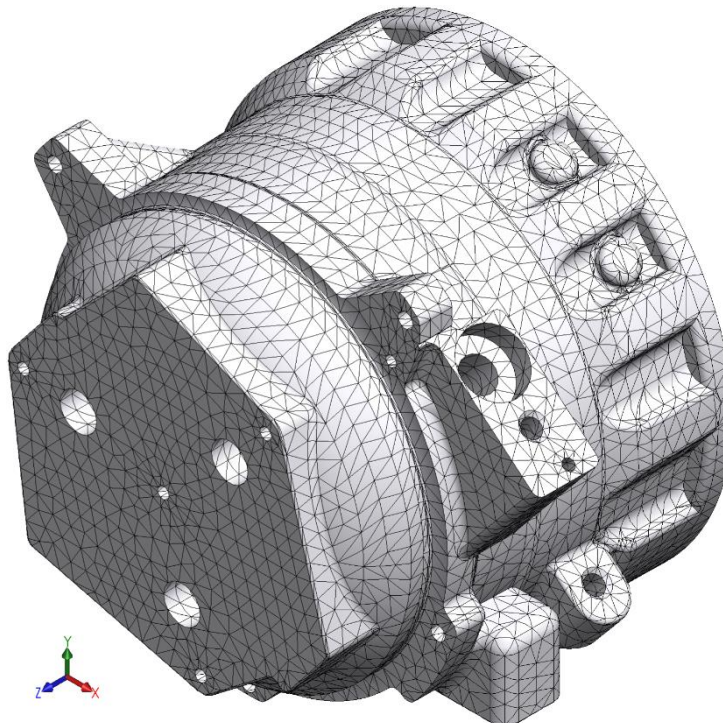


Figura 4.14. Malha de elementos finitos criada para a simulação numérica do *Motorhousing*.

## 4.5- Determinação da pressão interna máxima

Tendo em conta as condições de funcionamento do *Motorhousing* realizou-se um estudo para determinar a pressão interna máxima que este componente consegue suportar antes de se alcançar a tensão de cedência (limite elástico) do material. Recorda-se que o valor da tensão de cedência situa-se nos 140 MPa para a liga de alumínio utilizada na construção do componente.

O procedimento passou então por correr diferentes análises variando o valor de pressão interna. Partiu-se da pressão interna de 65 bar, até se verificar que o componente tem aplicadas tensões de Von Mises máximas superiores à tensão de cedência de 140 MPa.

De seguida, na Tabela 4.2 estão os resultados da tensão de Von Mises máxima ( $\sigma_{VMmax}$ ) e da extensão máxima ( $\epsilon_{max}$ ) para diferentes valores de pressão interna aplicada no *Motorhousing*. Como foi referido anteriormente, começou-se por aplicar o valor correspondente à pressão de 65 bar. Depois, aumentou-se o valor da pressão interna em incrementos de 5 bar e registaram-se os valores da  $\sigma_{VMmax}$ .

Tabela 4.2. Valores da tensão de Von Mises máxima e extensão máxima para diferentes valores de pressão interna.

<b>Pressão Interna (bar)</b>	<b><math>\sigma_{VMmax}</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_{max}</math></b>
65	117,0	0,00131
70	122,6	0,00135
75	128,3	0,00139
80	134,0	0,00143
85	139,6	0,00147
90	145,3	0,00151

A partir dos resultados obtidos e através de interpolação determinou-se que a tensão de cedência de 140 MPa é alcançada quando é aplicada uma pressão interna de 85,4 bar.

Organizando os valores de  $\sigma_{VMmax}$  e  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  graficamente (Figura 4.15) verifica-se o esperado comportamento linear elástico.

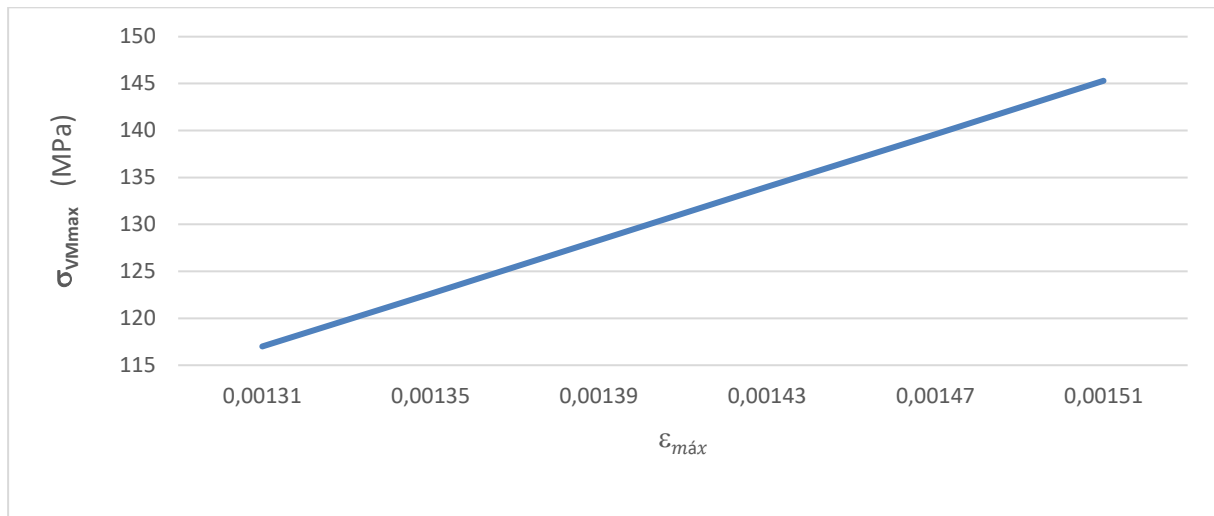


Figura 4.15. Relação tensão-extensão para diferentes níveis de pressão interna.

É de notar que os valores de extensão se mantêm distantes do valor de 1% de extensão de rotura indicada para a liga de alumínio em causa.

# 5

## Otimização da configuração geométrica do *Motorhousing*

### 5.1- Identificação das zonas com possibilidade de melhoria para a otimização

Por observação do resultado para a distribuição da tensão de Von Mises ao longo do componente obtido na análise estrutural realizada no capítulo 4 foram identificadas as zonas que, por estarem sujeitas a níveis menos elevados de tensão seriam zonas com possibilidade de serem modificadas de forma a otimizar o componente tendo em conta o objetivo da redução da sua massa.

Na Figura 5.1 estão identificadas as zonas seleccionadas para alterações com vista à otimização: flange, corpo e topo.

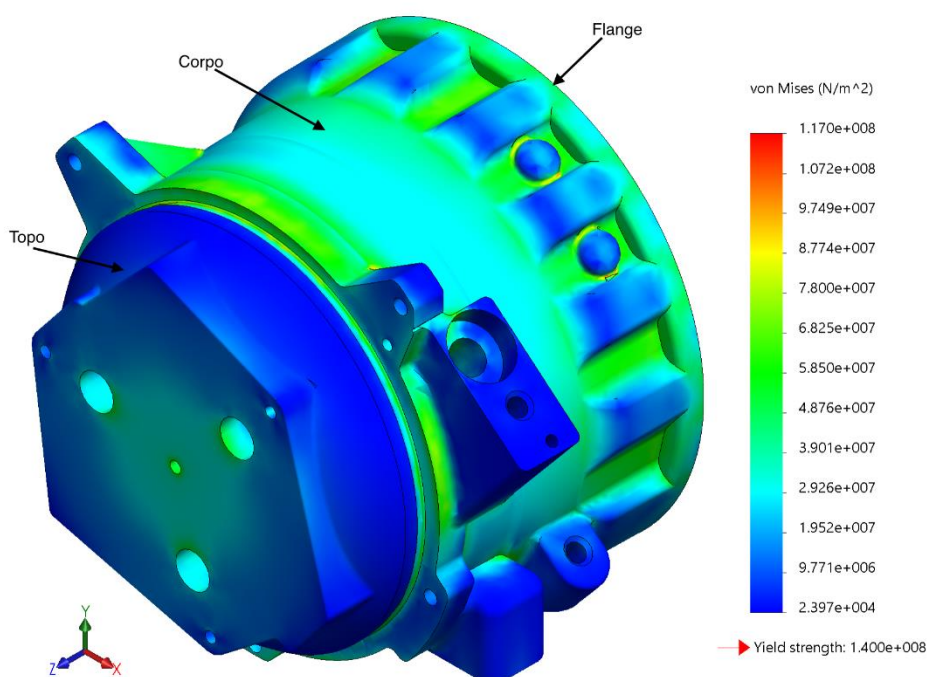


Figura 5.1. Identificação das zonas com possibilidade de melhoria para a realização da otimização.

Por ser uma das zonas em que os níveis de tensão se encontram mais baixos, para a flange escolheu-se modificar a configuração dos seus rasgos e espessura de parede. O corpo e o topo do componente encontram-se também com níveis de tensão baixos e por isso foram identificados como

zonas de possível melhoria. Para além disto, estas zonas foram escolhidas porque existe o requisito da diminuição da sua espessura para valores inferiores a 5 mm de modo a reduzir a ocorrência de defeitos quando o componente é produzido através da tecnologia HPDC.

## 5.2- Otimização dos rasgos da flange

Com o objetivo de se avaliar o efeito da alteração da geometria dos rasgos presentes na flange do componente *Motorhousing* no valor da massa do mesmo foi criado um estudo de otimização na ferramenta *Design Study* do *Solidworks*.

Começou-se por definir o problema através da escolha dos níveis alto e baixo para as variáveis de projeto, de forma a elas serem consideradas como variáveis contínuas, para que assim a ferramenta *Design Study* utilizasse o planeamento de experiências de Box-Behnken.

O problema de otimização em causa foi definido da seguinte forma apresentada na Tabela 5.1. Para a variação da configuração geométrica destes rasgos foram escolhidos como parâmetros a sua largura ( $L_r$ ) e profundidade ( $P_r$ ).

Tabela 5.1. Formulação do problema de otimização para a geometria dos rasgos.

		Nível baixo	Nível alto
Variáveis de projeto	$L_r$	8 mm	17 mm
	$P_r$	4 mm	8 mm
Constrangimento	$\sigma_{VMmax} \leq 140 \text{ MPa}$		
Objetivo	Minimização da massa		

Desta forma, são considerados níveis igualmente espaçados para cada variável de projeto, correspondendo aos níveis baixo, central e alto de cada variável, que como apresentado anteriormente em 3.3.3 são codificados no planeamento de Box-Behnken, respetivamente por -1, 0, 1. Os cenários de projeto criados estão apresentados no Anexo 4.

A configuração ótima resultante apresenta o valor de 12,5 mm para a largura do rasgo e 4 mm para a profundidade. Com estes valores a massa do componente é reduzida para 1,097 kg, sendo que o componente apresentava inicialmente 1,126 kg de massa.

Para averiguar a possibilidade de se conseguir uma maior redução de massa através da avaliação de um número maior de cenários foi definido o mesmo problema de otimização, mas com a definição de um incremento para os valores tomados para as variáveis de projeto dentro dos intervalos definidos anteriormente (Tabela 5.2). Assim, são considerados valores discretos para as variáveis de projeto forçando o *software* a calcular os resultados para cada cenário e a encontrar a solução ótima de entre os cenários definidos.

Tabela 5.2. Formulação do problema de otimização para a geometria dos rasgos, utilizando variáveis discretas.

		Nível alto	Nível baixo	Incremento
Variáveis de projeto	$L_r$	8 mm	17 mm	1 mm
	$P_r$	4 mm	8 mm	2 mm
Constrangimento	$\sigma_{VMmax} \leq 140 \text{ MPa}$			
Objetivo	Minimização da massa			

Na Figura 5.2 apresentam-se a configuração inicial e a configuração ótima resultante desta análise realizada. Na configuração inicial (Figura 5.2 a)) a largura do rasgo é de 17 mm e a profundidade é de 4 mm. A configuração ótima (Figura 5.2 b)) apresenta rasgos com largura de 14 mm e profundidade de 8 mm. No Anexo 5 são apresentados os valores que tomam as variáveis de projeto para os diferentes cenários criados para a configuração geométrica do componente.

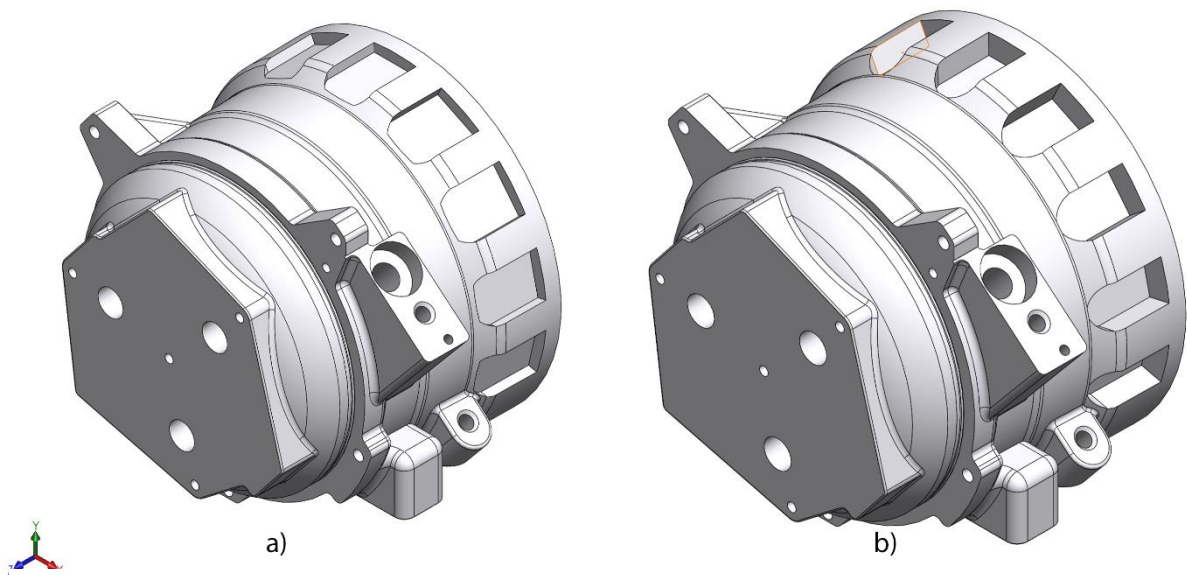


Figura 5.2. a) Configuração inicial da flange e b) configuração ótima.

Na Figura 5.3 apresentam-se os resultados da análise estrutural para a tensão de Von Mises das duas configurações referidas. A localização exata do local onde acontecem os valores máximo e mínimo é apresentada no Anexo 6.

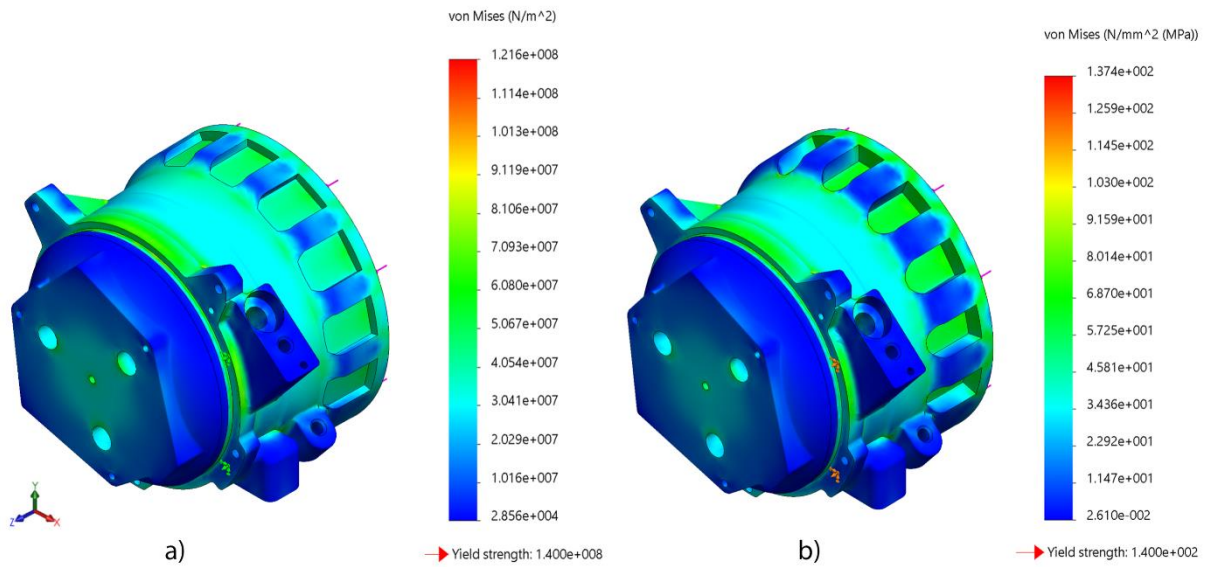


Figura 5.3. a) Distribuição das tensões de Von Mises na configuração inicial da geometria da flange e b) na configuração ótima.

Na configuração original o componente apresenta 1,126 kg de massa e na configuração ótima resultante desta análise a massa sofre uma redução de 3,4% para 1,088 kg. De notar que a formulação do problema de otimização definindo, para além dos níveis baixo e alto, um incremento para os valores das variáveis de projeto resultou na obtenção de uma maior redução de massa para o componente, isto porque desta forma foram realizadas 30 experiências em vez de apenas 9, criando-se um maior leque de cenários com possibilidade de apresentarem melhorias para a configuração geométrica.

### 5.3- Otimização de um anel de reforço para a zona da flange

Para a zona da flange foi estudada também a hipótese de substituir a configuração geométrica original para uma que constitua um anel de reforço nesta parte do componente. Esta alteração na configuração geométrica do componente está representada na Figura 5.4.

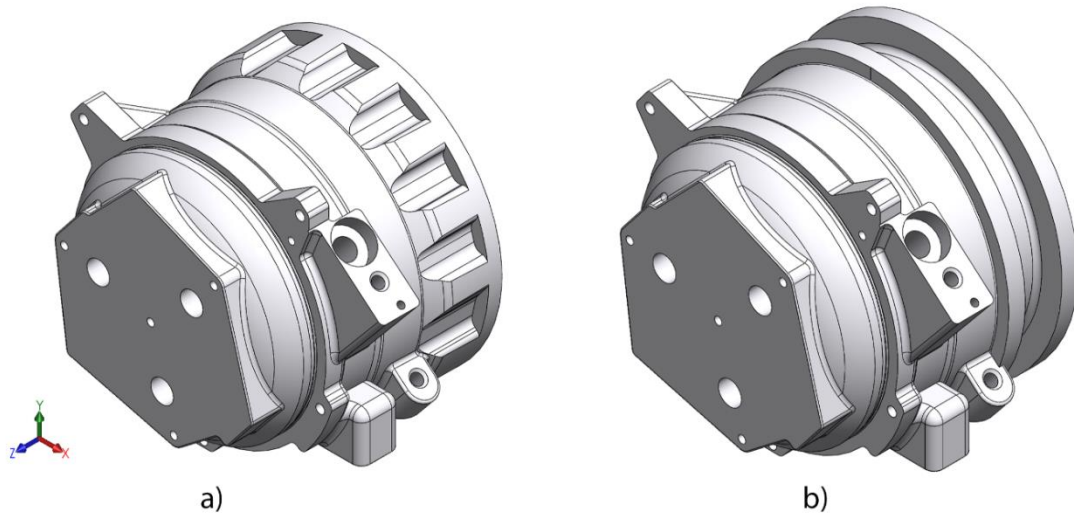


Figura 5.4. a) Configuração original e b) configuração com anel de reforço.

Realizou-se um estudo de otimização da geometria deste anel de reforço. A modelação foi feita a partir de um esboço (Figura 5.5) responsável por criar um rasgo que faz surgir a forma de anel que circunscreve o componente. No estudo de otimização são utilizadas como variáveis de projeto as dimensões que definem a largura ( $L_a$ ) e profundidade ( $P_a$ ) do rasgo, fazendo-se assim variar a largura e a altura do anel de reforço.

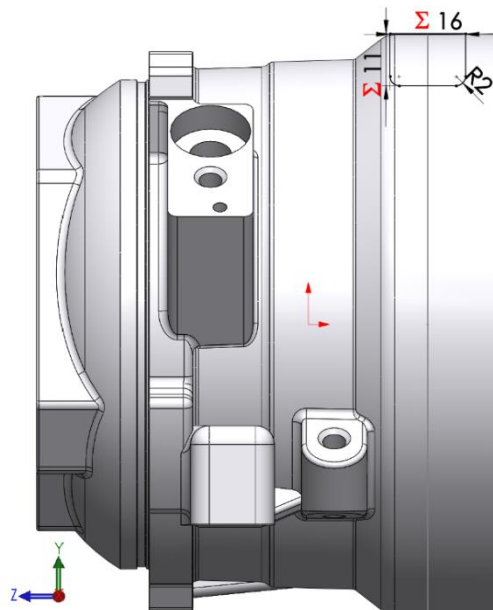


Figura 5.5. Esboço que define o anel de reforço.

Na Tabela 5.3 encontra-se a formulação do problema de otimização em causa.

Tabela 5.3. Formulação do problema de otimização para o anel de reforço.

		Nível baixo	Nível alto
Variáveis de projeto	$L_a$	8 mm	16 mm
	$P_a$	7 mm	11 mm
Constrangimento	$\sigma_{VMmax} \leq 140 \text{ MPa}$		
Objetivo	Minimização da massa		

Na configuração inicial (Figura 5.6 a)) deste estudo, a profundidade é de 11 mm e a largura é de 16 mm. A configuração ótima (Figura 5.6 b)) apontada pela ferramenta *Design Study* é neste caso aquela que combina os níveis baixo (7 mm) e central (12 mm) para a profundidade e largura, respetivamente.

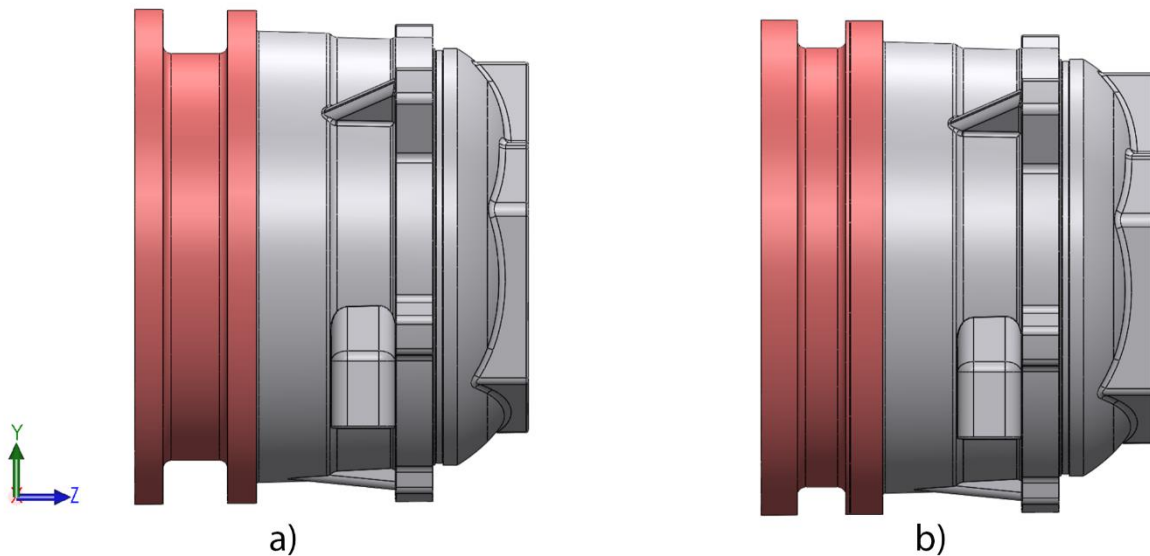


Figura 5.6. a) Configuração inicial do anel de reforço e b) configuração ótima.

Os diferentes cenários criados para a configuração do componente com os respetivos níveis considerados para as variáveis de projeto e o valor da resposta para o valor de tensão de Von Mises máxima e para a massa do componente são apresentados no Anexo 7.

A distribuição das tensões de Von Mises no componente com anel de reforço encontra-se representada na Figura 5.7.

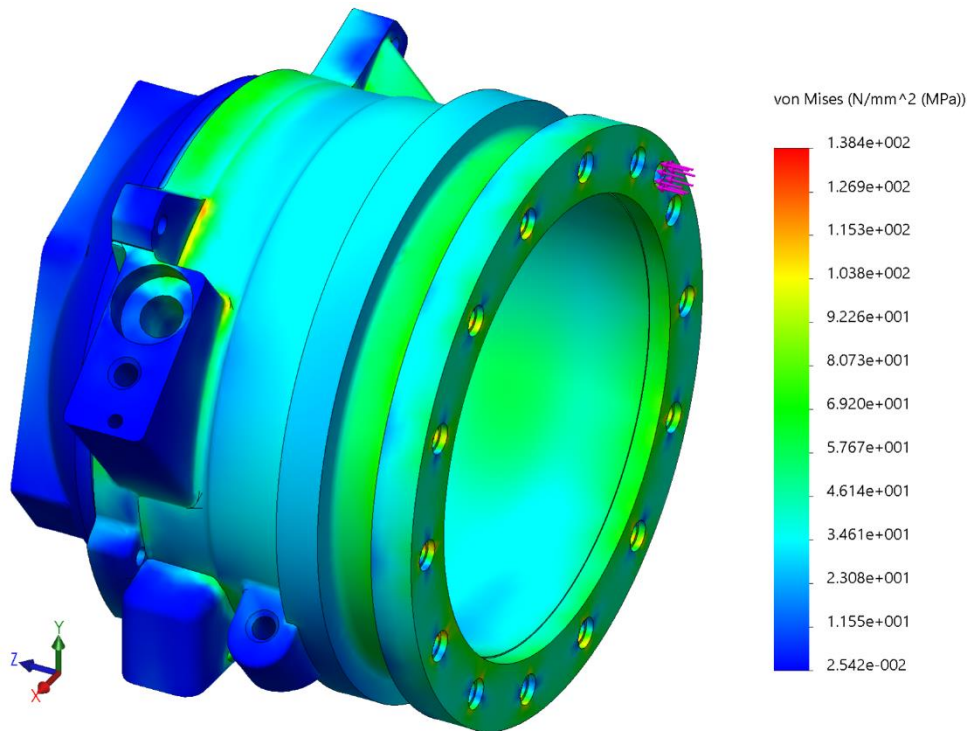


Figura 5.7. Tensão de Von Mises ao longo do componente com anel de reforço.

De notar que o valor máximo de tensão se encontra muito localizado e que os níveis de tensão no corpo do componente e na zona da flange encontram-se entre 34,6 MPa e 92,3 MPa, valores estes que são semelhantes aos obtidos na simulação com a configuração original do componente sem qualquer anel de reforço. A localização dos valores máximo e mínimo da tensão de Von Mises é apresentada no Anexo 8.

Como foi referido anteriormente, a massa do componente original tem o valor de 1,126 kg. Na configuração ótima resultante da otimização do anel de reforço obteve-se um valor de massa de 1,103 kg, sendo a diminuição da massa entre as duas situações de 2%.

Pode-se concluir que a introdução do anel de reforço no componente não conduz a uma redução muito significativa da massa. Isto deve-se sobretudo à aplicação da força na flange do componente que faz com que os valores de tensão de Von Mises sejam superiores quando se retira material desta zona. Caso nas condições de funcionamento só fosse considerada a pressão interna sem a aplicação da força na zona da flange, a configuração com anel de reforço teria um impacto mais elevado no que diz respeito ao objetivo de redução da massa do componente. Por exemplo, com as variáveis de projeto  $P_a=11$  mm e  $L_a=16$  mm o componente ficaria com apenas 1,016 kg, o que se traduz numa redução de massa de 9,8%.

## 5.4- Otimização da espessura de parede do corpo

Foi imposto como requisito de projeto a diminuição da espessura da parede do corpo principal do *Motorhousing*, zona assinalada a vermelho na Figura 5.8, para valores inferiores a 5 mm, de forma a melhorar a qualidade da fundição pelo processo HPDC.

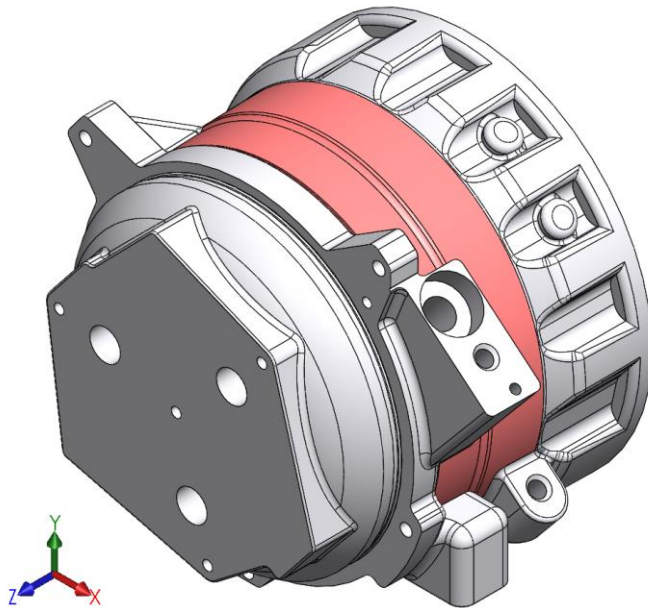


Figura 5.8. Zona do corpo do componente alvo de redução de espessura de parede.

Como base para este estudo, começou-se por reduzir toda a espessura de parede desta zona do corpo para um valor de 5 mm (Figura 5.9 (a)). Com isto, realizou-se uma análise utilizando a ferramenta de otimização *Design Study*, para a obtenção de anéis de reforço (Figura 5.9 (b)) nesta zona com vista a compensar a menor espessura de parede do corpo nesta situação.

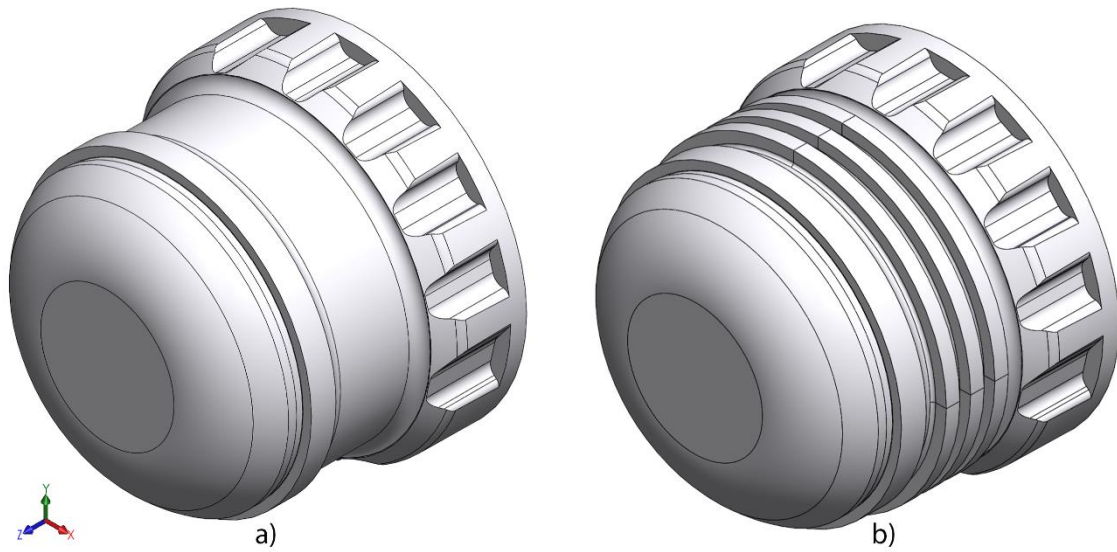


Figura 5.9. a) Corpo com espessura de parede de 5 mm e b) anéis de reforço.

A análise estrutural de partida para esta otimização foi realizada sem considerar todos os apoios e acessórios do componente. Para além disto, foi apenas considerado como constrangimento o apoio fixo representado na Figura 5.10 pelas setas a verde.

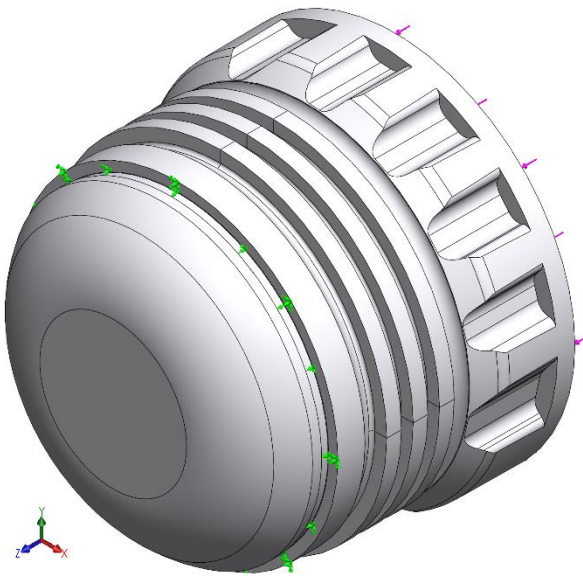


Figura 5.10. Apoio fixo utilizado na análise estrutural base.

O fluxograma que resume as tarefas realizadas para cumprir o objetivo da diminuição da espessura de parede do corpo é apresentado na Figura 5.11.

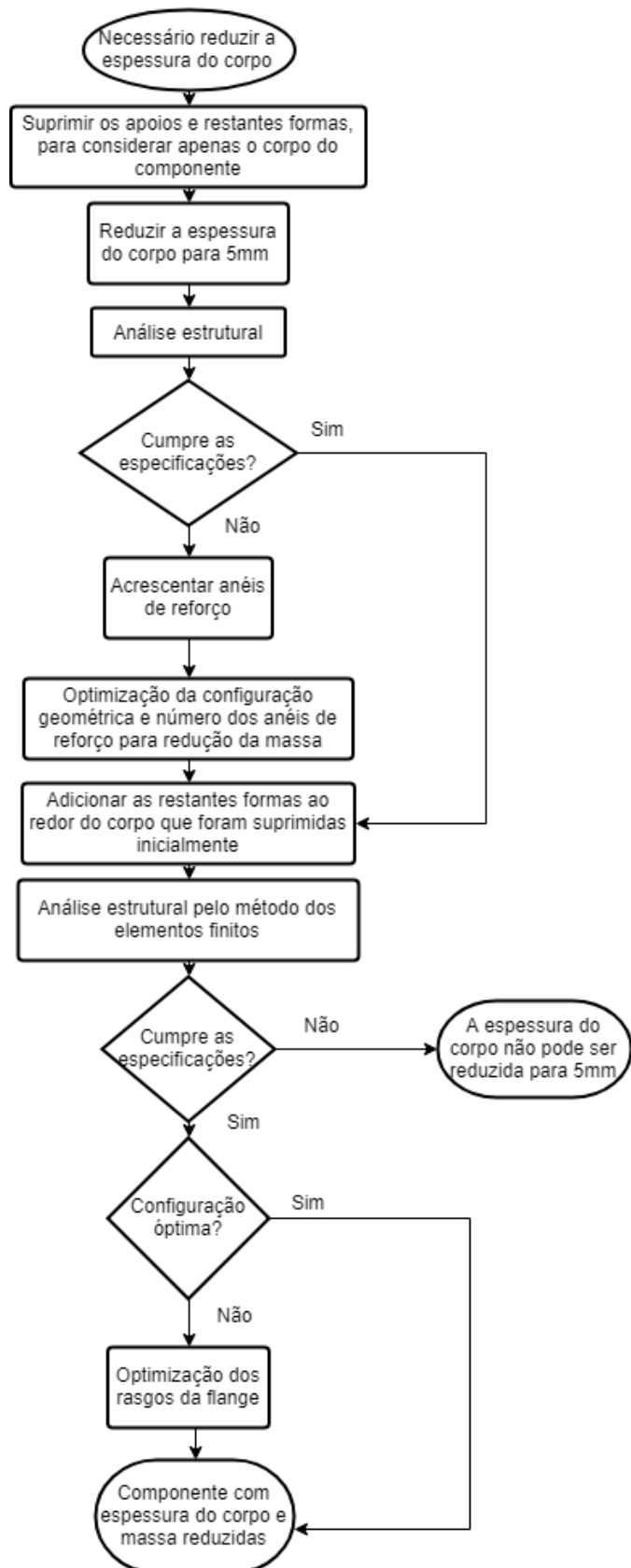


Figura 5.11. Fluxograma das etapas cumpridas para a otimização da massa e da redução da espessura de parede do corpo.

Para encontrar a configuração geometria ótima dos anéis de reforço foram utilizados como parâmetros a sua largura ( $L_c$ ), altura ( $A_c$ ) e também a sua quantidade ( $N_c$ ).

As variáveis de projeto e constrangimentos do problema de otimização em causa estão resumidas na Tabela 5.4. Os níveis de cada fator considerado para cada experiência simulada estão apresentados no Anexo 9.

Tabela 5.4. Formulação do problema de otimização dos anéis de reforço para o corpo do *Motorhousing*.

		Nível baixo	Nível alto	Incremento
Variáveis de projeto	$L_c$	3 mm	5 mm	1 mm
	$A_c$	2 mm	5 mm	1 mm
	$N_c$	2	3	
Constrangimento	$\sigma_{VMmax} \leq 140 \text{ MPa}$			
Objetivo	Minimização da massa			

A configuração ótima obtida tem presente dois anéis de reforço com largura de 3 mm e altura de 2 mm (Figura 5.12). Os resultados podem ser consultados mais em pormenor no Anexo 10.

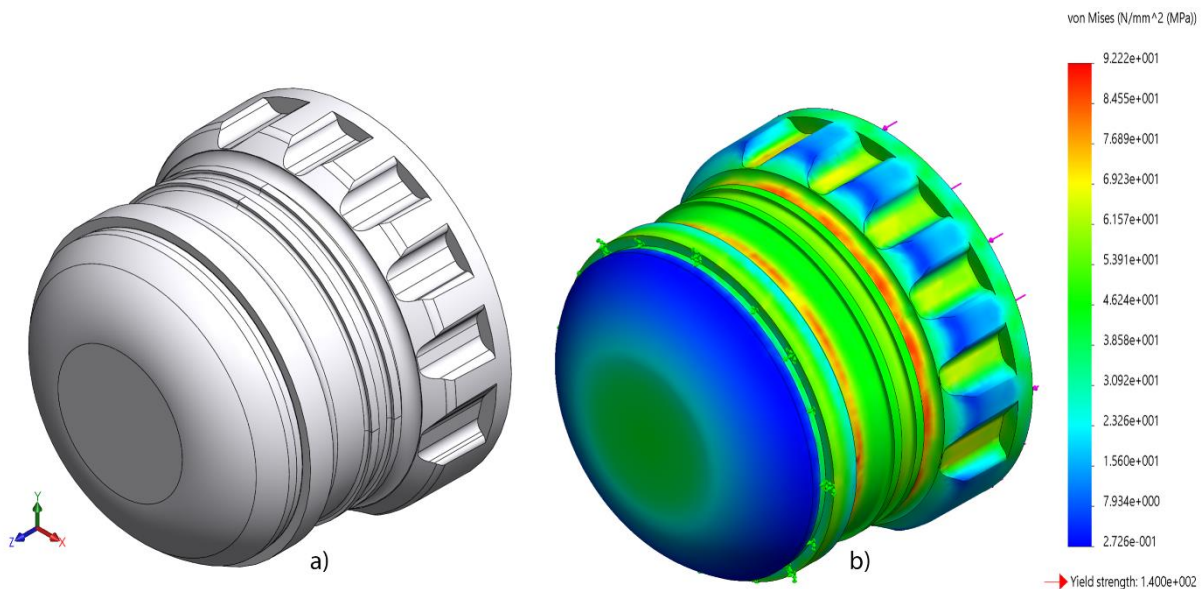


Figura 5.12. a) Configuração ótima para os anéis de reforço e b) resultado para a distribuição de tensões de Von Mises.

Depois de encontrada a configuração ótima para os anéis de reforço do corpo do componente, quando a espessura de parede deste foi reduzida a 5 mm, foram acrescentados os apoios e restantes formas que compõem o *Motorhousing* (Figura 5.13).

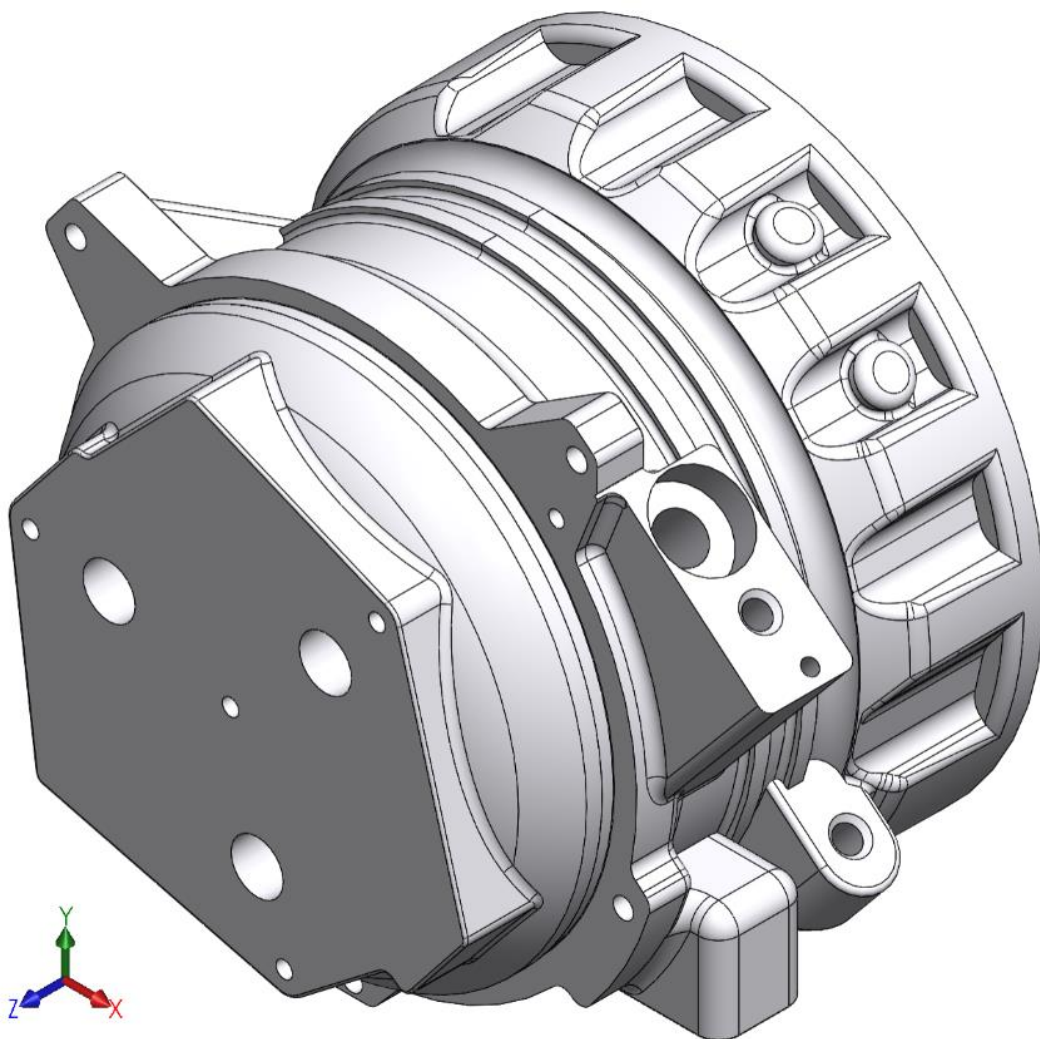


Figura 5.13. *Motorhousing* com espessura de parede do corpo de 5 mm e anéis de reforço.

Assim, é possível realizar novamente a análise estrutural com todos os apoios especificados e averiguar o efeito da redução de espessura do corpo e da introdução dos anéis de reforço na tensão de Von Mises induzida ao longo do componente (Figura 5.14). No Anexo 11 estão identificados os valores máximo e mínimo de tensão obtidos.

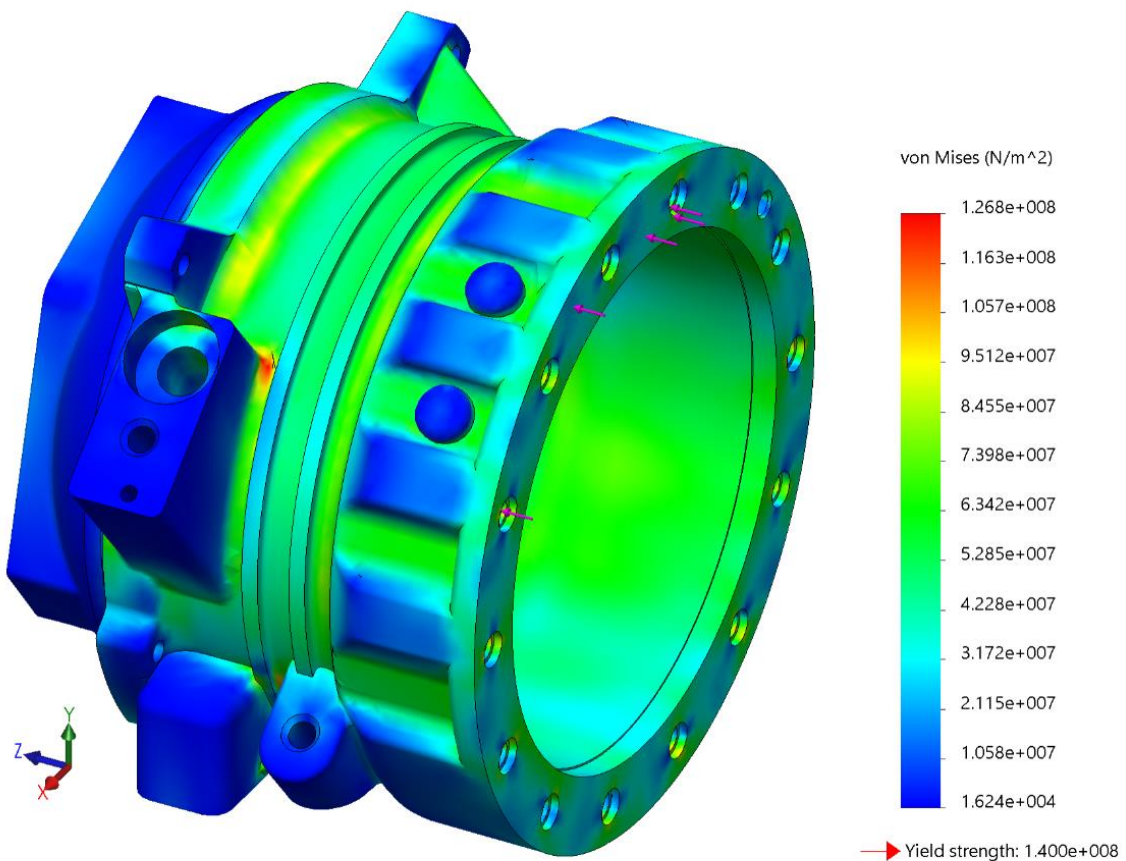


Figura 5.14. Distribuição das tensões de Von Mises induzidas no *Motorhousing* com espessura de parede do corpo de 5 mm e anéis de reforço.

Comparando com a configuração original do componente (Figura 4.12) é notório o aumento da tensão de Von Mises máxima, o que era expectável, fruto da diminuição da espessura de parede do corpo do componente, porém este valor encontra-se ainda distante dos 140 MPa, tensão de cedência (limite elástico) do material utilizado.

A nova configuração encontrada contribui também para o objetivo da redução da massa do componente, visto que nesta configuração, o componente apresenta 1,052 kg, um valor 6,6% inferior ao da configuração original.

## 5.5- Otimização dos rasgos da flange para a nova configuração

Com o objetivo de se obter uma maior redução do peso do componente foi realizada a sobreposição dos estudos em que se otimizaram a configuração dos rasgos da flange e o em que se reduziu a espessura de parede do corpo com a introdução de anéis de reforço.

Para isto, começou-se por definir os rasgos da flange no componente com a configuração ótima encontrada em 5.4. Esta definição foi feita de forma idêntica à realizada em 5.1.

Foi realizado novamente o estudo de otimização da geometria destes rasgos com os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 5.1.

Recordando que no primeiro estudo realizado neste capítulo a configuração ótima dos rasgos da flange apontava para rasgos com profundidade de 8 mm e largura de 14 mm. Neste estudo, verificou-se que esta situação não se mantém quando se considera o componente com a espessura de parede do corpo com 5 mm e anéis de reforço. Por outro lado, verifica-se que para esta configuração nova do *Motorhousing* a geometria ótima dos rasgos da flange é aquela em que os rasgos apresentam uma profundidade de 6 mm e largura de 17 mm.

Depois de realizada a otimização podem ser retomados os pormenores geométricos deixados de parte inicialmente por simplificação. Na Figura 5.15 a) observa-se a configuração ótima encontrada e na Figura 5.15 b) a mesma configuração, mas incluindo todos os aspetos geométricos para produção.

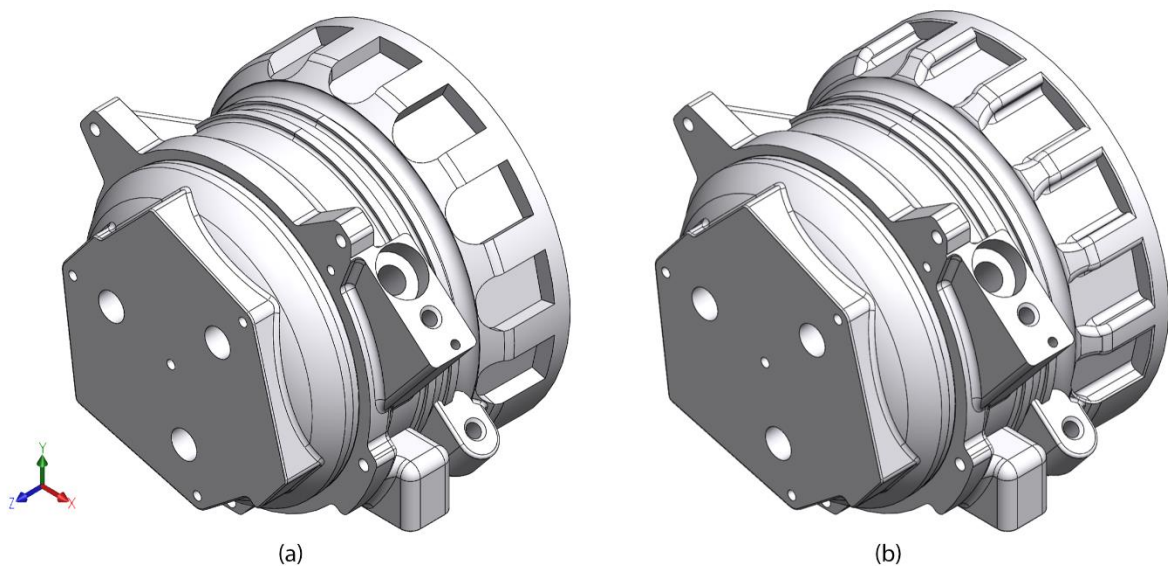


Figura 5.15. a) Configuração ótima para a sobreposição dos estudos de otimização da espessura de parede do corpo e da otimização da geometria dos rasgos da flange e b) acrescento dos aspetos geométricos retirados para simplificação.

Na Figura 5.16 apresenta-se o resultado da distribuição das tensões de Von Mises para a configuração ótima dos rasgos, resultante deste novo estudo de otimização. A localização dos valores máximo e mínimo encontra-se no Anexo 12.

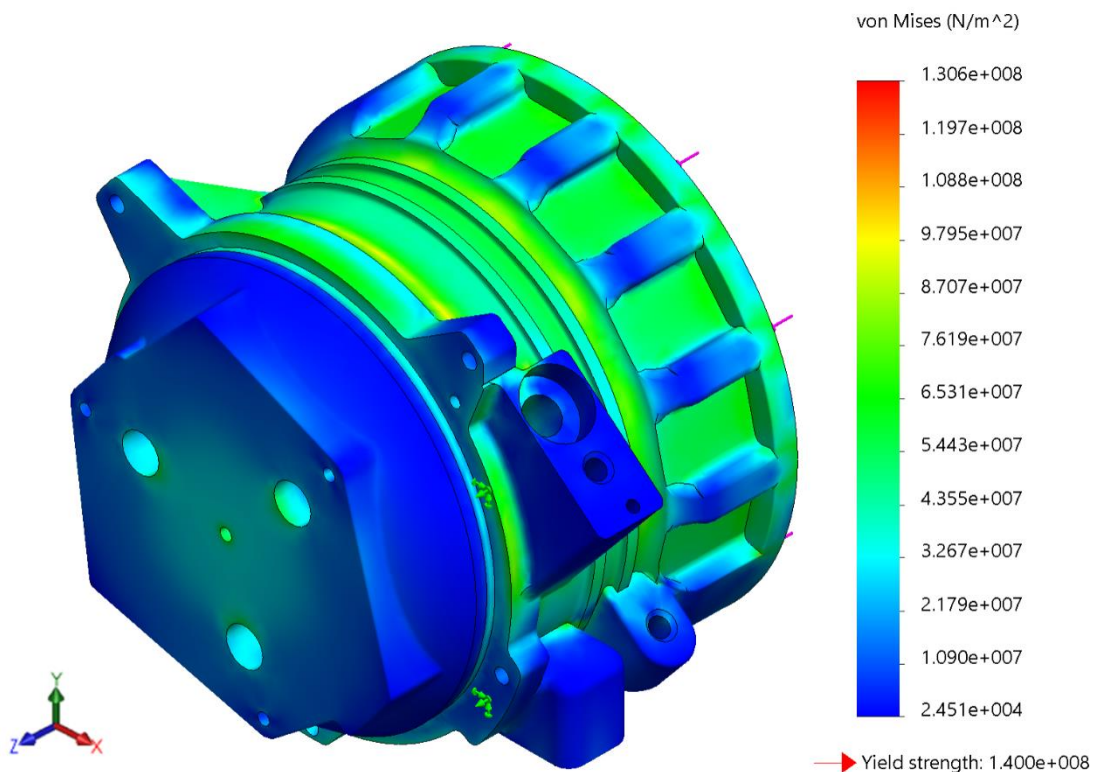


Figura 5.16. Resultado para a distribuição das tensões de Von Mises da configuração ótima dos rasgos da flange.

A sobreposição destas duas análises permitiu obter um componente com massa de 1,023 kg, o que representa uma redução de 9,1% relativamente à geometria original do *Motorhousing*. Com isto, alcançou-se uma configuração geométrica em que mantendo a funcionalidade do componente foi reduzida a massa e também a espessura de parede do seu corpo, conforme especificações de projeto.

De forma a tornar mais notórias as diferenças entre a configuração original e a obtida neste estudo, apresentam-se na Figura 5.17 as vistas em corte das duas configurações, em que é possível verificar a redução de espessura conseguida para a parede do corpo do componente.

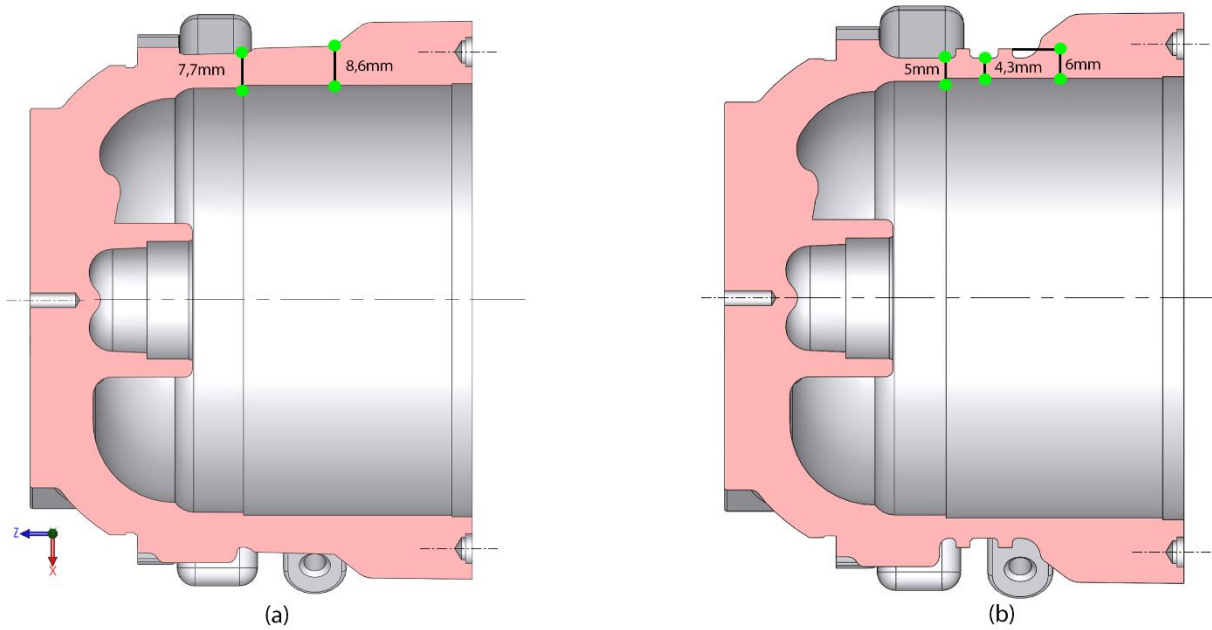


Figura 5.17. a) Vista em corte da configuração original e b) vista em corte da configuração obtida.

## 5.6- Otimização da espessura de parede da flange

A partir da configuração obtida em 5.4 foi avaliada a hipótese de se reduzir a espessura de parede da zona da flange indicada a vermelho na Figura 5.18 a).

Para isto, foi, uma vez mais, utilizada a ferramenta *Design Study*, para formular um problema de otimização em que a única variável de projeto é a dimensão assinalada na Figura 5.18 b) pelo retângulo azul.

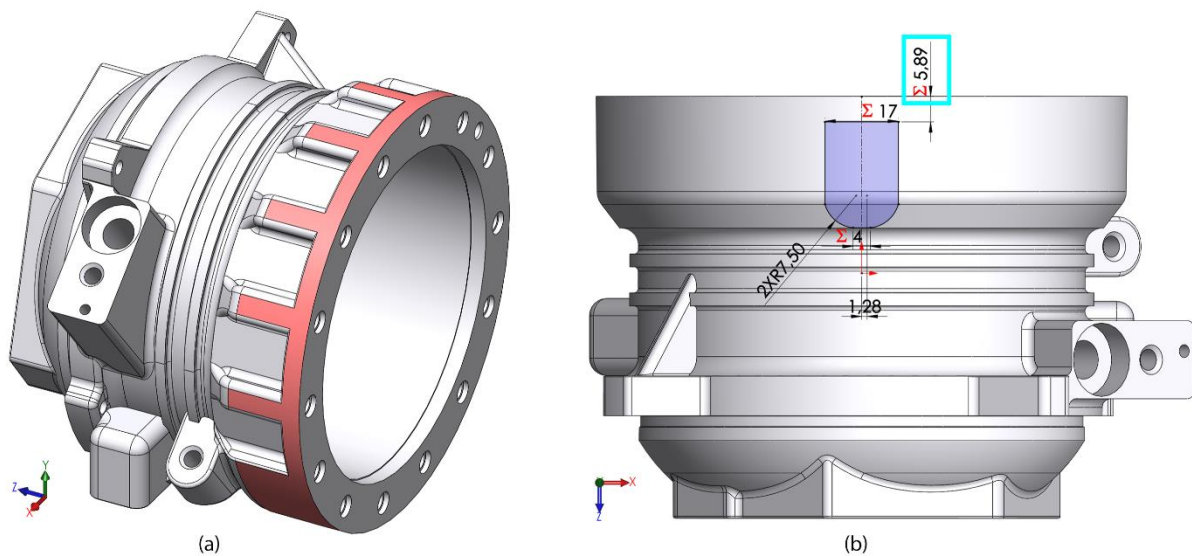


Figura 5.18. a) Parede da flange e b) variável de projeto utilizada na sua otimização, assinalada pelo retângulo azul.

O problema de otimização em causa é enunciado na Tabela 5.5. Na configuração original a flange apresenta uma espessura de 5,89 mm como é indicado na Figura 5.18.

Tabela 5.5. Formulação do problema de otimização da espessura de parede da flange do *Motorhousing*.

		Nível baixo	Nível alto	Incremento
Variável de projeto	Espessura	4 mm	6 mm	0,5 mm
Constrangimento	$\sigma_{VMmax} \leq 140 \text{ MPa}$			
Objetivo	Minimização da massa			

Nesta experiência concluiu-se que esta dimensão pode ser reduzida para 4,5 mm sem provocar alterações significativas na funcionalidade do componente.

Esta alteração permite aumentar a redução de massa conseguida na secção 5.5 de 9,1% para 9,7%, ficando o componente com 1,017 kg.

## 5.7- Alteração da configuração do topo

### 5.7.1- Criação de rasgos no topo

Na secção 5.4 foi introduzido o requisito da diminuição da espessura de parede do corpo do *Motorhousing*. De forma a estender a aplicabilidade deste requisito, foi realizado um estudo para obter uma nova configuração para o topo (Figura 5.19) do componente em que seria respeitada a condição de espessura máxima para a parede de 5 mm e contribuindo também para o objetivo global de minimização da massa.

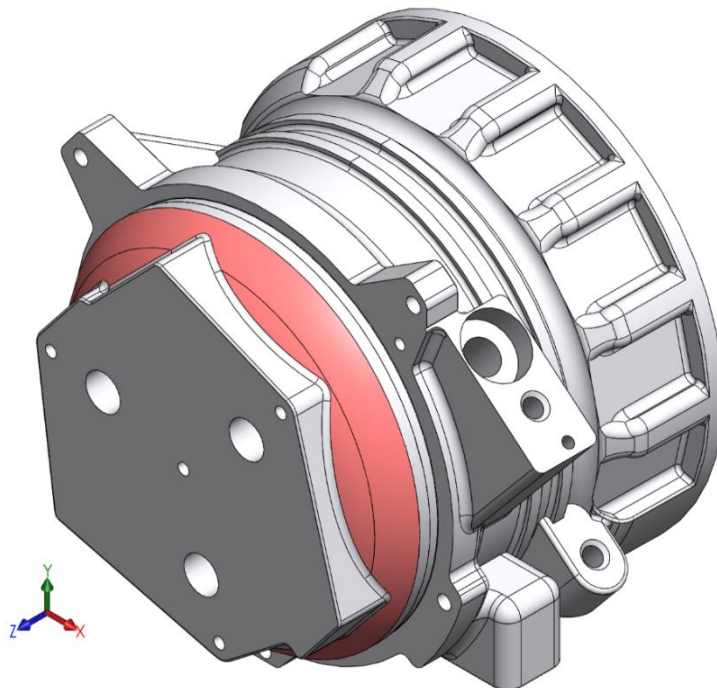


Figura 5.19. Zona do topo do componente alvo do estudo apresentado nesta secção, assinalada a vermelho.

Inicialmente, para se conseguir respeitar o requisito da diminuição da espessura para valores inferiores a 5 mm foi considerada a hipótese da criação de rasgos nesta zona do componente, para que, deste modo, não fosse necessária a alteração do desenho do corpo.

Assim, foram criados os rasgos a partir do esboço apresentado na Figura 5.20. Este esboço foi parametrizado de modo a manter a curvatura do arco que define o topo na configuração original. Por outro lado, esta parametrização permitiu definir dois parâmetros para serem utilizados como variáveis de projeto no estudo de otimização referido de seguida.

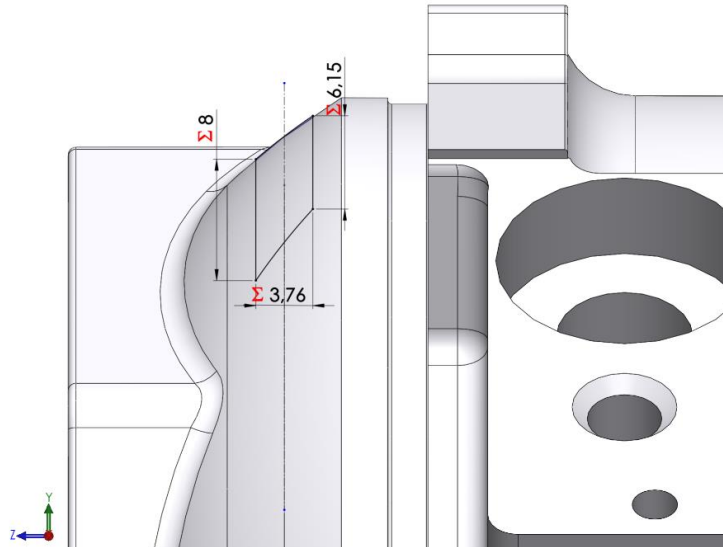


Figura 5.20. Esboço a partir da qual são criados os rasgos do topo.

Utilizando a ferramenta *Design Study* foram avaliadas diferentes configurações para estes rasgos, através da variação da sua profundidade ( $P_t$ ) e largura ( $L_t$ ). Na Tabela 5.6 é apresentado a definição do estudo de otimização realizado.

Tabela 5.6. Formulação do problema de otimização dos rasgos do topo do *Motorhousing*.

		Nível baixo	Nível alto
Variáveis de projeto	$L_t$	2 mm	5 mm
	$P_t$	8 mm	10 mm
Constrangimento	$\sigma_{VMmax} \leq 140 \text{ MPa}$		
Objetivo	Minimização da massa		

Nesta análise foram criados 9 cenários distintos para a configuração dos rasgos (consultar Anexo 13), da qual resultou como ótimo aquele em que as variáveis de projeto tomaram os valores de 5 mm e 10 mm, para a largura e profundidade respectivamente. De seguida, são apresentados a configuração com os rasgos obtidos (Figura 5.21 a)) e o resultado gráfico para a distribuição das tensões de Von Mises (Figura 5.21 b)) induzidas no componente nesta situação.

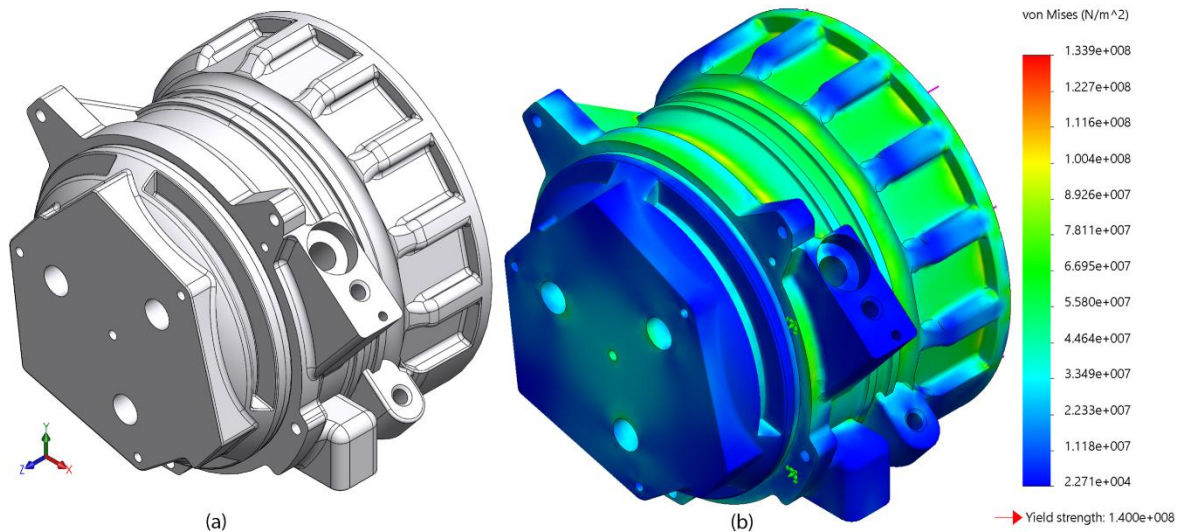


Figura 5.21. a) Configuração com rasgos no topo e b) resultado da distribuição de tensões de Von Mises induzidas no componente.

A tensão de Von Mises máxima obtida de 133,9 MPa é nesta configuração mais próxima do valor da tensão de cedência de 140 MPa; no entanto, este valor é obtido apenas numa zona muito localizada como é possível observar na apresentação mais detalhada dos resultados no Anexo 14.

A concentração de tensões referida poderia ter um impacto importante para a resistência à fadiga do componente caso este estivesse sujeito a condições de variação de tensões ao longo do tempo. Porém, à exceção do *scroll*, os componentes do compressor e o compressor mantêm-se num regime constante de funcionamento sem que se criem condições em que seria importante considerar o projeto à fadiga, visto que, a partir do momento em que este é pressurizado, a relação de pressões entre a câmara de sucção e a de descarga mantém-se praticamente constante.

Esta modificação na configuração do componente permite uma redução de massa de 12,1% relativamente à configuração original do componente, passando a massa deste a tomar o valor de 0,990 kg.

Na Figura 5.22 é apresentada a vista em corte comparando a variação da espessura de parede do corpo do *Motorhousing* entre a configuração inicial (Figura 5.22 (a)) e a nova configuração (Figura 5.22 (b)).

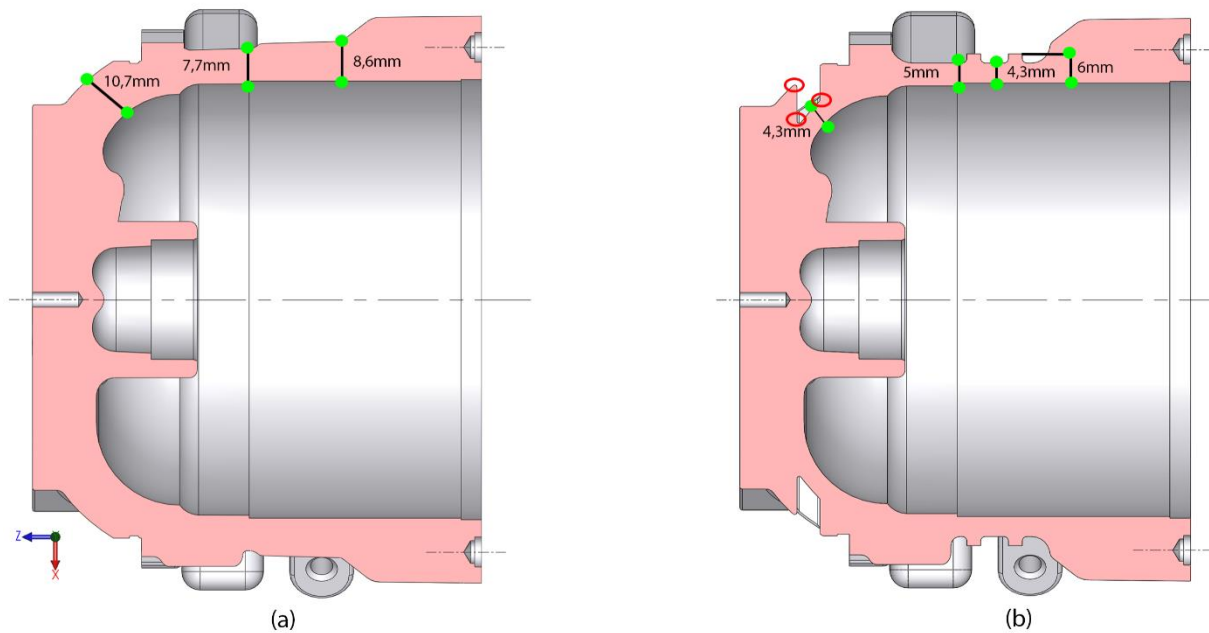


Figura 5.22. a) Vista em corte da configuração inicial e b) vista em corte da configuração com rasgos no topo.

Apesar do bom resultado no que diz respeito ao objetivo de minimizar a massa do componente é possível reparar que esta alteração introduz geometrias que não são obtidas de forma viável pelo processo de injeção (zonas assinaladas por circunferências vermelhas na Figura 5.22 (b)), visto que as transições abruptas entre faces dificultam em muito o escoamento do metal injetado no molde traduzindo-se em defeitos na peça obtida.

Assim sendo, procurou-se realizar a alteração da espessura de parede do topo do componente através de outra estratégia, como irá ser apresentado mais adiante neste capítulo.

### 5.7.2- Diferentes alternativas para a configuração do topo

Visto que é no topo do componente que existe espessuras de parede mais elevadas e maior quantidade de material, foi analisada a possibilidade de alterar a sua configuração de forma a ser utilizado menos material, mas mantendo as zonas funcionais inalteradas.

Na Figura 5.23 são apresentadas a configuração original do topo (a) e as duas configurações alternativas (b) e (c).

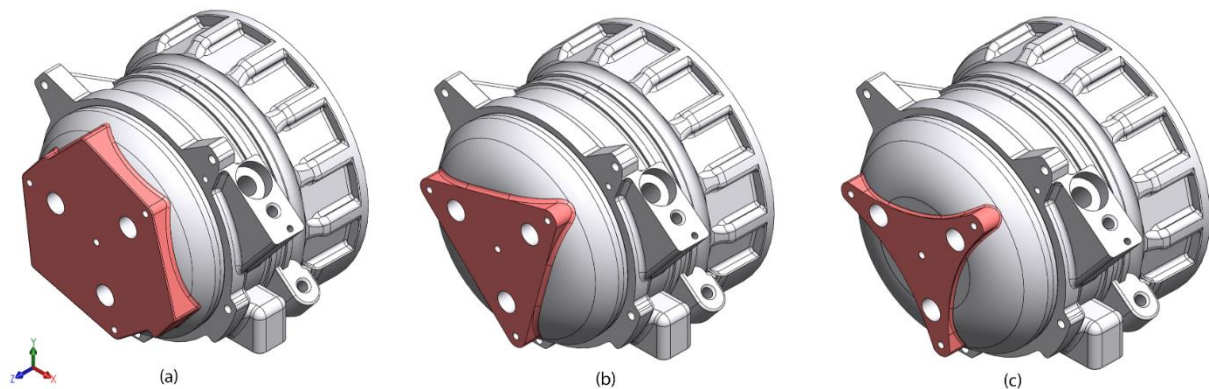


Figura 5.23. a) Configuração original do topo, b) configuração alternativa para o topo em forma triangular e c) configuração alternativa para o topo em forma de estrela.

As duas alternativas (b) e (c) permitem remover progressivamente mais material desta zona, sendo que a primeira produz uma redução de massa de 12,5% (massa do componente = 0,985 kg) relativamente à configuração original e a segunda uma redução de 13,1% (massa do componente = 0,979 kg).

De salientar que estas alterações não põem em causa a montagem com o componente *Inverter Carrier* (componente a azul na Figura 4.8), visto que as superfícies funcionais desta montagem se mantêm inalteradas. Na Figura 5.24 é observável que a montagem entre o *Motorhousing* e a caixa do *Inverter Carrier* é realizada utilizando as superfícies assinaladas a cor vermelha em (a) e a cor azul em (b), desta forma as alterações realizadas na configuração do topo da peça em estudo não afetam a montagem, desde que as zonas assinaladas se mantenham como projetadas inicialmente.

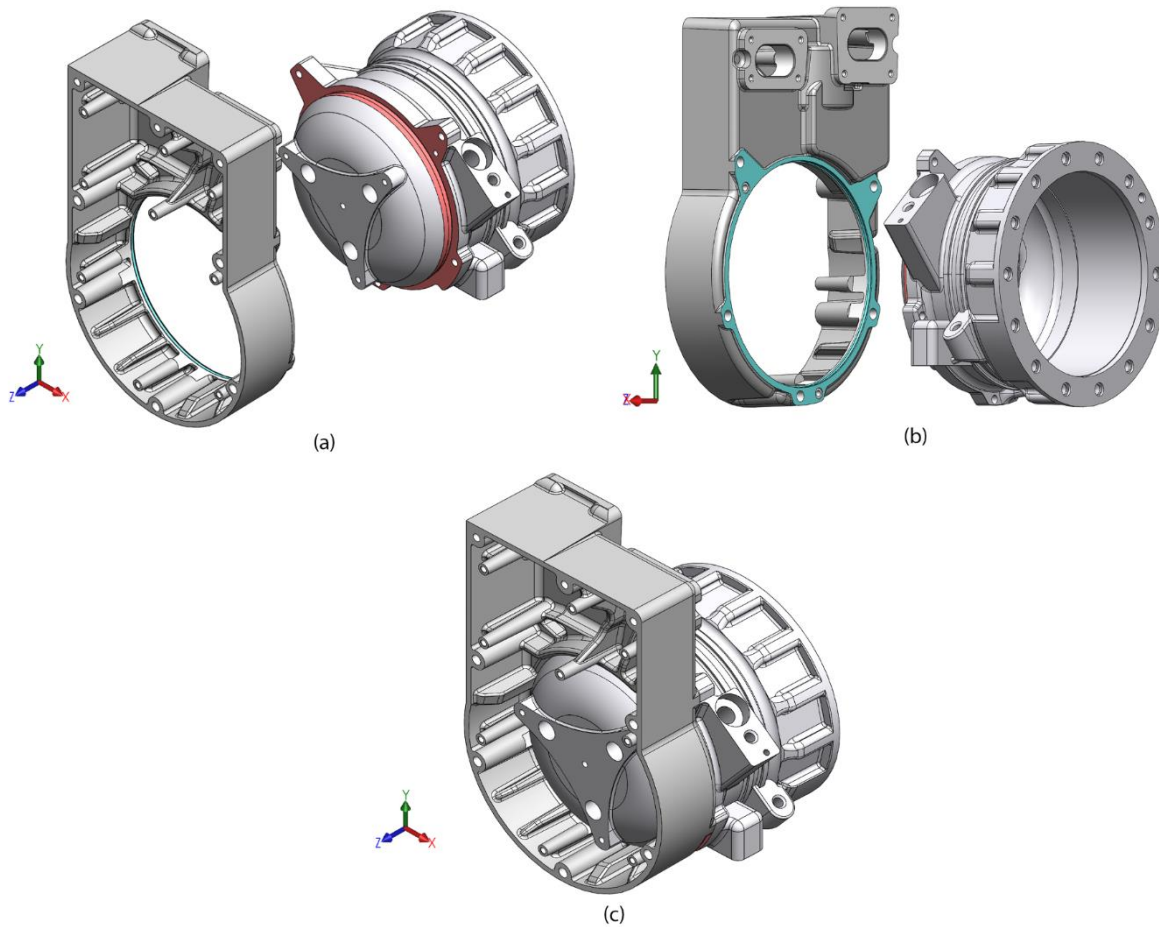


Figura 5.24. a) Superfícies funcionais do *Motorhousing*, assinaladas a vermelho; b) superfícies funcionais da tampa do *Inverter Carrier* assinaladas a azul; c) montagem entre as duas peças.

Os resultados obtidos para a distribuição de tensões de Von Mises destas duas novas configurações são apresentados na Figura 5.25.

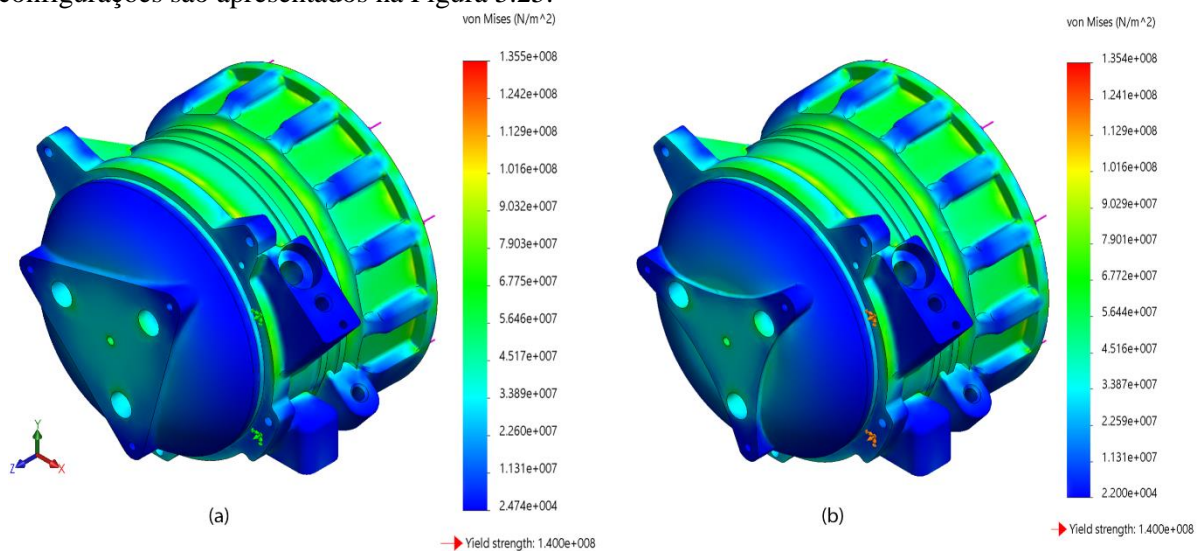


Figura 5.25. Resultado na distribuição das tensões de Von Mises ao longo do componente para as novas configurações geométricas do topo.

Observa-se um aumento do valor máximo de tensão de Von Mises de 18,5 MPa, em comparação ao que acontece para a configuração original. Isto deve-se à remoção de material da zona do corpo o que provoca uma diminuição na área resistente da peça. No entanto, o valor máximo encontra-se mais uma vez concentrado numa nervura, sendo que os valores de tensão para o corpo e topo se mantêm nos níveis desejados.

### 5.7.3- Redução da espessura de parede do topo

De modo a evitar o aparecimento de zonas que prejudicam a obtenção do componente pelo processo de injeção a alta pressão de alumínio (Figura 5.26), procurou-se alcançar a redução de espessura de parede para o nível desejado (máximo de 5 mm) de uma forma alternativa que não envolvesse a criação de rasgos no topo, como em 5.7.1.

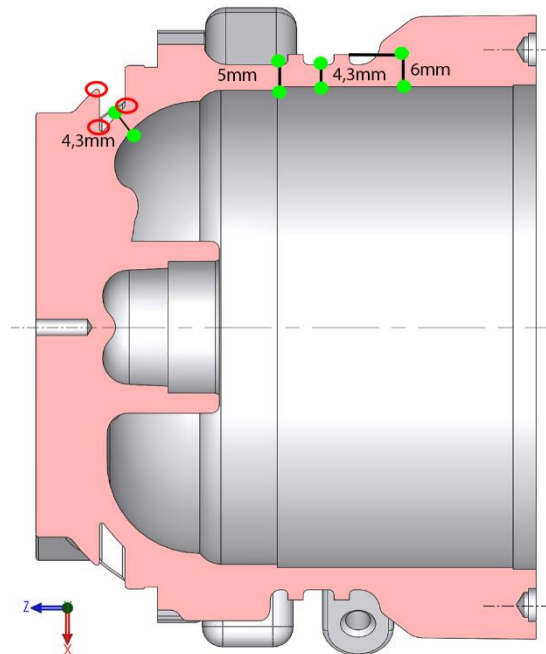


Figura 5.26. Assinaladas por circunferências a cor vermelha as zonas com efeitos nefastos no processo de injeção obtidas em 5.7.1.

Neste caso, a redução da espessura de parede do topo foi conseguida através da modificação do desenho do corpo principal do componente. Esta modificação foi realizada de modo a que fosse respeitada a curvatura original do topo, mas dando-se o início do arco que define esta zona num patamar inferior permitindo assim a redução de espessura de parede para valores inferiores a 5 mm. A comparação entre a secção de corte do componente original e a obtida pelas alterações realizadas neste estudo estão apresentadas na Figura 5.27.

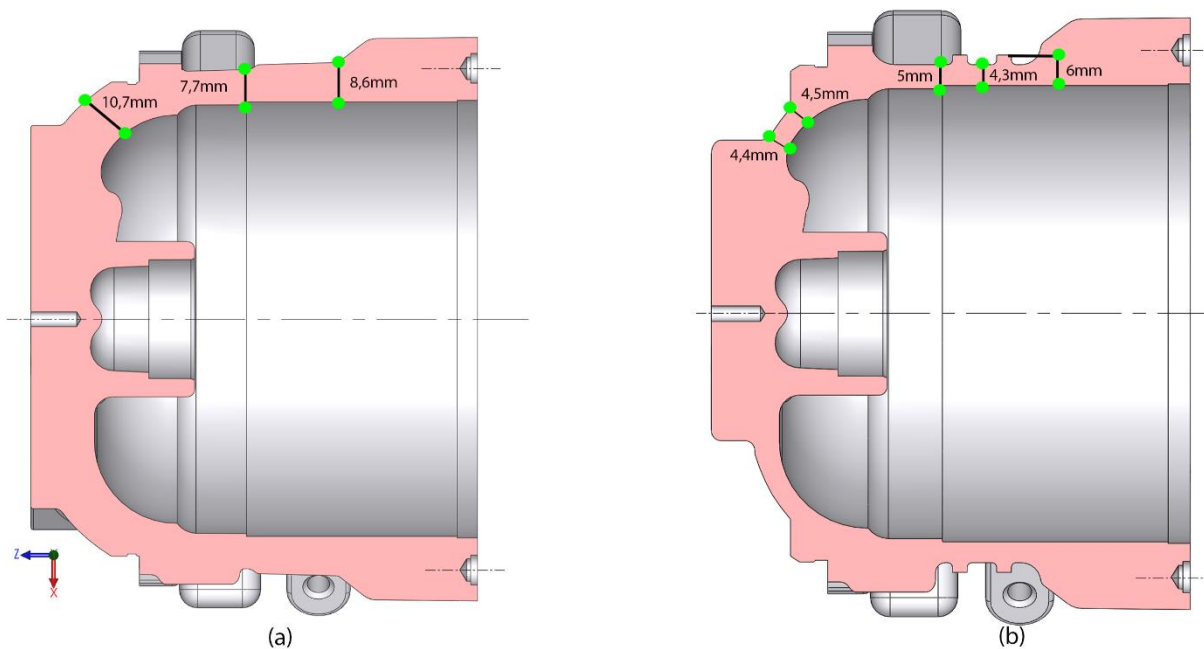


Figura 5.27. a) Vista em corte do componente original e b) vista em corte da nova configuração com espessura de parede reduzida.

Através da Figura 5.27, observa-se que as zonas assinaladas a vermelho na Figura 5.26 foram eliminadas, existindo agora uma transição mais suave entre as superfícies.

De seguida foi avaliada a possibilidade de sobrepor as novas configurações para o topo referidas em 5.7.2 com a redução de espessura de parede obtida.

Na Figura 5.28 está presente a nova configuração obtida quando considerado o topo com forma triangular e o respetivo resultado da simulação.

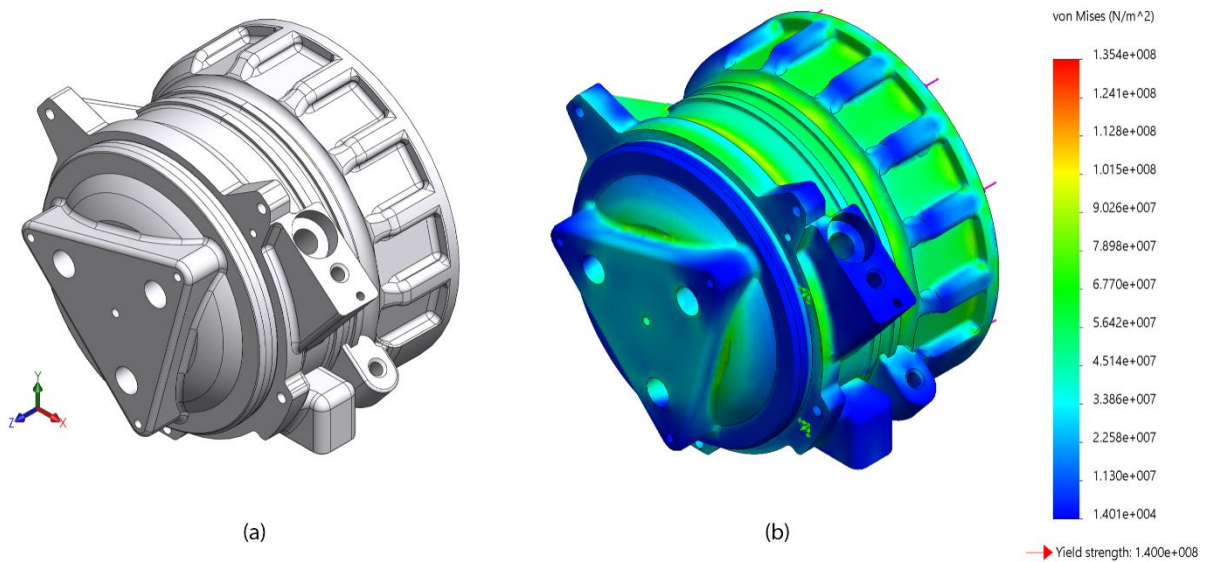


Figura 5.28. a) Configuração com o topo triangular e redução de espessura e b) resultado para a distribuição de tensões de Von Mises induzidas no *Motorhousing*.

É possível concluir que neste caso a redução de espessura de parede do topo não tem um impacto significativo na distribuição das tensões de Von Mises ao longo do componente (Anexo 15), visto que em comparação com o que é apresentado na Figura 5.25 os valores obtidos são em tudo semelhantes.

De notar que esta configuração permite uma redução de massa de 19,6% relativamente ao componente original, ficando o componente com um valor de massa 0,905 kg. Este valor elevado de redução de massa deve-se à remoção de uma grande quantidade de material do topo da peça com este novo desenho.

Do mesmo modo, foi sobreposta a configuração do topo em estrela com a redução de espessura de parede do topo (Anexo 15). Na Figura 5.29 está presente a configuração obtida neste caso e também o resultado para a distribuição das tensões de Von Mises nesta nova configuração geométrica.

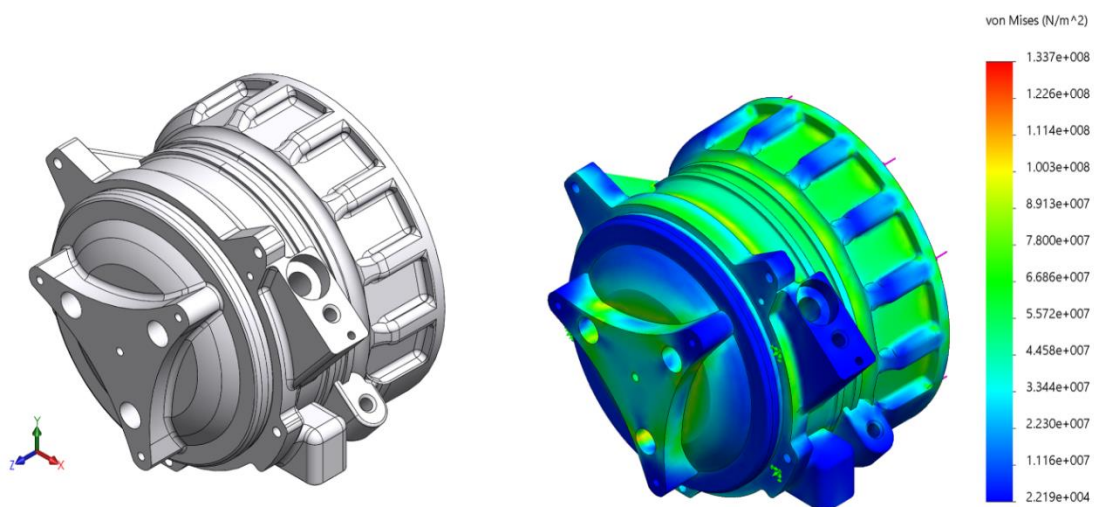


Figura 5.29. a) Configuração com o topo em estrela e redução da espessura de parede e b) resultado para a distribuição de tensões de Von Mises induzidas no *Motorhousing*.

De salientar que para a obtenção desta configuração geométrica foi utilizada a ferramenta *Design Study*, desta vez sem o objetivo da minimização da massa, visto que essa redução é alcançada desde logo pela elevada remoção de material da zona do topo resultante da redução da sua espessura de parede.

Nesta situação a ferramenta foi utilizada na sua opção de monitorização, que, como foi referido em 3.4.3, permite ao utilizador avaliar os valores obtidos para o constrangimento especificado para cada combinação dos níveis das variáveis de projeto escolhidas, sem ser realizada otimização. Sendo assim foi utilizado como variável de projeto a dimensão assinalada a vermelho na Figura 5.30 e foi avaliada o efeito da sua variação no valor obtido para a tensão de Von Mises máxima no componente.

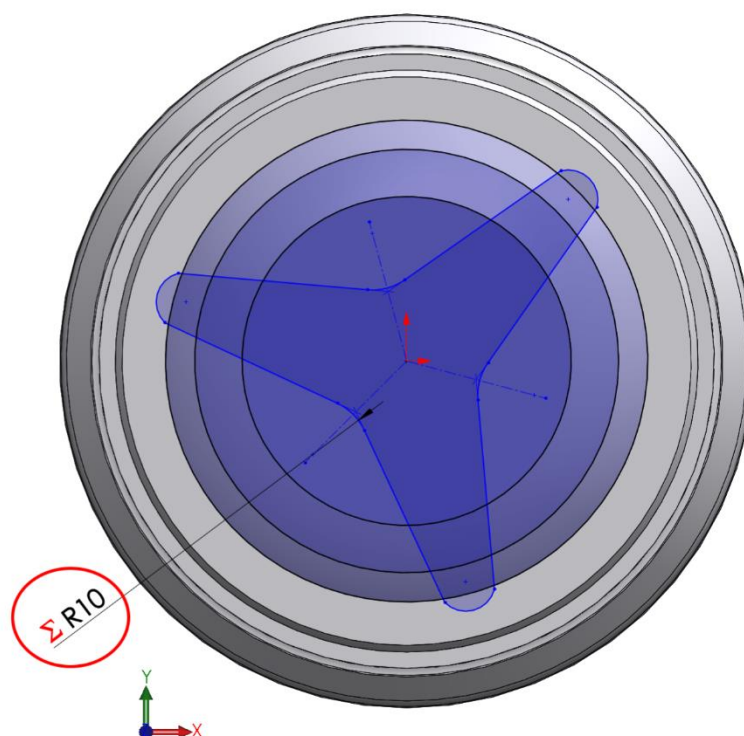


Figura 5.30. Desenho que define o topo em forma de estrela.

A dimensão referida define o raio dos três boleados presentes em cada um dos lados do topo em forma de estrela. O aumento do seu valor traduz-se numa transição mais suave entre as duas faces de cada um dos lados do topo. A variação desta dimensão foi feita no intervalo de 10 a 100 mm considerando incrementos de 5 mm.

Desta análise resultou como valor que permite um valor menor na tensão de Von Mises máxima do componente um raio para os três boleados de 80 mm.

Esta configuração permite aumentar ainda mais a redução de massa relativamente ao componente original. Desta feita, o valor de redução situa-se nos 22%.

Na Figura 5.31 podem ser visualizadas as principais diferenças entre a configuração original do componente e a configuração obtida pelo estudo apresentado neste capítulo.

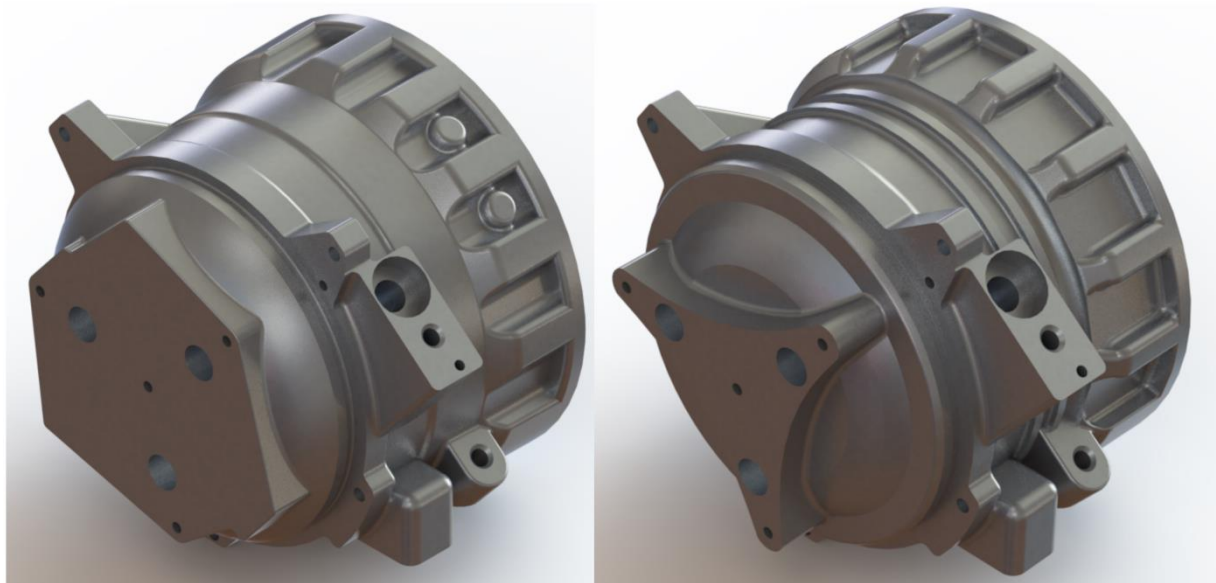
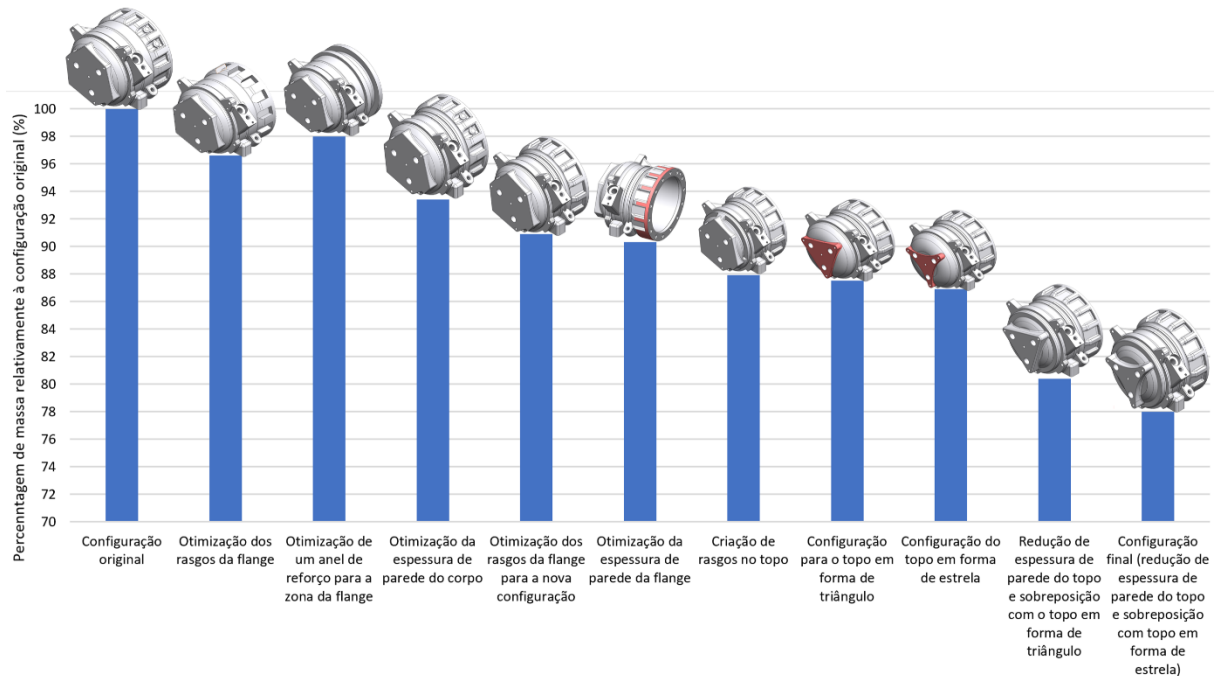


Figura 5.31. Configuração geométrica original do componente (1,126 kg), à esquerda; configuração obtida no estudo de otimização (0,878 kg), à direita.

Na Figura 5.32 é apresentado de forma esquemática um sumário das alterações realizadas no componente *Motorhousing* ao longo do estudo realizado neste capítulo.



Estudos realizados para a otimização da configuração geométrica do *Motorhousing*.

Figura 5.32. Sumário do estudo de otimização da configuração geométrica do componente *Motorhousing*.

# 6

## Metodologia

### 6.1 - Considerações tomadas na modelação CAD para o uso da ferramenta de otimização

No decorrer do estudo de otimização da configuração geométrica do *Motorhousing*, apresentado no capítulo 5, constatou-se a necessidade de tomar uma abordagem distinta para a modelação tridimensional dos componentes. Isto, no sentido de se retirar o maior partido possível das funcionalidades da ferramenta *Design Study* para a realização da otimização e para uma melhor compreensão dos seus resultados.

Desta abordagem, destacam-se alguns aspetos que não são usualmente considerados durante a modelação CAD dos componentes, mas que trazem benefícios para o estudo de otimização, como:

- A simplificação da definição das formas geométricas existentes no modelo CAD;
- A criação de um modelo à parte para ser utilizado na otimização, justamente para facilitar a obtenção de modificações mais profundas relativamente ao modelo original, como a substituição das formas existentes por outras alternativas;
- A parametrização dos desenhos das formas geométricas a serem modificadas, caso seja necessário manter a proporcionalidade entre dimensões;
- O estabelecimento das relações geométricas entre desenhos, planos e formas criados, de modo a que a reconfiguração do componente entre as experiências simuladas ocorra como pretendido.

Na secção 5.2, em que foi feita a otimização dos rasgos da flange (Figura 6.1 (a)) variando a sua largura e profundidade, foi necessário modelar essa zona de forma simplificada. Para assim, serem deixados de parte pormenores geométricos, como os boleados, e para ser possível a definição das variáveis de projeto que se pretendiam avaliar.

Os rasgos da flange foram inicialmente definidos através do desenho presente na Figura 6.1

(b).

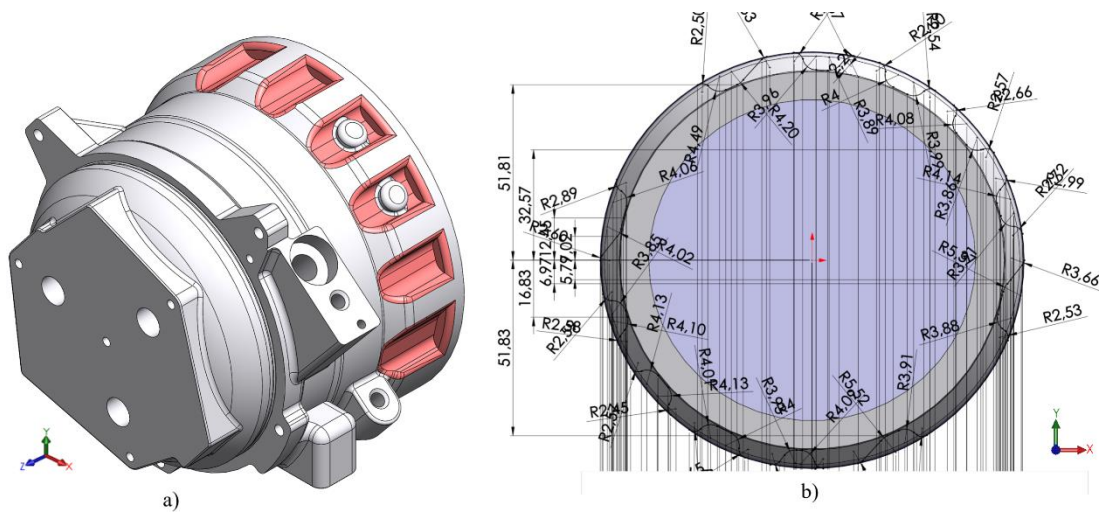


Figura 6.1. a) Rasgos da flange assinalados a vermelho e b) desenho que os define no modelo CAD da configuração geométrica inicial.

Este desenho não permite a seleção das variáveis de projeto para o estudo de otimização (largura ( $L_r$ ) e profundidade ( $P_r$ ) do rasgo). Para além disso, este desenho é complexo, tendo um elevado número de dimensões e relações geométricas, que torna difícil o controlo das modificações pretendidas de avaliar em cada reconfiguração do componente.

Assim sendo, tornou-se necessário simplificar a forma com que foram definidos estes rasgos (Figura 6.2), para que fosse possível a escolha de dimensões do desenho que definem as características geométricas que se queriam variar no estudo de otimização.

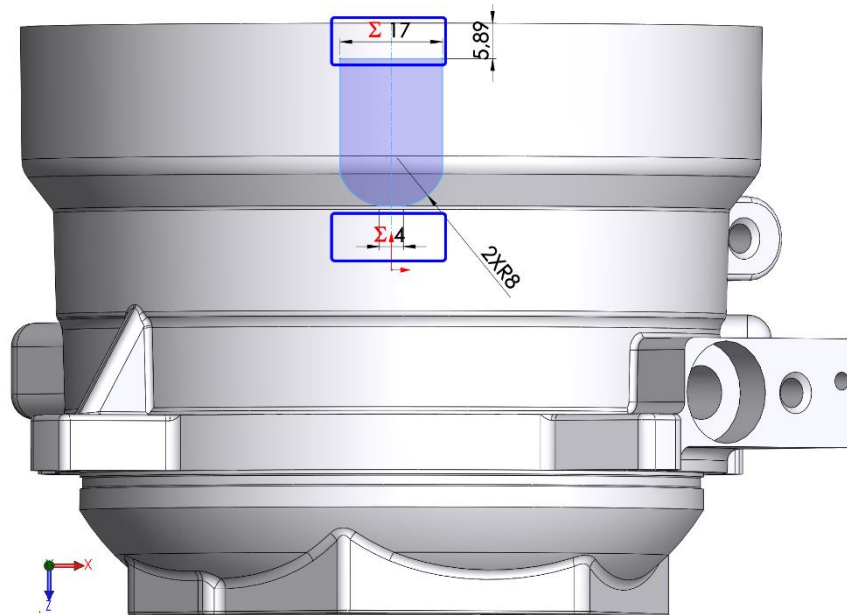


Figura 6.2. Nova definição dos rasgos da flange.

A profundidade ( $P_r$ ) dos rasgos foi definida pela dimensão escolhida para a operação de modelação utilizada na sua criação com base no desenho presente na Figura 6.2. As dimensões assinaladas a azul na Figura 6.2 foram escolhidas para representarem a variável que define a largura ( $L_r$ ) do rasgo. Estas dimensões foram alvo de parametrização para garantir a manutenção da proporcionalidade entre estas duas cotas na reconfiguração do componente entre as experiências simuladas.

Para além das alterações feitas aos desenhos que definiam a zona que se pretendia modificar, a simplificação do modelo CAD estendeu-se à supressão de pormenores geométricos que não apresentavam importância para a resistência mecânica do componente, como é o caso dos boleados (assinalados a cor azul na Figura 6.3 (a)) e as zonas assinaladas a cor-de-laranja na Figura 6.3 (a), que apenas servem para a identificação das especificações do compressor. A remoção destes pormenores foi importante para simplificar o modelo do componente (Figura 6.3 (b)), de modo a que estes não interferissem no estudo de otimização, em que se apenas se pretendia avaliar os efeitos da variação da largura e profundidade do rasgo.

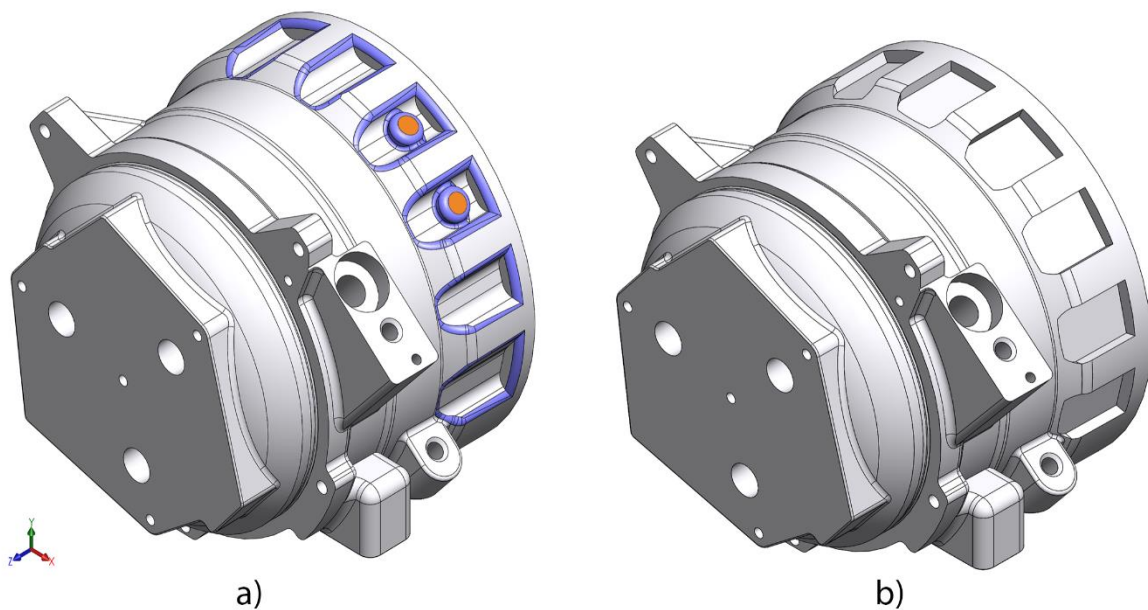


Figura 6.3. a) Pormenores geométricos removidos na otimização dos rasgos da flange e b) *Motorhousing* com os rasgos da flange simplificados.

Depois de realizada a otimização, os pormenores deixados de parte são novamente incorporados no modelo CAD, como acontece no estudo realizado em 5.5, em que depois de efetuada a sobreposição do estudo da otimização da espessura de parede do corpo com o estudo da otimização dos rasgos da flange, foram repostos os boleados existentes nesta zona.

Outro aspecto importante a considerar na modelação dos componentes para serem otimizados pela ferramenta *Design Study*, é a escolha das relações geométricas atribuídas às entidades dos desenhos que compõem o componente modelado. Esta escolha deve ser planeada de forma a que as relações

geométricas definidas permitam que a reconfiguração geométrica do componente, no decorrer das várias experiências simuladas no estudo de otimização, aconteça da forma prevista.

A definição das relações geométricas dos desenhos e planos base para as geometrias modeladas ganha particular importância, quando no estudo de otimização, a variação de uma zona do componente leva à variação de outra que se relaciona geometricamente com ela. Por exemplo, na Figura 6.4 estão presentes duas configurações pertencentes a dois cenários distintos onde se fez variar a espessura do apoio assinalado a cor azul. A variação da espessura do apoio leva à consequente alteração do comprimento da base da nervura, assinalada a cor vermelha (transição entre a situação da Figura 6.4 (a) para a situação da Figura 6.4 (b)). Esta variação só é possível se a atribuição das relações geométricas durante a modelação for feita de forma que a possibilite.

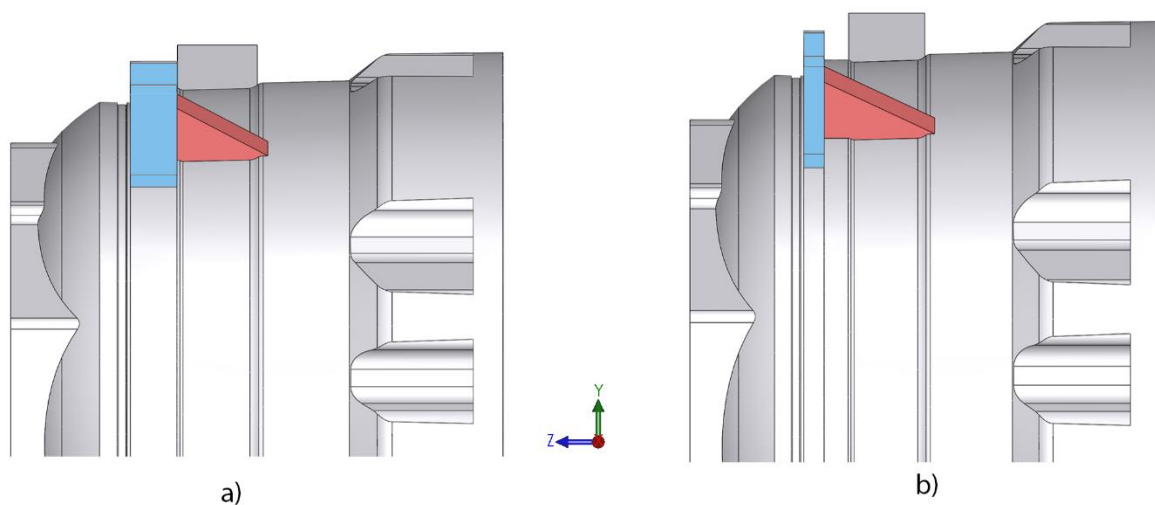


Figura 6.4. a) Configuração com apoio com espessura de 9,2 mm e b) com apoio com espessura de 4,2 mm e consequente aumento do comprimento da base da nervura.

No estudo da secção 6.3, em que foi feita a otimização de um anel de reforço para a zona da flange, houve a necessidade da criação de um modelo CAD do componente distinto do original. Isto porque, para o estudo de otimização do anel de reforço foram utilizadas variáveis de projeto que não estavam representadas no modelo original do componente. Assim, a criação de um modelo com vista a ser utilizado exclusivamente para otimização ofereceu a hipótese de se explorar novas alternativas que não se prendiam apenas com a alteração de dimensões, mas também com a conceção de soluções novas para esta zona da peça. Isto, aliado à utilização do gestor de configurações do *Solidworks* permitiu avaliar diferentes configurações para o componente que não poderiam ser obtidas a partir dos parâmetros presentes no modelo CAD inicial.

Para exemplificar, na Figura 6.5 estão presentes a configuração original do componente *Motorhousing* (a), uma configuração em que foram anulados por completo os rasgos existentes na superfície exterior (b) e, por último, a configuração obtida no estudo da secção 5.3 (c).

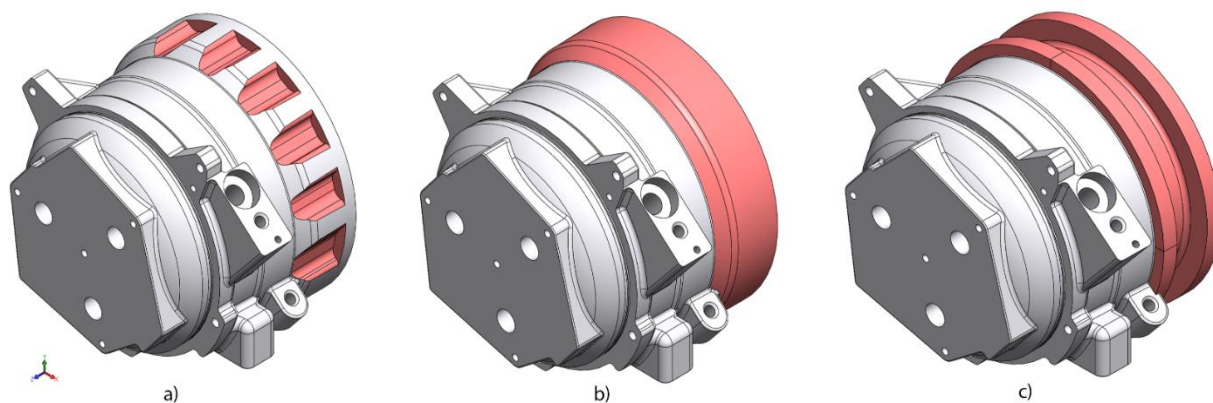


Figura 6.5. Exploração de diferentes alternativas para a configuração da flange do *Motorhousing*.

A conceção de um novo modelo tridimensional permite a utilização de parâmetros que não estavam disponíveis na configuração inicial da peça. Assim, no estudo da secção 5.3, foi possível seleccionar a largura ( $L_a$ ) e a profundidade ( $P_a$ ) do rasgo que definia o anel de reforço estudado, para serem utilizados como variáveis de projeto na otimização.

Na secção 5.7.2 ficou evidente mais um exemplo das vantagens trazidas da criação de um modelo CAD à parte do original. Com isto, foi possível explorar diferentes alternativas (Figura 6.6) para a configuração do topo do *Motorhousing*, que não seriam possíveis de obter com os parâmetros disponíveis inicialmente.

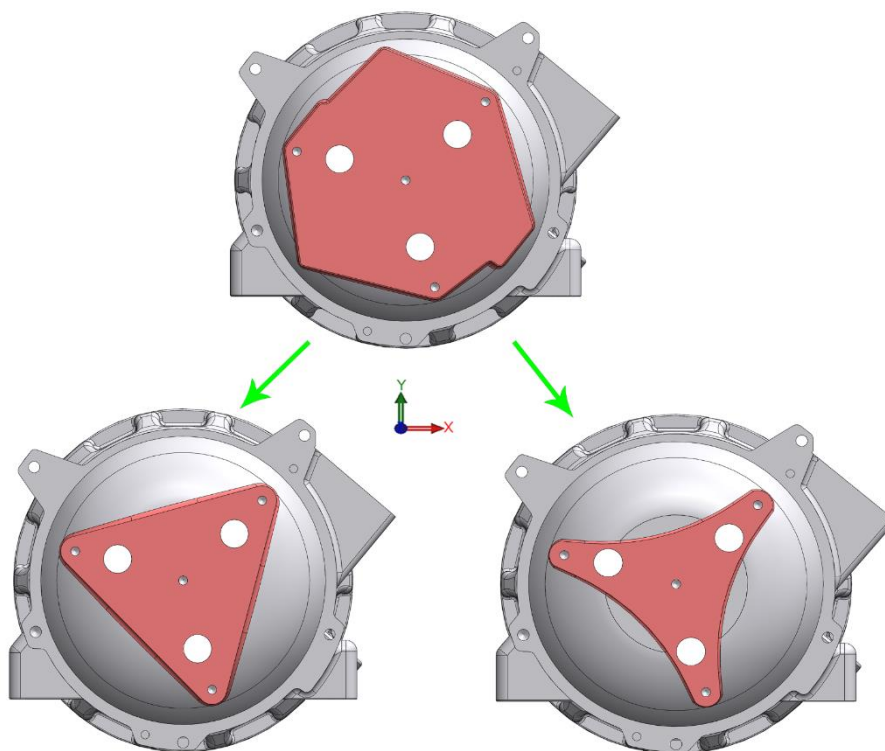


Figura 6.6. Exploração de diferentes alternativas para a configuração do topo do *Motorhousing*.

## 6.2 – Sequência proposta para a modelação

Como foi apresentado anteriormente neste capítulo, verificou-se no decorrer do estudo de otimização da configuração geométrica do componente *Motorhousing* a necessidade de uma abordagem, distinta da regra geral, para a modelação tridimensional, de forma a serem utilizadas as capacidades da ferramenta de otimização *Design Study*. Com isto, procurou-se desenvolver uma metodologia para a modelação que tivesse em mente esta necessidade.

Assim, de seguida, apresenta-se uma sequência proposta para a abordagem da modelação de componentes tendo em conta o objetivo da sua otimização.

Apresentam-se em fluxogramas as etapas, processos e momentos de decisão a considerar tendo em conta duas abordagens distintas (Figura 6.7): não existe uma configuração geométrica para o componente (fluxograma 1); já existe uma configuração geométrica para o componente (fluxograma 2).

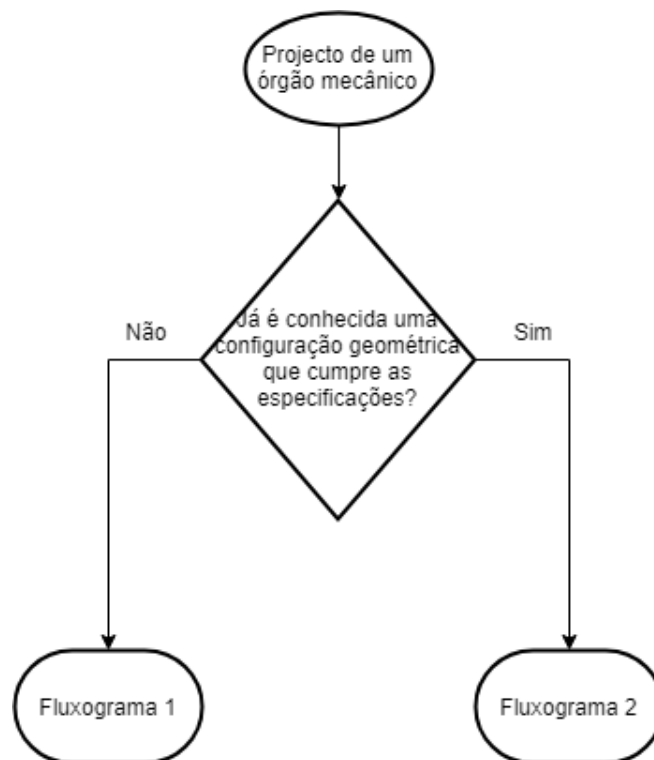


Figura 6.7. Fluxograma A.

No fluxograma 1 (Figura 6.8) apresentam-se, de uma forma que permite a generalização para o projeto de outros componentes, os passos a tomar na circunstância da necessidade da modelação de uma peça tendo como ponto de partida apenas as especificações de projeto, sendo necessário modelar o componente de raiz e realizar subsequentes análises pelo MEF para averiguar o cumprimento das especificações e avaliar o comportamento funcional da configuração geométrica criada.

No fluxograma 2 (Figura 6.9) são introduzidas as etapas a considerar no caso da necessidade da otimização da geometria alcançada no seguimento dos passos do fluxograma 1. Por outro lado, como no caso do estudo realizado nesta dissertação, pode ser necessária a otimização da configuração geométrica de um componente que já foi previamente modelado e que já consiste numa solução que cumpre as especificações de projeto. Neste último caso, é também proposto percorrer os passos retratados no fluxograma 2.

Embora nesta dissertação a função objetivo em causa na realização de otimização geométrica seja apenas a minimização da massa dos componentes, a metodologia apresentada adequa-se também aos casos em que são considerados outros alvos, desde que o propósito final da otimização não se afaste da necessidade de se alcançar uma configuração geométrica de igual resistência para um dado componente em estudo.

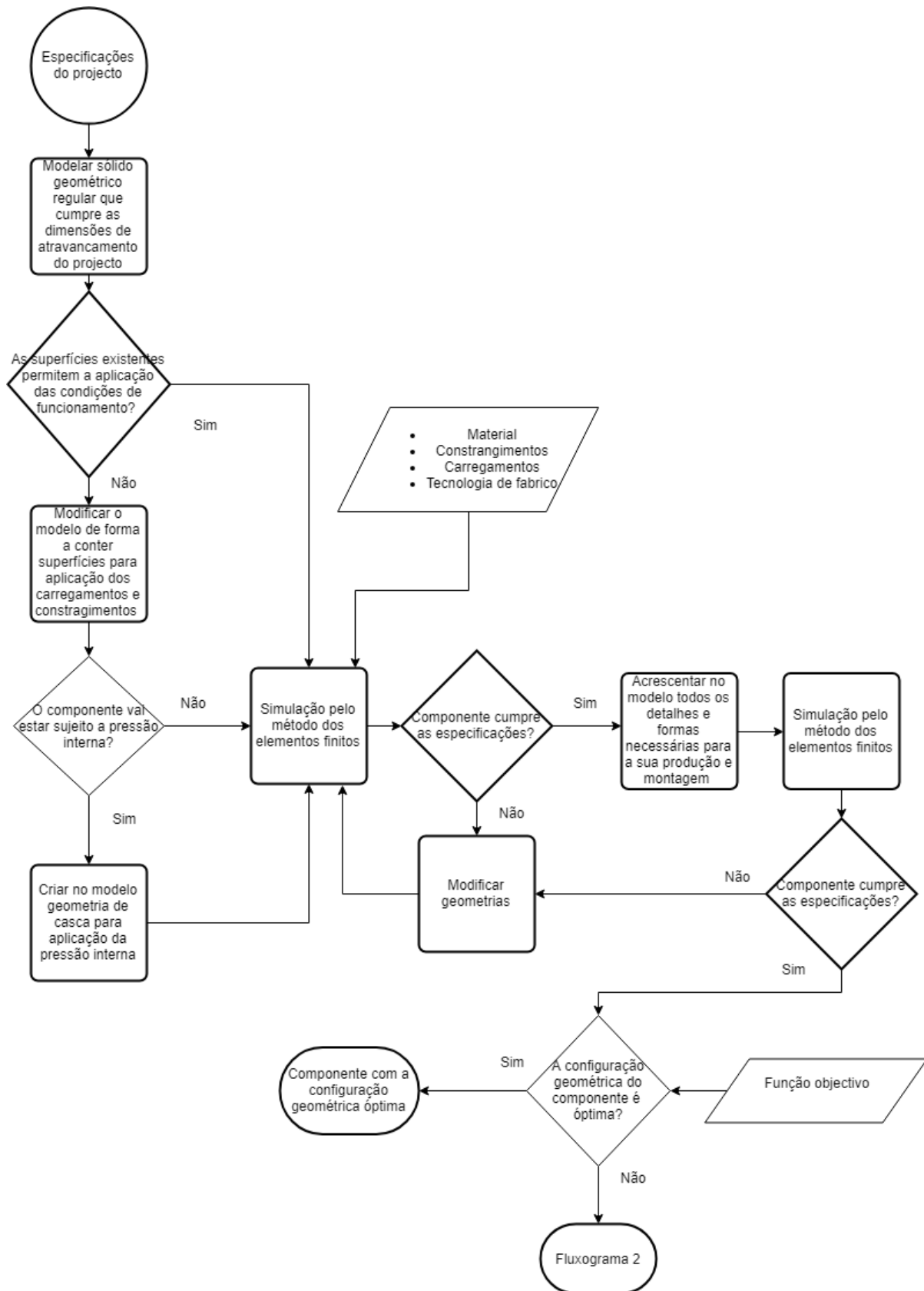


Figura 6.8. Fluxograma 1.

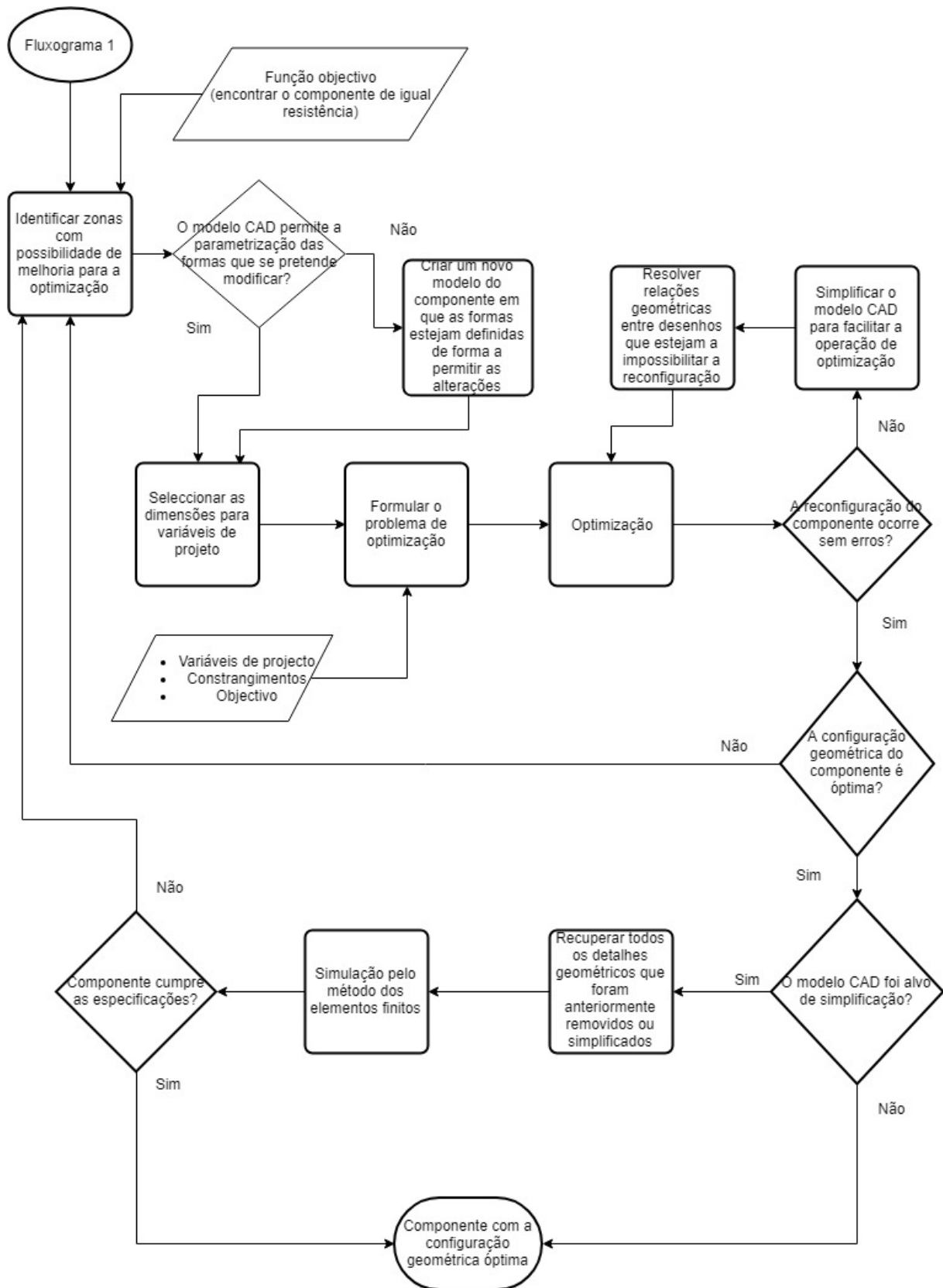


Figura 6.9. Fluxograma 2.

O fluxograma 1 diz respeito à metodologia a seguir no caso da modelação do componente de raiz, partindo das especificações de projeto e de um sólido de geometria regular.

Regra geral, a sequência da modelação tridimensional do componente termina após serem completadas as etapas apresentadas neste fluxograma, pois nesta fase fica estabelecida uma configuração para o componente que é funcional, permite cumprir as especificações de projeto e respeita as dimensões de atravancamento definidas inicialmente.

A introdução de uma função objetivo como, por exemplo, a minimização do peso do componente, leva a que se procure uma peça de igual resistência que permita a otimização tendo em vista o cumprimento deste novo objetivo. Neste caso, é proposta a abordagem apresentada no fluxograma 2, onde são especificadas as etapas a considerar no processo de otimização do componente.

A metodologia presente no fluxograma 2 parte da identificação das formas geométricas que são possíveis de modificar. Segue-se a criação das condições necessárias à obtenção dessas alterações, conforme o que foi apresentado em 6.1. Como a criação de um novo modelo CAD simplificado, não incluindo todos os pormenores geométricos, permitindo assim a modificação, remoção, substituição ou adição de formas e potenciando a parametrização e a atribuição das relações geométricas que conduzem à reconfiguração eficaz do componente durante a operação de otimização.

Por fim, está presente talvez a etapa mais importante, a formulação do problema de otimização, onde são especificadas as variáveis de projeto e os seus níveis, os constrangimentos e a função objetivo. Isto permite conduzir à obtenção de um componente que, para além de cumprir as especificações de projeto, está também otimizado tendo em conta a função objetivo em causa.

# 7

## Conclusões e trabalhos futuros

Para o estudo elaborado, foi definido como objetivo usufruir das potencialidades das ferramentas presentes num *software* CAD/CAE, utilizado regularmente em projeto mecânico, de forma a criar uma estratégia para o projeto de componentes, tendo em conta a redução da sua massa mantendo a funcionalidade. Isto, com base na otimização das suas configurações geométricas.

A metodologia utilizada foi aplicada a um componente de alumínio injetado pertencente à cobertura do motor elétrico de um compressor (*Motorhousing*).

O componente foi modelado tridimensionalmente no programa *Solidworks* e foi feita a análise estrutural pelo MEF no *Solidworks Simulation*, permitindo assim conhecer o comportamento funcional do componente com a sua configuração geométrica original quando sujeito às condições de funcionamento em teste, no qual é sujeito a uma pressão interna de 65 bar. Isto permitiu também a identificação das zonas do componente com possibilidade de melhoria para a realização da otimização.

A otimização das zonas identificadas foi realizada com o auxílio da ferramenta *Design Study*. O agregado das modificações provenientes dos vários estudos de otimização realizados, e de outras alterações obtidas através da utilização das funcionalidades de modelação presentes no programa CAD utilizado, conduziram à obtenção de uma configuração geométrica para o *Motorhousing* que leva à redução da sua massa em 22% e que permitiu a redução da espessura da parede do corpo principal do componente, conforme requisito de projeto para a sua produção utilizando o processo de fabrico HPDC, isto, mantendo a sua funcionalidade.

O *software* utilizado permite, a partir da sua interface gráfica, a seleção das dimensões que definem o modelo para serem utilizadas como variáveis de projeto na formulação do problema de otimização, e a utilização da informação obtida das simulações numéricas pelo MEF realizadas para a definição dos constrangimentos. Para além disto, a reconfiguração do modelo entre as várias experiências simuladas no estudo de otimização torna possível a visualização imediata das alterações na configuração geométrica do componente estudado e a observação dos efeitos destas alterações nos resultados das análises pelo MEF realizadas. Isto, leva à conclusão de que o módulo *Design Study* mostra ser uma ferramenta com capacidade de ser utilizada de forma acessível e ágil para a obtenção de diferentes configurações geométricas que otimizam uma dada função objetivo, e assim seja um auxílio útil no projeto para a redução da massa de componentes mecânicos.

Do trabalho realizado para a otimização da configuração geométrica do *Motorhousing* foram adotadas algumas ponderações que não são normalmente levadas em consideração na modelação de componentes, mas que se constataram serem benéficas quando se tenciona realizar a otimização da

configuração geométrica utilizando a ferramenta *Design Study*. Destes conceitos destacam-se: a definição dos desenhos de modo a permitir a parametrização das formas que se pretendem modificar; a simplificação do modelo de forma a deixar de parte da operação de otimização detalhes geométricos, como boleados e outros pormenores, que não têm importância para o cálculo estrutural, com o objetivo de facilitar a reconfiguração do modelo; a atribuição de relações geométricas entre as formas, no decorrer da modelação, de forma cuidada para que a reconfiguração do modelo ocorra conforme o esperado entre as experiências simuladas na operação de otimização; e, por fim, a construção de um modelo CAD alternativo para possibilitar a exploração de diferentes opções para as formas presentes no componente que não seriam possíveis de obter a partir da escolha das dimensões, presentes nos desenhos do modelo original, para serem utilizadas como variáveis de projeto.

Ainda da utilização da ferramenta *Design Study* concluiu-se que por vezes é vantajoso considerar um domínio discreto para as variáveis de projeto na definição do problema de otimização fazendo com que sejam avaliados mais cenários para a configuração do componente do que aqueles que são tidos em conta quando é estabelecido um domínio contínuo. Isto porque quando são consideradas variáveis de projeto contínuas, o *software* utiliza o planeamento de experiências de Box-Behnken, que considera apenas três níveis, o nível baixo, nível central e nível alto, o que pode limitar o resultado para a redução de massa obtida em comparação com quando são analisados mais níveis para as variáveis devido à seleção de valores discretos. Assim, propõem-se que se verifique caso-a-caso qual das duas opções de domínio permite a obtenção do melhor resultado.

Por fim, propõem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Validação do método utilizado para a otimização da configuração geométrica com a sua aplicação noutros componentes;
- Estender o projeto de redução de massa aos restantes componentes da cobertura do compressor (*Centerhousing* e *Rearhead*);
- Utilizar metodologias de modo a identificar quais as variáveis de projeto com mais influência na otimização da configuração geométrica. Pois nesta dissertação, a abordagem para a escolha dos parâmetros para serem utilizados como variáveis de projeto teve por base a identificação das zonas com possibilidade de melhoria a partir da avaliação dos resultados da simulação numérica para a distribuição das tensões de Von Mises induzidas no componente, sem terem sido avaliadas e comparadas previamente as influências da variação destes parâmetros na redução da massa do componente. A RSM poderá ser uma metodologia a considerar para esta abordagem.
- Avaliar em mais pormenor a viabilidade das modificações da configuração geométrica do *Motorhousing* realizadas para a redução da sua massa tendo em conta constrangimentos relativos ao processo de fabrico.

- Realizar um estudo comparativo de custos de fabrico entre a solução para a configuração do componente obtida neste estudo e a configuração original, de forma a estimar e quantificar os potenciais benefícios económicos do projeto para a redução da massa dos componentes quando estes são produzidos por tecnologias aditivas.
- Aplicar na redução da massa do componente *Motorhousing* outras abordagens distintas da utilizada nesta dissertação, como a utilização de *softwares* que permitem a realização de otimização topológica dos componentes, de forma a comparar os resultados obtidos e determinar até que extensão a abordagem considerada nesta dissertação pode ser equiparada a outras que utilizam algoritmos mais complexos e que se encontram mais em voga no que diz respeito ao projeto para redução da massa.
- Produzir e testar o componente *Motorhousing* com a configuração geométrica obtida neste estudo.



## Referências bibliográficas

Bjelkengren, C. (2008) *The Impact of Mass Decomponding on Assessing the Value of Vehicle Lightweighting*, MSC Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Box, G. E. P. e Behnken, D. W. (1960) ‘Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables’, *Technometrics*, Vol. 2 No. 4, pp. 455–475.

Chang, K.-H. (2015) *Design Theory and Methods using CAD / CAE*, 1.<sup>a</sup> ed., Academic Press, Londres.

Chiria, I. , Tanase, N., Apostol, S.E., Ilie, C. e Popa, M. (2018), ‘Design Optimization of a Flywheel using SolidWorks Modeling and Simulation Capabilities’, *Proceedings of 8th International Conference on Energy and Environment: Energy Saved Today is Asset for Future, CIEM 2017*, pp. 344–348.

Cornell, J.A. (1990), *How to Apply Response Surface Methodology*, 2.<sup>a</sup> ed., Vol. 8, American Society for Quality Control Statistics Division, Milwaukee.

Delogu, M., Maltese, S., Del Pero, F., Zanchi, L., Pierini, M. e Bonoli, A. (2018) ‘Challenges for modelling and integrating environmental performances in concept design: the case of an automotive component lightweighting’, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 11, pp. 135–148.

G.Budynas, R. e J.Keith Nisbett (2011) *Shigley’s Mechanical Engineering Design*. 9.<sup>a</sup> ed., McGraw-Hill, Nova-Iorque.

Glennan, T.B. (2007) ‘Strategies for Managing Vehicle Mass throughout the Development Process and Vehicle Lifecycle’, *Society of Automotive Engineers*, No. 724.

Harzheim, L. e Graf, G. (2006) ‘A review of optimization of cast parts using topology optimization: II-Topology optimization with manufacturing constraints’, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 31, pp. 388–399.

Isenstadt, A., German, J., Bubna, P., Wiseman, M., Venkatakrisnan, U., Abbasov, L., Guillen, P., et al. (2016) *Lightweighting technology development and trends in U.S. passenger vehicles, The International Council on Clean Transportation Working Paper 2016-25*. Disponível em: [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_PVtech\\_lightweighting\\_wp2016-25.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_PVtech_lightweighting_wp2016-25.pdf)

Jiang, L., Wang, G., Gong, G. e Zhang, R. (2013) ‘Lightweight Design for a FSC Car Based on Modal and Stifness Analysis’, em SAE-China e FISITA (eds.), *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, Vol. 8, Springer-Verlag, Berlim, pp. 1009–1021.

Lutsey, N. (2010), *Review of technical literature and trends related to automobile mass-reduction technology, California Air Resources Board*, Vol. 1, Davis.

Montgomery, D.C. (1991), *Design and analysis of experiments*, 3.<sup>a</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc, Nova-Iorque.

Polavarapu, S. (2008), *Topology and Free-Size Optimization With Multiple Loading Conditions for Light Weight Design of Die Cast Automotive Backrest Frame*, MSC Thesis, Clemson University.

*Practical Aspects of Structural Optimization: study guide* (2014), Altair Engineering, Troy.

Risberg, M. (2009), ‘Topology Optimization of castings’, *3rd European HyperWorks Technology Conference*, Swerea SWECAST, Ludwigsburg.

Rowe, J. (2012), ‘Introduction: advanced materials and vehicle lightweighting’, em Rowe, J. (Ed.), *Advanced materials in automotive engineering*, 1.<sup>a</sup> ed., Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 1–3.

‘Solidworks Help’. (2017), disponível em: [http://help.solidworks.com/2017/english/SolidWorks/cworks/c\\_Shape\\_Optimization\\_Process.htm?id=2c38df20d2a5406db23171b83dc0aa9a](http://help.solidworks.com/2017/english/SolidWorks/cworks/c_Shape_Optimization_Process.htm?id=2c38df20d2a5406db23171b83dc0aa9a) (acedido: 2 de Março, 2018).

‘Solidworks Software Optimization (White Paper)’. (2010), , disponível em: [https://www.solidworks.com/sw/docs/Optimization\\_2010\\_ENG\\_FINAL.pdf](https://www.solidworks.com/sw/docs/Optimization_2010_ENG_FINAL.pdf) (acedido: 2 de Março 2018).

Wang, H. (2013), ‘Geometric Parameters Optimal Design of Variable Cross-Section Rim’, em SAE-China e FISITA (Eds.), *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, Vol. 8, Springer-Verlag, Berlim, pp. 1003–1008.

Wick, C. e Veilleux, R.F. (Eds.). (1987), ‘Statistical Methods for Quality and Productivity Design and Improvement’, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4.<sup>a</sup> ed., Vol. 4, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, pp. 30–51.

## Anexo 1. Propriedades da liga de alumínio EN AC-46000.

### EN AC-46000

#### MECHANICAL PROPERTIES

Material	Alloy	Tensile Strength	Yield Strength (0.2%)	Hardness	Process
		MPa	MPa	Brinell (HB)	
Aluminum	<a href="#">EN AC-46000</a>	240	140	80	<a href="#">Cold-Chamber Die Casting</a>








#### PHYSICAL PROPERTIES

Material	Alloy	Density	Melting Point (Average +/- 50)	Thermal Conductivity	Coefficient of Thermal Expansion	Electrical Conductivity	Process
		g/cm <sup>3</sup>	C	W/m K	µm/m K	%IACS	
Aluminum	<a href="#">EN AC-46000</a>	2.75	490-600	110-120	21	13-17	<a href="#">Cold-Chamber Die Casting</a>

## Anexo 2. Passo e secção resistente dos fusos para diferentes valores de diâmetro nominal (G.Budynas and J.Keith Nisbett, 2011).

Nominal Major Diameter $d$ mm	Coarse-Pitch Series			Fine-Pitch Series		
	Pitch $p$ mm	Tensile-Stress Area $A_t$ mm <sup>2</sup>	Minor-Diameter Area $A_r$ mm <sup>2</sup>	Pitch $p$ mm	Tensile-Stress Area $A_t$ mm <sup>2</sup>	Minor-Diameter Area $A_r$ mm <sup>2</sup>
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1120	1050	2	1260	1230
48	5	1470	1380	2	1670	1630
56	5.5	2030	1910	2	2300	2250
64	6	2680	2520	2	3030	2980
72	6	3460	3280	2	3860	3800
80	6	4340	4140	1.5	4850	4800
90	6	5590	5360	2	6100	6020
100	6	6990	6740	2	7560	7470
110				2	9180	9080

Anexo 3. Tabela das propriedades de cada classe de parafuso (G.Budynas and J.Keith Nisbett, 2011).

Property Class	Size Range, Inclusive	Minimum Proof Strength,† MPa	Minimum Tensile Strength,† MPa	Minimum Yield Strength,† MPa	Material	Head Marking
4.6	M5–M36	225	400	240	Low or medium carbon	
4.8	M1.6–M16	310	420	340	Low or medium carbon	
5.8	M5–M24	380	520	420	Low or medium carbon	
8.8	M16–M36	600	830	660	Medium carbon, Q&T	
9.8	M1.6–M16	650	900	720	Medium carbon, Q&T	
10.9	M5–M36	830	1040	940	Low-carbon martensite, Q&T	
12.9	M1.6–M36	970	1220	1100	Alloy, Q&T	

Anexo 4. Cenários avaliados na secção 5.2, utilizando o planeamento de experiências de Box-Behnken.

Parâmetro	Unidades	Inicial	Ótimo	Experiência 1	Experiência 2
L <sub>r</sub>	mm	17	12,5	17	8
P <sub>r</sub>	mm	4	8	8	8
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	121,57	132,02	152,87	168,04
Massa	g	1123,85	1096,64	1072,12	1121,59

Parâmetro	Unidades	Experiência 3	Experiência 4	Experiência 5	Experiência 6	Experiência 7
L <sub>r</sub>	mm	17	8	17	8	12,5
P <sub>r</sub>	mm	4	4	6	6	8
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	121,57	119,14	128,58	122,26	132,02
Massa	g	1123,85	1145,77	1098,06	1133,71	1096,64

Parâmetro	Unidades	Experiência 8	Experiência 9
L <sub>r</sub>	mm	12,5	12,5
P <sub>r</sub>	mm	4	6
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	125,57	115,02
Massa	g	1134,45	1115,59

Anexo 5. Cenários avaliados na secção 5.2, utilizando variáveis discretas. Assinalados a vermelho estão os cenários nos quais o constrangimento não é cumprido. Assinalado a verde está o cenário ótimo.

Parâmetro	Unidades	Inicial	Ótimo	Experiência 1	Experiência 2
L <sub>r</sub>	mm	17	14	8	9
P <sub>r</sub>	mm	4	8	4	4
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	114,13	138,38	122,65	114,5
Massa	g	1123,85	1088,4	1145,77	1143,21

Parâmetro	Unidades	Experiência 3	Experiência 4	Experiência 5	Experiência 6	Experiência 7
L <sub>r</sub>	mm	10	11	12	13	14
P <sub>r</sub>	mm	4	4	4	4	4
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	118,33	120,94	126,56	112,15	122,17
Massa	g	1140,67	1138,16	1135,68	1133,23	1130,82

Parâmetro	Unidades	Experiência 8	Experiência 9	Experiência 10	Experiência 11	Experiência 12
L <sub>r</sub>	mm	15	16	17	8	9
P <sub>r</sub>	mm	4	4	4	6	6
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	115,44	122,06	114,13	122,82	126,86
Massa	g	1128,45	1126,13	1123,85	1133,71	1129,64

Parâmetro	Unidades	Experiência 13	Experiência 14	Experiência 15	Experiência 16	Experiência 17
L <sub>r</sub>	mm	10	11	12	13	14
P <sub>r</sub>	mm	6	6	6	6	6
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	119,91	123,23	115,13	125,5	119,96
Massa	g	1125,6	1121,58	1117,58	1113,61	1109,67

Parâmetro	Unidades	Experiência 18	Experiência 19	Experiência 20	Experiência 21	Experiência 22
L <sub>r</sub>	mm	15	16	17	8	9
P <sub>r</sub>	mm	6	6	6	8	8
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	123,43	130,42	125,25	164,42	165,2
Massa	g	1105,77	1101,9	1098,06	1121,59	1116,01

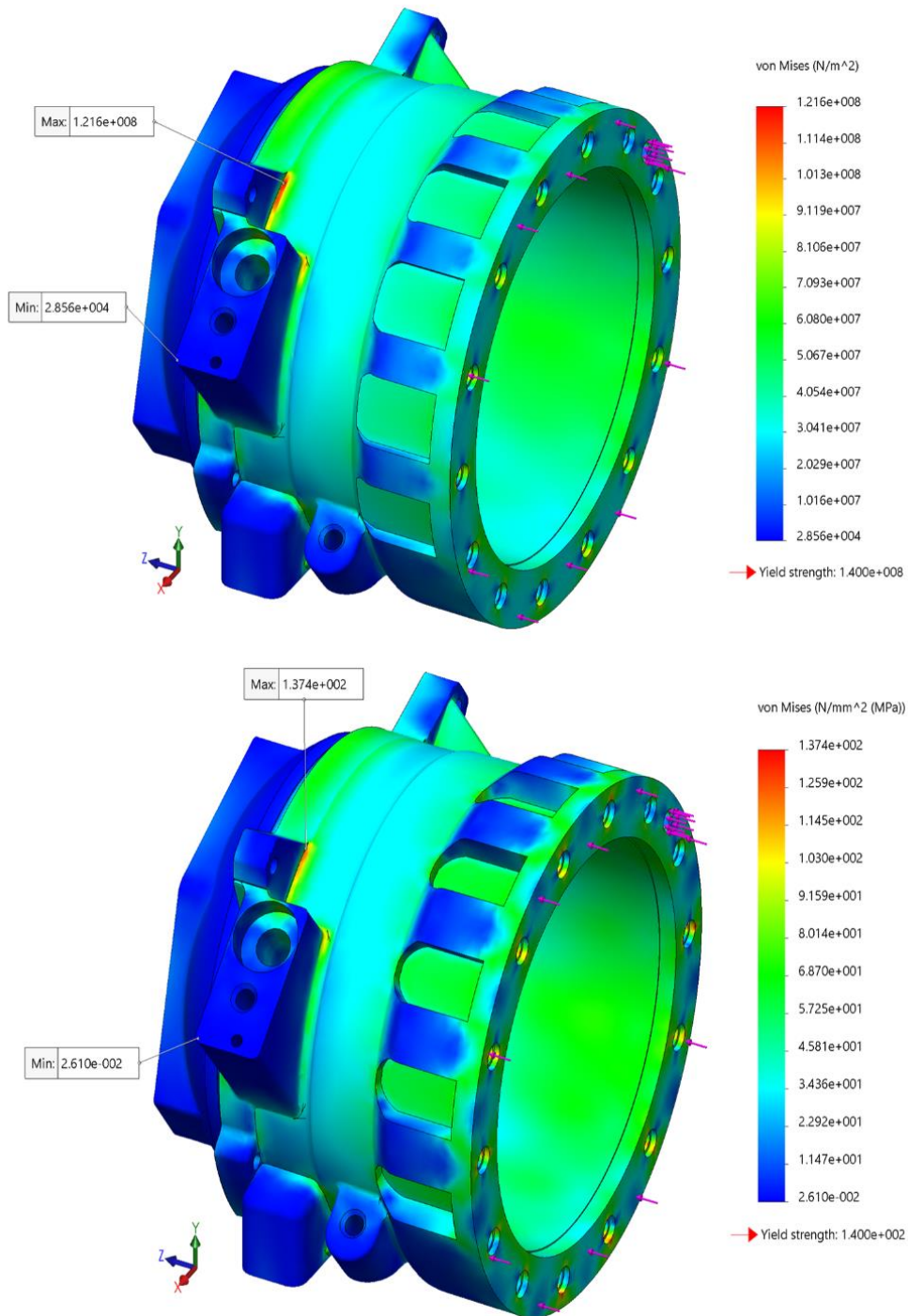
  

Parâmetro	Unidades	Experiência 23	Experiência 24	Experiência 25	Experiência 26	Experiência 27
L <sub>r</sub>	mm	10	11	12	13	14
P <sub>r</sub>	mm	8	8	8	8	8
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	157,73	165,17	129,91	134,21	138,38
Massa	g	1110,46	1104,92	1099,39	1093,89	1088,4

Parâmetro	Unidades	Experiência 28	Experiência 29	Experiência 30
L <sub>r</sub>	mm	15	16	17
P <sub>r</sub>	mm	8	8	8
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	145,98	147,12	152,21
Massa	g	1082,95	1077,52	1072,12

Anexo 6. Localização dos valores máximo e mínimo da tensão de Von Mises no estudo da secção 5.2.  
Em cima a configuração inicial, em baixo a configuração ótima.



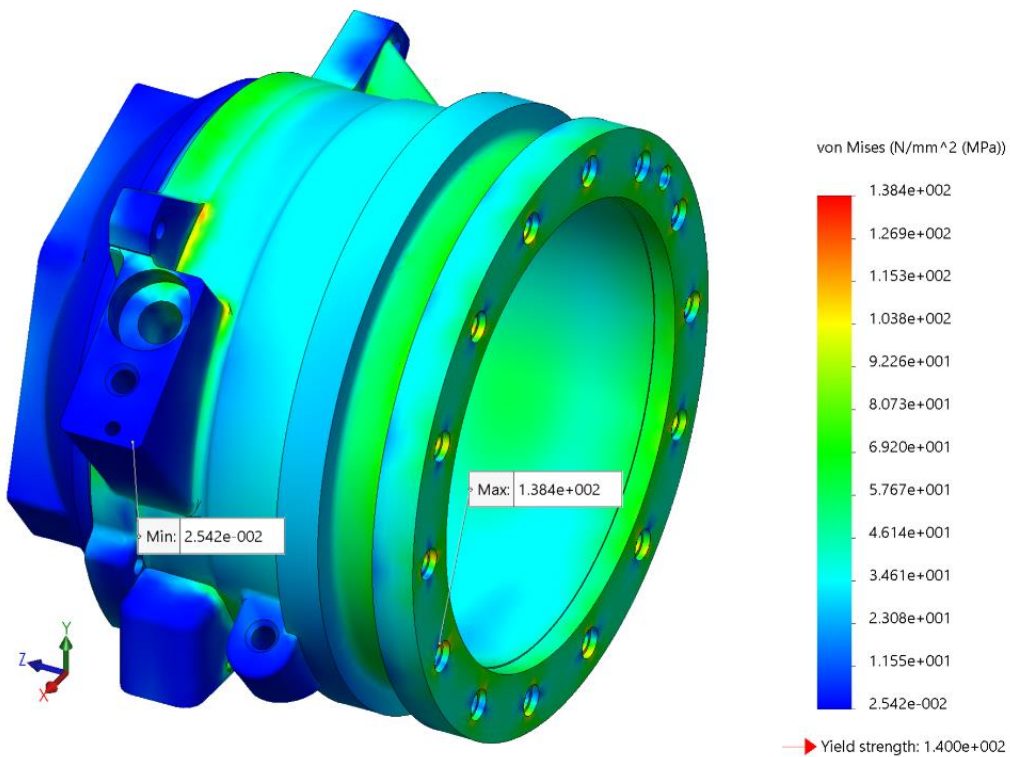
Anexo 7. Cenários avaliados na secção 5.3. Assinalados a vermelho estão os cenários nos quais o constringimento não é cumprido. Assinalado a verde está o cenário ótimo.

Parâmetro	Unidades	Inicial	Ótimo	Experiência 1	Experiência 2
L <sub>a</sub>	mm	8	12	16	8
P <sub>a</sub>	mm	7	7	11	11
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	125,24	138,38	339,34	238,79
Massa	g	1130,32	1102,94	1016,71	1101,17

Parâmetro	Unidades	Experiência 3	Experiência 4	Experiência 5	Experiência 6	Experiência 7
L <sub>a</sub>	mm	16	8	16	8	12
P <sub>a</sub>	mm	7	7	9	9	11
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	149,83	125,24	203,48	163,02	266,57
Massa	g	1074,89	1130,32	1045,24	1115,47	1059,28

Parâmetro	Unidades	Experiência 8	Experiência 9
L <sub>a</sub>	mm	12	12
P <sub>a</sub>	mm	7	9
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	138,38	182,53
Massa	g	1102,94	1080,7

Anexo 8. Localização dos valores máximo e mínimo da tensão de Von Mises no estudo da secção 5.3.



Anexo 9. Cenários avaliados no estudo intermédio realizado em 5.4 para a redução da espessura de parede do corpo e otimização de anéis de reforço. Assinalado a verde o cenário que corresponde à configuração ótima encontrada.

Parâmetro	Unidades	Inicial	Ótimo	Experiência 1	Experiência 2
L <sub>c</sub>	mm	5	3	3	4
A <sub>c</sub>	mm	4	2	2	2
N <sub>c</sub>	N/A	2	2	2	2
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	87,717	92,215	92,215	89,989
Massa	g	909,564	883,352	883,352	886,998

Parâmetro	Unidades	Experiência 3	Experiência 4	Experiência 5	Experiência 6	Experiência 7
L <sub>c</sub>	mm	5	3	4	5	3
A <sub>c</sub>	mm	2	3	3	3	4
N <sub>c</sub>	N/A	2	2	2	2	2
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	90,954	90,627	90,563	94,82	90,729
Massa	g	890,644	888,977	894,497	900,018	894,705

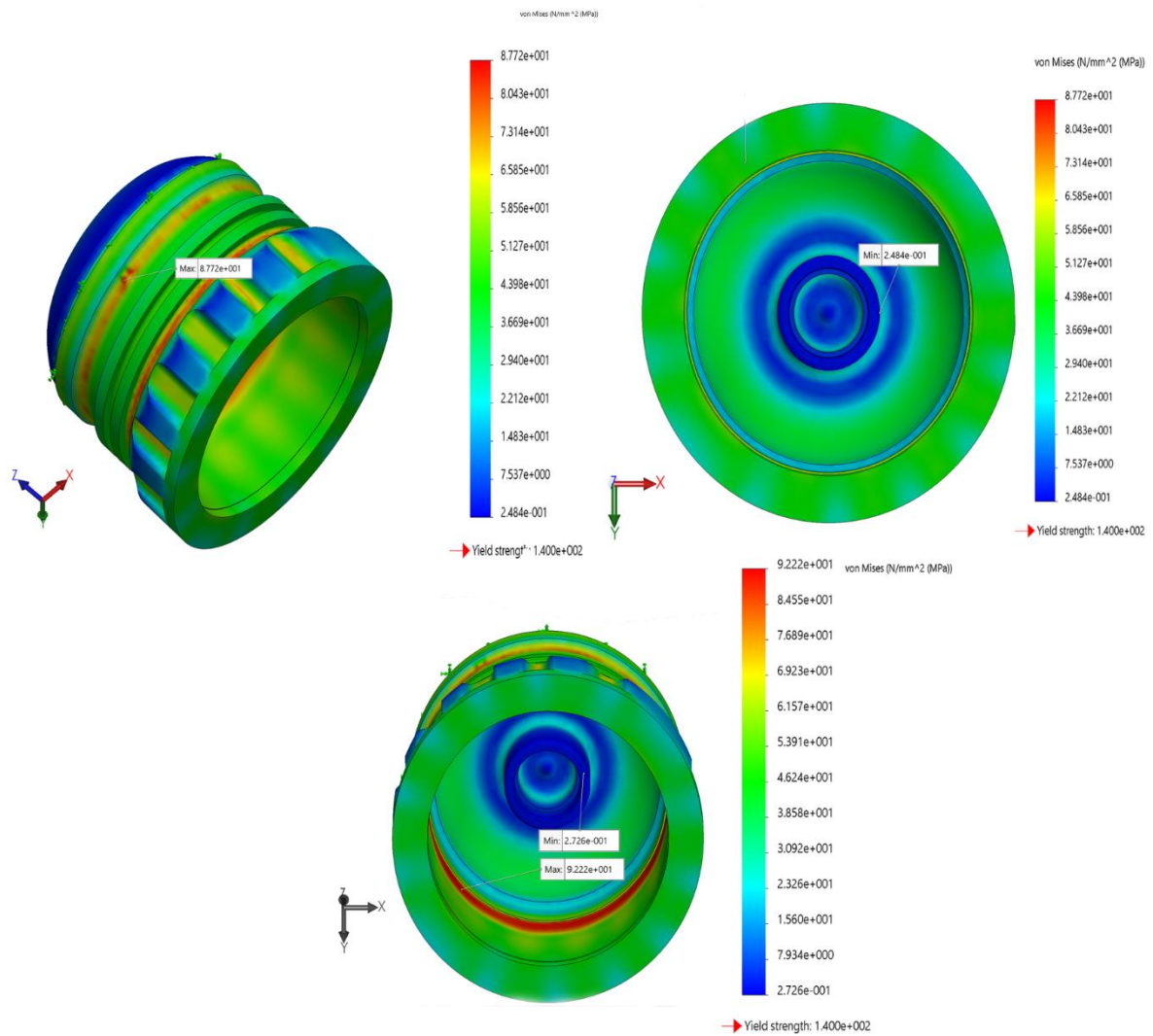
Parâmetro	Unidades	Experiência 8	Experiência 9	Experiência 10	Experiência 11	Experiência 12
L <sub>c</sub>	mm	4	5	3	4	5
A <sub>c</sub>	mm	4	4	5	5	5
N <sub>c</sub>	N/A	2	2	2	2	2
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	87,372	87,717	87,264	85,714	86,818
Massa	g	902,134	909,564	900,536	909,91	919,284

Parâmetro	Unidades	Experiência 13	Experiência 14	Experiência 15	Experiência 16	Experiência 17
L <sub>c</sub>	mm	3	4	5	3	4
A <sub>c</sub>	mm	2	2	2	3	3
N <sub>c</sub>	N/A	3	3	3	3	3
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	93,7	96,334	94,939	88,569	93,602
Massa	g	889,207	894,675	900,151	897,643	905,924

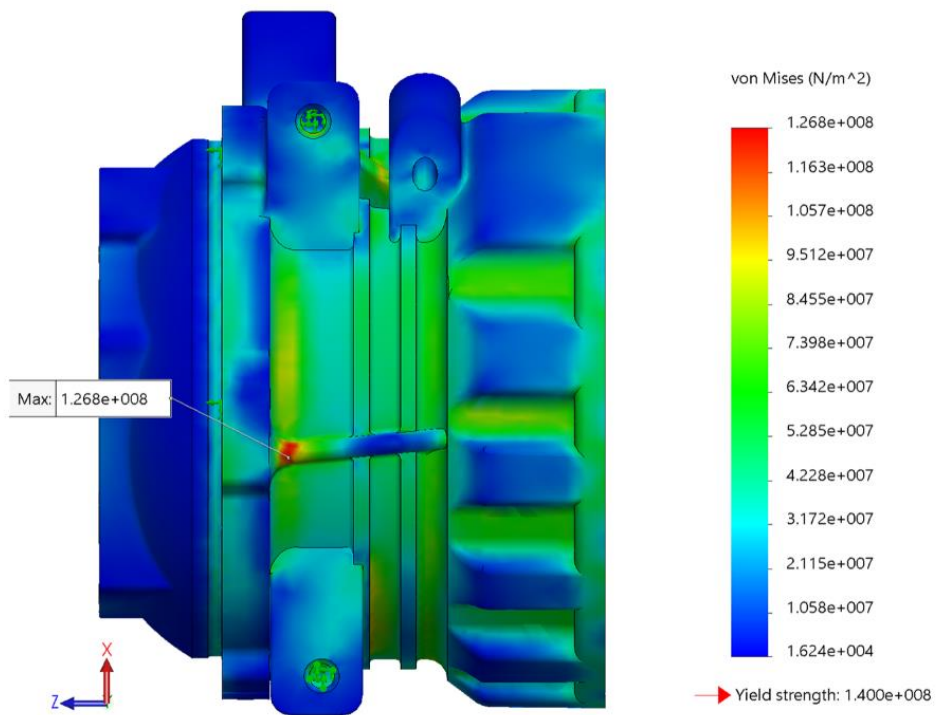
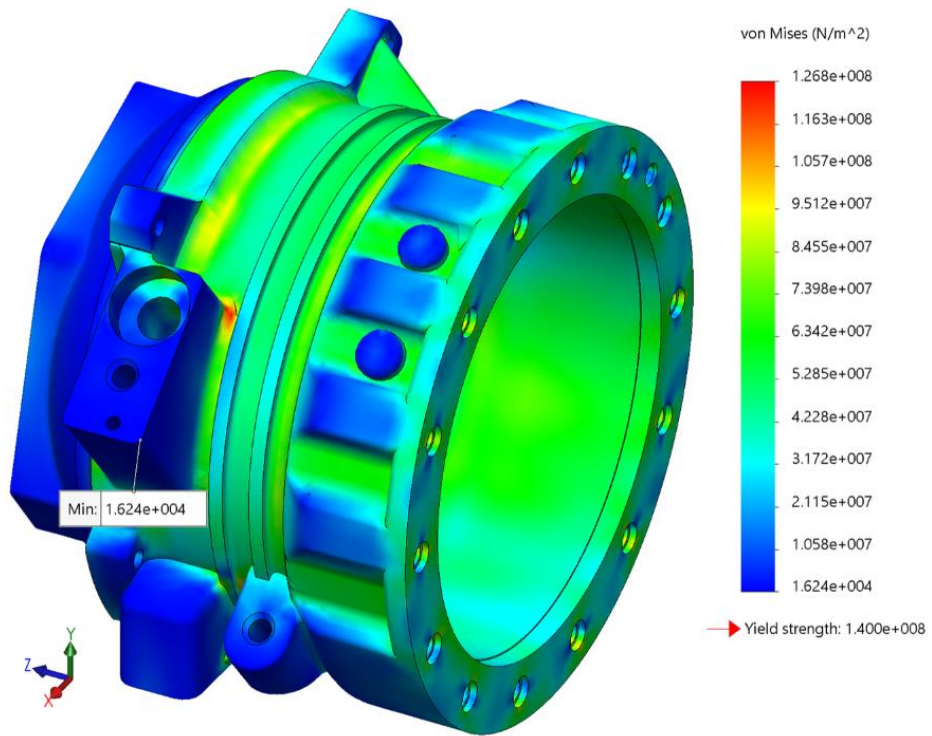
Parâmetro	Unidades	Experiência 18	Experiência 19	Experiência 20	Experiência 21	Experiência 22
L <sub>c</sub>	mm	5	3	4	5	3
A <sub>c</sub>	mm	3	4	4	4	5
N <sub>c</sub>	N/A	3	3	3	3	3
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	91,117	86,421	92,36	87,927	85,164
Massa	g	914,211	906,235	917,38	928,531	914,982

Parâmetro	Unidades	Experiência 23	Experiência 24
L <sub>c</sub>	mm	4	5
A <sub>c</sub>	mm	5	5
N <sub>c</sub>	N/A	3	3
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	86,043	89,871
Massa	g	929,043	943,11

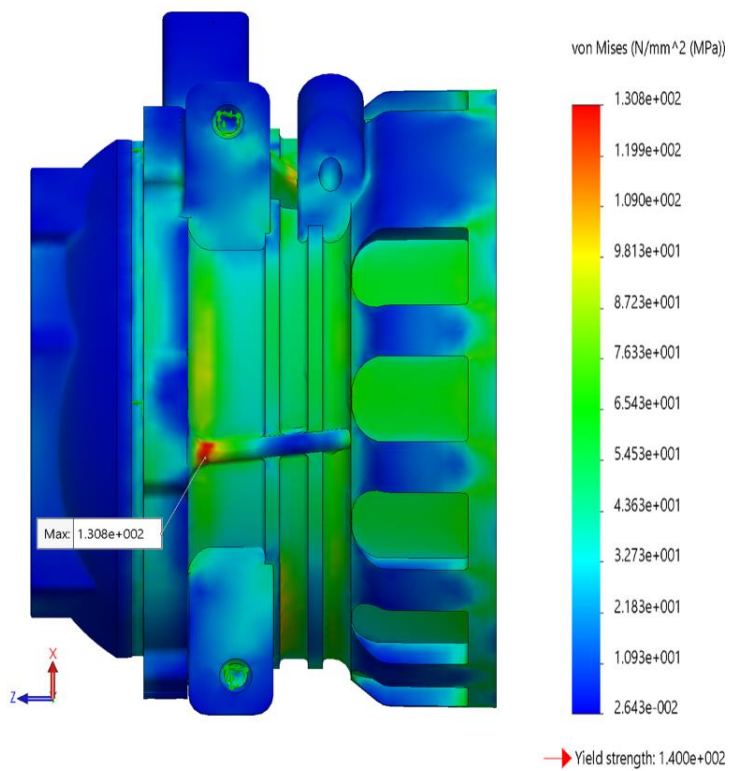
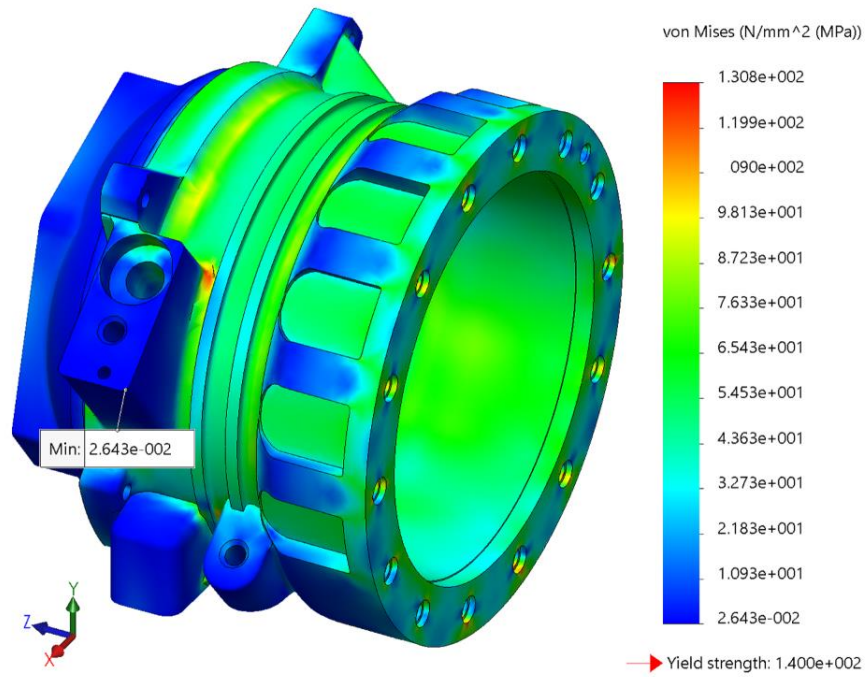
Anexo 10. Localização dos valores máximo e mínimo dos valores de tensão de Von Mises no estudo intermédio realizado em 5.4. Em cima, à esquerda o valor máximo para a configuração inicial dos anéis de reforço e, à direita, o valor mínimo. Em baixo, os valores máximos e mínimos para a configuração ótima



Anexo 11. Localização dos valores máximo e mínimo de tensão de Von Mises para a configuração ótima do componente encontrada em 5.4.



Anexo 12. Localização dos valores máximo e mínimo de tensão de Von Mises para a configuração ótima resultante da sobreposição do estudo de redução de espessura de parede do corpo com o da otimização dos rasgos da flange (secção 5.5).



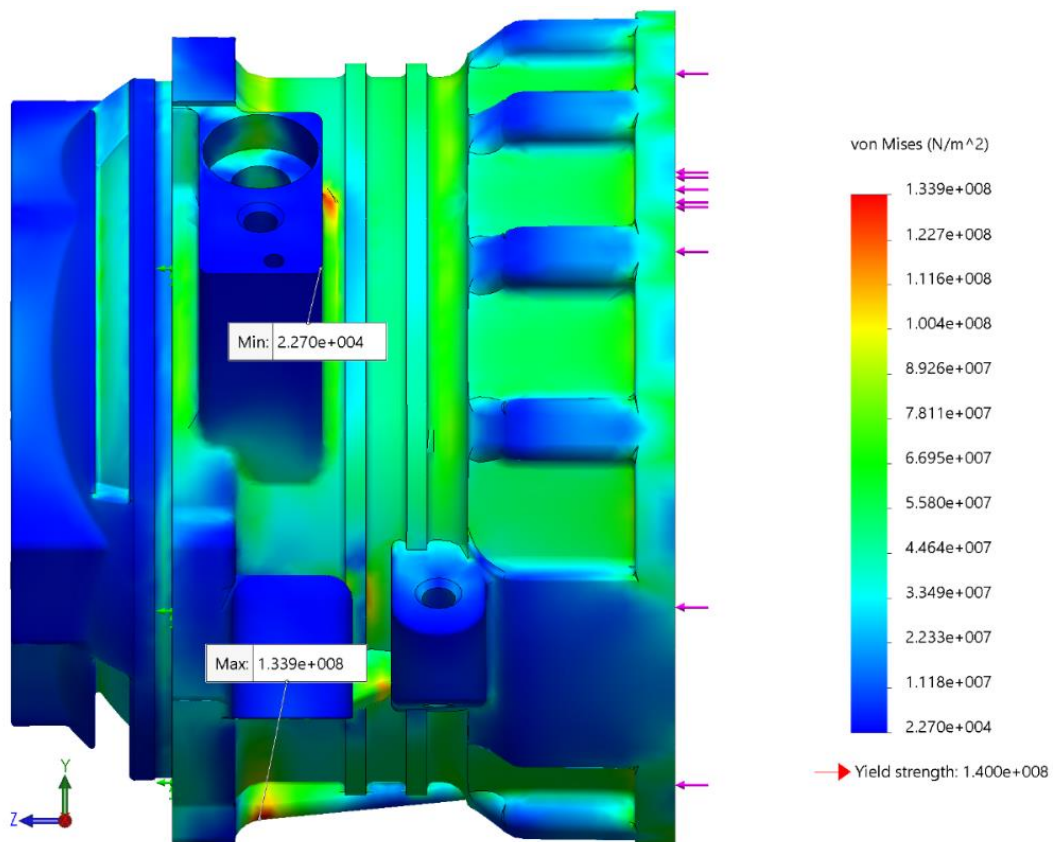
Anexo 13. Cenários avaliados para a configuração dos rasgos criados para o topo na secção 5.7.1. A verde o cenário que corresponde à configuração ótima encontrada.

Parâmetro	Unidades	Inicial	Ótimo	Experiência 1	Experiência 2
$L_t$	mm	3,76	5	5	2
$P_t$	mm	8	10	10	10
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	132,94	134,88	134,88	132,49
Massa	g	1004,9	994,175	994,175	1010,99

Parâmetro	Unidades	Experiência 3	Experiência 4	Experiência 5	Experiência 6	Experiência 7
$L_t$	mm	5	2	5	2	3,5
$P_t$	mm	8	8	9	9	10
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	133,61	136,25	133,38	136,42	138,75
Massa	g	999,194	1012,91	996,657	1011,94	1002,63

Parâmetro	Unidades	Experiência 8	Experiência 9
$L_t$	mm	3,5	3,5
$P_t$	mm	8	9
Tensão de Von Mises (máx)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	131,73	132,15
Massa	g	1006,09	1004,34

Anexo 14. Localização dos valores máximo e mínimo da tensão de Von Mises obtida na simulação da configuração geométrica avaliada em 5.6.1.



Anexo 15. Localização dos valores máximo e mínimo para a tensão de Von Mises para as configurações avaliadas em 5.6.3. Em cima configuração com o topo em forma triangular. Em baixo configuração com topo em forma de estrela.

