



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***A utilização do fabrico aditivo no desenvolvimento
de componente para a indústria automóvel***

Pedro Jorge Pinto Claro Maldonado

Leiria, março de 2019



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***A utilização do fabrico aditivo no desenvolvimento
de componente para a indústria automóvel***

Pedro Jorge Pinto Claro Maldonado

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação da Doutora Maria Leopoldina Alves, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Mestre Carlos Costa e Sousa, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, março de 2019.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

A realização deste projeto de mestrado não seria possível sem a ajuda e o apoio incansável que foi dado nas alturas em que mais precisava.

À Professora Doutora Leopoldina Alves e ao Professor Carlos Costa e Sousa por todo o apoio e orientação ao longo do decorrer deste projeto. Sem eles este projeto não teria sido possível.

Ao Professor Doutor e Coordenador do Mestrado em Engenharia Automóvel Hélder Santos pela disponibilidade em ajudar e a possibilitar que, mesmo após a alteração do tema do projeto, este fosse concluído.

A toda a minha família, sem exceção, por todo o apoio dado em alturas de dúvida e psicologicamente difíceis, por respeitarem as minhas escolhas sendo elas quais fossem, por toda a paciência e por não me terem deixado desistir ao longo desta caminhada.

À minha namorada por todo o apoio, força, incentivo e motivação para trabalhar ao longo destes anos e ao longo deste projeto fazendo com que também o conseguisse finalizar.

A todos os amigos, sem mencionar nomes, porque sabem quem são, por terem dado uma força extra nas mais diversas situações.

Sozinho e sem a ajuda de todos este trabalho não seria possível por isso só vos tenho a agradecer mais uma vez por todo o apoio e orientação!

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

O presente projeto tem como objetivo analisar a viabilidade de projeto e fabrico de componentes para a indústria automóvel, principalmente bombas de travão para motociclos, através de processos de fabrico aditivo para pequenos lotes de produção.

Após a realização de uma pesquisa bibliográfica relativa aos sistemas de travagem existentes e a sua importância na indústria automóvel, procedeu-se a uma análise geral dos processos de fabrico aditivo mais utilizados industrialmente e com maior incidência no fabrico aditivo de metais.

Após seleção do componente a ser alvo de estudo, que se optou por ser uma bomba de travão do tipo axial, realizou-se a escolha do processo de fabrico mais adequado para o fabrico da mesma, optando-se pela Fusão Seletiva de Metais por Laser (SLM), para o qual se optou pelo fabrico do componente em aço H13.

Sabendo que o componente original é geralmente produzido em alumínio foi efetuada uma adequação da geometria da bomba com vista ao seu fabrico pela tecnologia SLM e de modo a minimizar a massa do conjunto e a remover estruturas dispensáveis existentes.

O conjunto foi sujeito a uma análise computacional através do método dos elementos finitos sujeitando o componente a um carregamento típico em utilização real, procedendo-se à comparação entre o componente original produzido em alumínio e o componente otimizado produzido em aço H13. O componente otimizado foi posteriormente produzido por SLM.

Foi possível concluir que o material escolhido não seria o mais apropriado para a realização do presente projeto, sendo aconselhável a substituição do mesmo por outro de resistência mecânica inferior.

Palavras-chave: Sistemas de travagem; Fabrico Aditivo; Fusão Seletiva de Metais

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

This project has the main goal of analysing the viability of projecting and manufacturing this type of components for the automotive industry, mainly brake master cylinders for motorcycles, using metal additive manufacturing for low volume manufacturing.

Initially, to contextualize this project, a study was made about the currently available braking systems and their importance in the automotive industry, then proceeding to a brief analysis of additive manufacturing processes, attributing more importance to metal additive manufacturing.

After the initial assessment and selection of the component to be studied, which was an axial brake master cylinder, was chosen the Selective Laser Melting as the more adequate manufacturing process to this study. Analysing the different available materials, H13 Steel was also chosen for this study.

Knowing beforehand that the original component was made in aluminium, adjustments were made to the original geometry to make it production ready for Selective Laser Melting (SLM) and in order to reduce weight and to remove unnecessary geometries.

Then the components were submitted to a finite element computational study in which typical working conditions and loads were applied. A comparison was made between the original component in aluminium and the optimized one in H13 steel so that the late one could be produced by SLM.

Then the components were submitted to different computational studies in order to validate the changes that were made so that the components could be produced and submitted to further experimental tests.

It was possible to conclude that the chosen material was not the right one and suitable for this job, being something to take into consideration for future works in the subject, opting for materials with lower rigidity and strength.

Keywords: Braking Systems, Additive Manufacturing, Selective Laser Melting

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 - Tipos de bombas de travão – a) Bomba Axial e b) Bomba radial [1].....	5
Figura 2 - Parâmetros do Fabrico Aditivo [8].....	9
Figura 3 - Complexidade vs Custos dos processos de Fabrico Aditivos [8].....	10
Figura 4 - Componente produzido por processos convencionais (a) e mesmo componente produzido por SLM (b)	12
Figura 5 - Fases do processo de fabrico aditivo [10]	14
Figura 6 - Parâmetros de Produção SLM [10]	14
Figura 7 - Densidade energética, velocidade de varrimento e sua influência na densidade utilizando um laser de 195 W [12]	16
Figura 8 - Influência da velocidade do laser e da potência na densidade de um aço [12]	16
.....	
Figura 9 - Estratégias de passagem de laser [13]	17
Figura 10 - Efeito de "balling" e os seus efeitos adversos [14]	18
Figura 11 - Custos de Fabrico [16]	20
Figura 12 - a) Modelo Inicial do Conjunto e b) Vista em corte	21
Figura 13 - Modelo aproximado ao real a ser estudado	22
Figura 14 - Pontos Chave a alterar no Conjunto – Vista isométrica (a), vista em corte (b), vista de pormenor do suporte (c)	24
Figura 15 - Parede do reservatório original (a) e alterada (b)	24
Figura 16 – Detalhe da zona superior do corpo da bomba.....	25
Figura 17 - Parede do cilindro original (a) e alterada (b).....	25
Figura 18 - Largura da parede lateral do apoio do guiador original (a) e alterado (b)	26
.....	
Figura 19 - Largura do apoio do guiador original (a) e alterado (b)	26
Figura 20 - Comprimento do apoio do guiador original (a) e alterado (b)	27
Figura 21 - Apoio do espelho original (a) e alterado (b,c).....	27
Figura 22 - Espessura do apoio da manete original (a) e alterado (b).....	27
Figura 23 - Diâmetro do apoio do espelho original (a) e alterado (b).....	28
Figura 24 - Espessura da tampa da bomba original (a) e alterada (b).....	29
Figura 25 - Comparação do conjunto original (a) vs final (b)	29

Figura 26 - Resultados simulados da pressão no sistema (a) e velocidade (b) para velocidade inicial de 60 km/h [18].....	31
Figura 27 - Resultados experimentais da pressão no sistema (a) e da velocidade (b) de teste a 60 km/h [18].....	32
Figura 28 - Propriedades Mecânicas H13 produzido por SLM [22]	32
Figura 29 - Malha de elementos finitos - Bomba em Aço H13	33
Figura 30 - Diagrama de Corpo Livre	34
Figura 31 - Condições de fronteira - Bomba alterada em Aço H13	36
Figura 32 - Condições de fronteira - Bomba original em Alumínio.....	37
Figura 33 - Pressão do fluido de travagem	37
Figura 34 - Forças de Reação no apoio do guiador	38
Figura 35 - Força externa para equilíbrio do conjunto	38
Figura 36 - Forças de reação nos apoios da manete de travão.....	39
Figura 37 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises - Bomba Original.....	40
Figura 38 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises - Bomba Alterada	40
Figura 39 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises - Bomba Original (Ponto de tensão máxima)	41
Figura 40 - Gráfico de Coeficiente de Segurança - Bomba Original.....	42
Figura 41 - Gráfico de Coeficiente de Segurança - Bomba Alterada	42
Figura 42 - Gráfico de deformação - Bomba Original.....	43
Figura 43 - Gráfico de deformação - Bomba Alterada	44
Figura 44 - Vespa GT 200 - Dimensões Gerais e Massa [23]	45
Figura 45 - Carregamento do 2º Estudo.....	48
Figura 46 - Deformação em caso de queda da bomba em Aço H13	49
Figura 47 - Deformação em caso de queda da bomba em Alumínio.....	49
Figura 48 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises - Bomba Alterada (Ponto de tensão máxima)	50
Figura 49 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises em caso de queda- Bomba Original.....	51
Figura 50 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises em caso de queda- Bomba Alterada	51
Figura 51 - Gráfico de Coeficiente de Segurança em caso de queda- Bomba Original	52

Figura 52 - Gráfico de Coeficiente de Segurança em caso de queda- Bomba Alterada	52
.....	
Figura 53 - SLM Solutions SLM 125 HL	54
Figura 54 - Preparação em Magics	55
Figura 55 - Preparação do ficheiro em Autofab	56
Figura 56 - Levantamento dos suportes para fabrico	56
Figura 57 - Levantamento de camadas devido às constantes paragens do recoater...	58
Figura 58 – Fabrico da bomba de travão finalizado	59
Figura 59 - Preparação do ficheiro da tampa em Magics	60
Figura 60 - Bomba produzida por SLM e em Aço H13 (a) e bomba original em Alumínio (b)	61
Figura 61 - Variação da densidade do aço H13 produzido por SLM e os seus parâmetros de produção [24]	62
Figura 62 - Tampa fabricada por SLM	63

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 - Exemplo de composição do gás utilizado para SLM.....	13
Tabela 2 - Propriedades dos Materiais	23
Tabela 3 - Comparação das massas do corpo da bomba.....	28
Tabela 4 - Resultados do estudo.....	44
Tabela 5 - Características Técnicas SLM 125 HL	54
Tabela 6 - Parâmetros de Produção.....	60

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

A – Área

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BS – *British Standard*

CDRSP – Centro de Desenvolvimento Rápido e Sustentável do Produto

DDD - *Directed Energy Deposition*

DFA – *Design for Assembly*

DFM – *Design for Manufacturing*

DLP – *Digital Light Processing*

E – Módulo de *Young*

F – Força

FA – Fabrico Aditivo

FDM - *Fused Deposition Modeling*

FFF - *Fused Filament Fabrication*

GT – *Gran Tourism*

ISO – *International Organization for Standardization*

JIS – *Japanese Industrial Standard*

LDM - *Laser Metal Deposition*

LENS - *Laser Engineered Net Shaping*

LOM - *Laminated Object Manufacture*

SDL - *Selective Deposition Lamination*

SLI - *Slice Layer Interface*

SLM - *Selective Laser Melting*

SLM – *Selective Laser Melting*

SLS - *Selective Laser Sintering*

STL - *Stereolitography*

SYM - *Sanyang Motor Co., Ltd*

ρ – Densidade

σ – Tensão

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XV
ÍNDICE	XVIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto e motivação	1
1.2. Objetivos do trabalho	2
1.3. Organização do relatório	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Enquadramento teórico	4
2.1.1. Bombas de travão	4
2.1.2. Fabrico Aditivo	6
2.1.2.1. Etapas do Fabrico Aditivo	8
2.1.2.2. Vantagens e Limitações do Fabrico Aditivo	9
2.1.2.3. Fabrico Aditivo de Metais	11
2.1.2.3.1. <i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	12
3. MODELAÇÃO TRIDIMENSIONAL	19
4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	30

4.1.	Parâmetros de Simulação	33
4.1.1.	Estudo 1 – Pressão no cilindro e reações no apoio da manete de travão	34
4.1.1.1.	Análise de resultados	39
4.1.2.	Estudo 2 – Queda lateral estacionária	45
4.1.2.1.	Análise de resultados	48
5.	PRODUÇÃO DO COMPONENTE PELA TECNOLOGIA SLM	54
5.1.	Análise após fabrico	61
5.2.	Processos após fabrico	63
6.	CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	65
	BIBLIOGRAFIA	66

1. Introdução

1.1. Contexto e motivação

Nos nossos dias, a evolução da tecnologia utilizada nos motocicletos de baixa cilindrada e o desafio de aumentar a sua *performance* têm sido constantes. Estes ocorrem quer seja através do desenvolvimento de motores de combustão interna ou elétricos mais potentes, quer seja através da utilização de tecnologias que permitem que a entrega de potência seja feita de forma mais controlada e adequada a cada tipo de utilizador ou mesmo através da redução do peso do conjunto. Devido ao aumento da performance, em termos de motores, surge também necessidade de continuar com o desenvolvimento do conjunto para que este possa acompanhar a referida evolução, sendo alguns dos pontos-chave alvo de estudo constante o caso do *chassis*, do sistema de travagem, do sistema de gestão eletrónica do motor, entre outros.

Um dos pontos mais importantes, mencionado anteriormente, é o sistema de travagem, que permite que motocicletos cada vez mais potentes consigam ter a mesma ou melhor *performance* de travagem que modelos anteriores.

Esta evolução dos sistemas é também acompanhada pelas evoluções tecnológicas noutros campos, como é o caso dos processos de fabrico. Através de processos de fabrico mais recentes é possível obter componentes de forma mais rápida e com menos custo para pequenos lotes de produção ao invés dos elevados custos iniciais para produção em grande escala, sendo possível obter componentes mais leves e com menos volume de material do que através de processos de fabrico convencionais.

Tendo em mente a evolução da tecnologia nos motocicletos com as constantes evoluções tecnológicas no campo dos processos de fabrico surge a ideia de estudar e desenvolver um componente importante do sistema de travagem de um motociclo, a bomba de travão frontal e respetivo reservatório, que pode ou não ser parte integrante da bomba, através do fabrico

aditivo de metais, e que resistam a elevadas temperaturas e pressões, suportando assim as condições de serviço do sistema de travagem.

O uso desta tecnologia permitirá facilitar a produção deste tipo de componentes em pequena escala, sem que o custo por peça seja extremamente elevado, facilitando assim a introdução no mercado de novos modelos e até o lançamento de pequenas empresas que estejam a dar os primeiros passos neste meio.

1.2. Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem por objetivo principal a realização de um estudo de conceção e fabrico de uma bomba de travão para motociclos de baixa cilindrada com recurso à utilização de tecnologias de fabrico aditivo de metais.

De modo a atingir este objetivo o trabalho foi organizado em fases distintas, nomeadamente:

- Pesquisa bibliográfica relativa aos tipos de sistema de travagem que existem, refletindo sobre qual o melhor sistema a utilizar no âmbito deste trabalho.

- Pesquisa bibliográfica acerca das condições de serviço e funcionamento deste tipo de sistema, fundamentalmente pressões existentes dentro da bomba principal e reservatório, temperatura máxima de funcionamento, tipos de fluído utilizado e respetivas propriedades e forças existentes no mecanismo de atuação da bomba, para que todos os esforços mecânicos sejam suportados pelo componente desenvolvido, tanto pela sua geometria como pelo material selecionado.

- Pesquisa bibliográfica relativa aos diversos processos de fabrico aditivo existentes, conjuntamente com o tipo de material que por eles pode ser utilizado. A realização deste levantamento permitirá identificar a solução tecnológica de fabrico aditivo mais apropriada para o tipo de componente em estudo.

- Existindo a pré-seleção dos materiais e a definição das condições de serviço será possível, então, proceder à simulação numérica do funcionamento do sistema, quer em termos mecânicos, quer em termos de mecânica dos fluídos, tanto no reservatório como na bomba.

- Desenvolvimento de um sistema que permita efetuar o ensaio laboratorial do sistema em estudo em condições de similares às condições de serviço, respeitando a normativa existente da União Europeia ou, em alternativa, dos Estados Unidos da América.

- Por fim, proceder-se-á à comparação dos resultados obtidos através da simulação numérica do componente original (no material em que habitualmente é comercializado) e o componente produzido através de um processo de fabrico aditivo, de onde advirão as respetivas conclusões.

1.3. Organização do relatório

Ao longo do primeiro capítulo será realizado o enquadramento do presente projeto, bem como uma apresentação dos seus objetivos e da estrutura do presente documento.

No segundo capítulo é efetuada uma revisão bibliográfica relativa ao tipo de componentes que constituem o sistema de travagem e que serão alvo de estudo bem como dos processos de fabrico aditivo passíveis de ser utilizados no âmbito do presente trabalho, com maior enfoque no processo a ser utilizado denominado por *Selective Laser Melting (SLM)*.

O terceiro capítulo aborda a modelação tridimensional do conjunto e os diferentes aspetos a ter em conta no que diz respeito aos conceitos de *Design for Manufacturing (DFM)* e *Design for Assembly (DFA)*, como base às alterações realizadas ao modelo original do componente.

No quarto capítulo são identificadas as condições de fronteira, carregamentos e parametrização associados ao estudo computacional recorrendo ao método dos elementos finitos, bem como a análise dos resultados obtidos na simulação numérica realizada.

No quinto capítulo o foco principal será a produção laboratorial do componente, abordando a configuração do processo e a realização do fabrico do componente. Realizar-se-á adicionalmente uma análise da densidade e porosidade dos componentes produzidos. Este capítulo abordará também as etapas após fabrico para que este seja colocado em funcionamento bem como todos os problemas que surgiram ao longo das tarefas previstas

O sexto capítulo abordará as conclusões finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Enquadramento teórico

Atualmente, os motociclos de baixa ou média cilindrada possuem sistemas de travagem cada vez mais evoluídos e a partir do momento em que se começou a utilizar sistemas de travagem hidráulicos em vez dos comuns sistemas mecânicos foi possível perceber que a primeira grande evolução tinha sido feita. A partir daí as evoluções focar-se-iam ao nível de modificações aos sistemas de travagem hidráulicos, quer ao nível das bombas de travão, maxilas, pastilhas ou discos de travão.

O grande objetivo do presente trabalho, como já mencionado anteriormente, será realizar um estudo ao nível das bombas de travão já existentes no mercado, ou seja, sistemas hidráulicos com bombas radiais ou bombas axiais, mas sendo concebidas através de processos de fabrico aditivo e materiais diferentes dos até agora utilizados, tendo em vista a produção em pequena escala, sem que isso signifique um custo excessivo para as empresas.

Em primeiro lugar, e respeitando o primeiro objetivo definido para este trabalho, será necessário perceber qual o tipo de bomba hidráulica que será utilizada, quer pela sua complexidade e facilidade de fabrico, quer pelas suas vantagens funcionais para motociclos de baixa e média cilindrada.

2.1.1. Bombas de travão

Nos sistemas de travagem utilizados nos dias de hoje é possível observar dois tipos de bombas hidráulicas de travão, sendo estas as bombas axiais e as bombas radiais (Figura 1).



Figura 1 - Tipos de bombas de travão – a) Bomba Axial e b) Bomba radial [1]

Os primeiros sistemas hidráulicos de travagem aplicados aos motociclos foram os sistemas axiais em que a força de travagem exercida na manete de travão é perpendicular ao pistão que irá criar pressão no fluido do sistema [2].

A grande diferença do sistema axial para o sistema radial é a orientação das forças aplicadas, sendo que, contrariamente ao sistema axial, no sistema radial a força exercida na manete é paralela ao movimento do pistão. Esta diferença no funcionamento leva então não a um maior poder de travagem, comparando ambos os sistemas com o mesmo diâmetro de pistão, mas sim a uma melhor sensação de travagem e controlo, devido às forças aplicadas serem diretamente transmitidas para o pistão, sem flexão adicional do sistema [3] - [4].

No sistema radial a força é aplicada em direção ao centro de gravidade da mota e paralela ao movimento do pistão, levando a que a flexão existente no sistema seja menor, quer da manete de travão, quer do corpo da bomba, existindo então uma maior estabilidade do sistema que, conseqüentemente, leva a que a sensação transmitida ao condutor seja também de maior controlo [3] - [4].

As características mencionadas acima relativas aos sistemas de travagem radial são bastante importantes nos motociclos de alta cilindrada, devido às elevadas velocidades atingidas, mas mesmo assim esta diferença face aos sistemas axiais só é realmente sentida em casos em que a utilização é realizada em pista, ou seja, em que a mota é levada ao limite e em que qualquer melhoria é significativa [4].

Em relação a uma utilização citadina esta diferença não será notória, sendo então viável a utilização de um sistema axial mais simples e com diversos anos de utilização, sendo então este o objeto de estudo do presente trabalho, na tentativa de melhorar o sistema atual e de alterar os seus materiais e processos de produção.

2.1.2. Fabrico Aditivo

O fabrico aditivo (FA) desde cedo que está associado aquilo que é denominada de prototipagem rápida, ou seja, ao fabrico rápido e com pequenos custos iniciais associados de pequenos protótipos para futura produção em larga escala, sendo que atualmente tem existido uma mudança de paradigma para a produção de pequena escala, ou seja, de pequenas séries de produtos, facilitando, como já foi referido anteriormente, o acesso ao mercado de novas empresas e a obtenção de modelos funcionais de complexidade cada vez mais elevada.

Este tipo de fabrico, segundo o que consta na norma ASTM F52910 – 18 [5], consiste num processo que permite a formação de objetos camada a camada, através de modelos 3D realizados através de *software* computacional.

Os primeiros passos nesta área foram dados por volta do ano de 1987 pela empresa *3D Systems*, através de um processo denominado por Estereolitografia, que envolve a deposição das diversas camadas de material polimérico de forma sequencial, sendo polimerizado através de luz ultravioleta. Na área do fabrico aditivo de metais, os primeiros sistemas de venda ao público datam de 1995.

Este tipo de processo, devido aos objetos serem formados camada a camada, permite uma redução do desperdício de matéria-prima quando comparado com processos convencionais de fabrico subtrativo, como é o caso da maquinagem, em que em vez de se ir adicionando matéria-prima, como é o caso do fabrico aditivo, reaproveitando-se o material não utilizado, se vai retirando material de um bloco original de material, sendo que todo o material não utilizado e removido do bloco inicial constitui desperdício. Este tipo de processo possui as vantagens de tornar a realização de protótipos mais rápida e económica, não sendo necessário tanto tempo desde o desenvolvimento do modelo tridimensional até ao seu fabrico.

O fabrico aditivo pode ser dividido essencialmente em 7 famílias [6, 7] :

- Fotopolimerização: conjunto de processos que consistem na cura de uma resina fotopolimérica que, como o próprio nome indica, é sensível à luz, sendo curada seletivamente através de laser ou projetor para que se inicie o processo de polimerização, fazendo com que as zonas expostas solidifiquem. Exemplos de processos: Estereolitografia, *Digital Light Processing* (DLP).
- *Binder Jetting*: consiste na deposição de um aglutinante líquido orgânico ou inorgânico sobre uma camada de pó metálico, polimérico, vítreo ou cerâmico que é sequencialmente depositada e aglutinada até se obter o componente final, sendo que os componentes produzidos com pó metálico ou cerâmico passam depois por um processo de sinterização para que se obtenham peças menos porosas e com melhores propriedades mecânicas. Exemplos de processos: *VoxelJet*, *3DP – 3D Printing* e *ExOne*.
- *Material Jetting*: consiste na deposição de partículas de materiais no estado líquido, nomeadamente foto-polímeros, polímeros ou resina, que solidificarão à temperatura ambiente ou serão curados com luz ultravioleta. Ex: *Multi-Jet Modeling*, *Polyjet* e *Projet*.
- Laminação de folhas: consiste na deposição sequencial de chapa metálica, papel ou polimérica, camada a camada, que será cortada na devida geometria de secção por um laser ou lâmina para que seja colocada uma nova chapa que será soldada por ultrassons ou fixada por adesivos à camada anterior. Exemplo de processos: *Selective Deposition Lamination* (SDL) e *Laminated Object Manufacture* (LOM).
- Extrusão: conjunto de processos que consistem na extrusão de material líquido, usualmente termoplástico, através de um orifício de dimensões reduzidas, sobre uma base, camada a camada. Exemplos de processos: *Fused Deposition Modeling* (FDM) e *Fused Filament Fabrication* (FFF).

- *Directed Energy Deposition*: processos nos quais um pó ou filamento metálico é depositado numa poça de fusão gerada por um laser ou feixe de elétrons e localizada na superfície do componente a ser fabricado, sendo soldada às camadas inferiores já depositadas. Exemplo de processos: *Laser Metal Deposition* (LDM) e *Laser Engineered Net Shaping* (LENS).
- Processo Híbrido: consiste na família de processos anteriores (DDD) combinados com processos de maquinagem em que os processos de fabrico aditivo e subtrativo coexistem num único equipamento. Exemplo de processo: *AMBIT® – Hybrid Manufacturing Technologies*.
- Fusão de pós: último grupo de processos de fabrico aditivo em que um pó polimérico, metálico ou cerâmico é depositado sobre uma plataforma e sujeito a fusão por parte de um laser ou de um feixe de elétrons. Exemplo de processos: *Selective Laser Sintering* (SLS) e *Selective Laser Melting* (SLM), que é o processo que será utilizado ao longo do presente trabalho.

2.1.2.1. Etapas do Fabrico Aditivo

Os processos de fabrico aditivo, quer sejam de metais ou de qualquer outro tipo de materiais, requerem desde logo uma modelação computacional através de *software* de um modelo 3D que será depois necessário converter para o formato *Stereolithography* (.STL) para que a peça seja definida em superfícies triangulares. Quanto maior for o número de triângulos, maior será a precisão do processo e o tempo de conversão/execução. Mais tarde a geometria será passada ao formato *Slice Layer Interface* (.SLI) para ser dividida nas respetivas camadas da peça 3D. Para além destes passos será também necessário definir o processo de fabrico e o material a utilizar, sendo depois necessário definir por fim os parâmetros de produção adequados ao material escolhido, ao tipo de processo e geometria, podendo ser necessário algum acabamento superficial posterior ou de melhoria de propriedades mecânicas do conjunto. As diferentes etapas do processo, bem como alguns

aspectos a ter em conta na realização do processo, poderão ser consultados na imagem da figura 2.

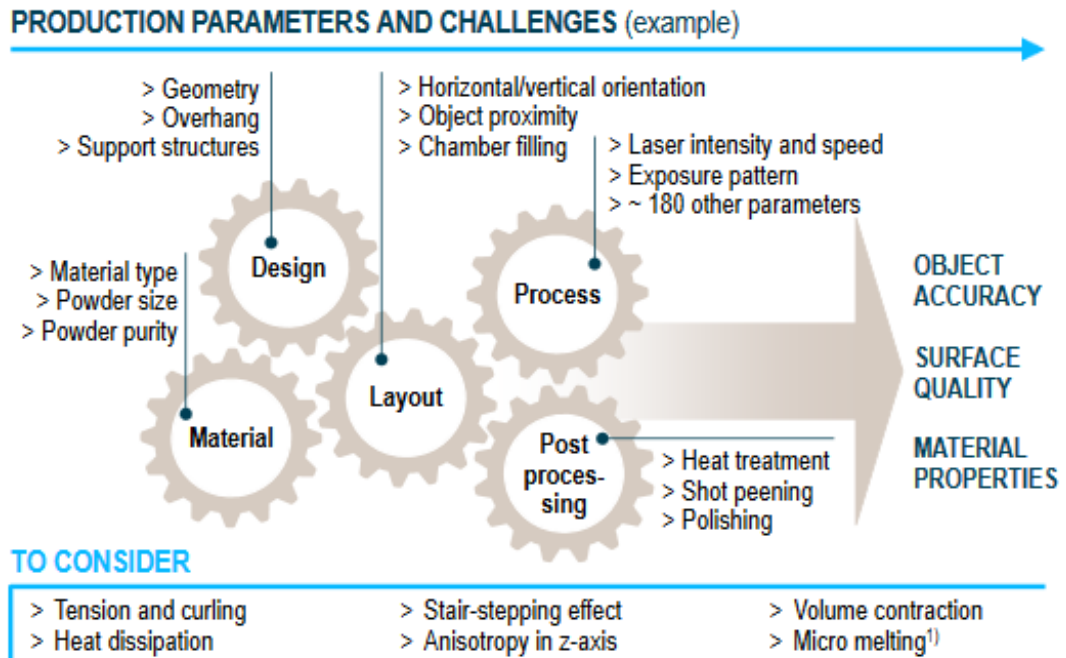


Figura 2 - Parâmetros do Fabrico Aditivo [8]

2.1.2.2. Vantagens e Limitações do Fabrico Aditivo

O fabrico aditivo, quer de metais, quer de qualquer outro tipo de material possui vantagens e desvantagens, dependendo do tipo de aplicação desejada, que levará à dependência do tipo de processo escolhido e do material a utilizar para o fabrico dos componentes desejados.

Apesar destes fatores criarem, desde logo, algumas condicionantes, pode-se dizer que, associado a este tipo de fabrico existem as seguintes vantagens:

- Liberdade criativa – Através deste tipo de processo de fabrico é possível obter diversos tipos de geometrias não possíveis através de métodos de fabrico

convencionais pois existe a liberdade da construção camada a camada. Caso não seja possível o fabrico de determinada geometria por si só, é possível utilizar material de suporte que é posteriormente removido, possibilitando a realização de basicamente qualquer geometria pretendida.

- Relação Complexidade / Custo e seus benefícios – Devido ao facto de este tipo de fabrico ser aditivo, ou seja, ser realizado por camadas, existe a vantagem de poderem ser realizados componentes com estruturas internas impossíveis de realizar através de processos de fabrico convencionais. É possível, por exemplo, realizar estruturas internas nas paredes de um componente para arrefecimento, proceder à redução de peso ou aumento da rigidez de uma estrutura. Esta complexidade leva também a que se possa evitar o recurso a diferentes processos de fabrico na obtenção de um componente, combinando todos eles num só (Figura 3).

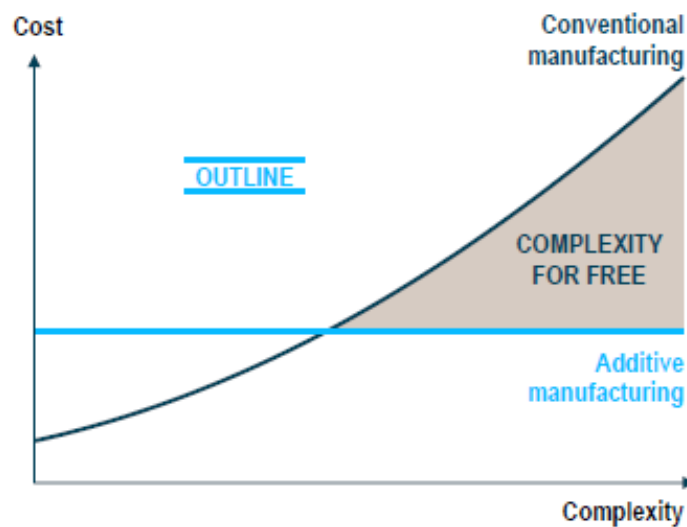


Figura 3 - Complexidade vs Custos dos processos de Fabrico Aditivos [8]

- Fabrico de conjuntos – Através deste tipo de fabrico, e através também dos materiais de suporte já mencionados anteriormente, é possível produzir conjuntos de várias peças ligadas entre si, num só “fabrico”, não sendo necessário fabricar os diversos componentes em separado para que exista uma posterior montagem.

Tal como qualquer outro tipo de processo é necessário entender e ter ciente que existem também diversas desvantagens durante o processo de fabrico e de preparação do mesmo. Destas desvantagens é possível realçar:

- Limitações dimensionais do fabrico da peça
- Tempos de fabrico longos
- Custos mais elevados de produção em grande escala
- Precisão dimensional e acabamento que por vezes necessitam de posteriores operações complementares
- Parametrização complexa do fabrico

2.1.2.3. Fabrico Aditivo de Metais

O fabrico aditivo de metais é um conjunto de diversos processos em que, como o próprio nome indica, são utilizados pós ou filamentos metálicos para a produção de componentes [6] [7].

Os processos fundamentais a ter em conta são os seguintes, sendo que alguns já foram descritos anteriormente no tópico 2.1.2.:

- *NanoParticle Jetting*: Este tipo de processo está incluído na família de processos já abordada de *Material Jetting* e consiste no depósito de nanopartículas metálicas em suspensão através de diversas cabeças de impressão por forma a produzir os componentes através de camadas ultrafinas de material. Após o componente estar finalizado é sujeito a um curto período de sinterização [9];
- *Binder Jetting*: Processos já descritos no tópico 2.1.2 e que utilizam um aglomerante líquido para conferir solidez a um pó metálico, sendo depois o componente também sujeito a sinterização;
- *Laser Engineering Net Shape e Electron Beam Additive Manufacturing*: Processos que se enquadram na família *Directed Energy Deposition* do tópico

2.1.2. , em que processos nos quais um pó ou filamento metálico é depositado numa poça de fusão gerada por um laser ou feixe de eletrões e localizada na superfície do componente a ser fabricado, sendo soldada às camadas inferiores já depositadas;

- *Laminação de placas*: Consiste na deposição de folhas metálicas camada a camada, soldadas por ultrassons ou fixas através de adesivos e cortadas através de um laser ou lâmina;
- *Electron Beam Melting e Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting*: Processo que será abordado ao longo do tópico 2.1.2.3.1 e que consiste na fusão seletiva ou sinterização de um pó metálico através de um feixe laser ou feixe de eletrões.

2.1.2.3.1. ***Selective Laser Melting (SLM)***

O processo de fabrico *Selective Laser Melting* (SLM) ou Fusão Selectiva por Laser, a ser utilizado no âmbito do presente trabalho, consiste na fusão seletiva de metais em forma de pó através de um feixe laser.



Figura 4 - Componente produzido por processos convencionais (a) e mesmo componente produzido por SLM (b)

Este processo de fabrico aditivo de metais é uma evolução do processo de um processo denominado por *Selective Laser Sintering* (SLS), sendo agora possível a fusão total do

material através de uma evolução da tecnologia e do processo em si, formando-se peças mais densas e com melhores propriedades que as anteriormente realizadas por SLS devido a serem atingidas temperaturas mais elevadas com o auxílio de um gás inerte, neste caso Argon, com a composição presente na Tabela 1, sendo possível uma maior aplicação deste tipo de componentes nas diversas áreas da indústria e com qualidade superior, nomeadamente aeroespacial, biomédica, automóvel, etc. O gás inerte utilizado permite controlar e/ou evitar a oxidação do metal que está a ser fundido, bem como ajudar na remoção dos gases gerados durante a fusão do material, pelo que poderá ser variada a alimentação do gás para melhor controlar as condições internas da câmara de fabrico.

Tabela 1- Exemplo de composição do gás utilizado para SLM

Ar Premier	
O ₂	< 2 ppm
H ₂ O	< 2 ppm
THC (Como CH ₄)	< 0,1 ppm
N ₂	< 4 ppm
Pureza	99,9992

Devido a ser um processo que realiza o fabrico camada a camada, através da deposição do pó e da passagem do laser, como mencionado anteriormente, é possível realizar uma quantidade quase ilimitada de geometrias, desde as mais simples às mais complexas. As principais restrições do processo são a secção/volume de fabrico e os tipos de materiais utilizados, sendo que a configuração do processo depende muito do material e também das secções transversais do componente a produzir, para que não exista uma densidade energética demasiado elevada, mas que permita uma boa fusão dos póis metálicos de cada secção.

O processo em si utiliza um pó metálico com partículas com um diâmetro aproximado entre 20 e 45 µm que é depositado na plataforma metálica pelo *recoater*, que vai percorrendo a plataforma antes da passagem do laser em cada camada. Após a passagem do laser existe a descida da plataforma aproximadamente numa gama de valores entre 25 e 50 µm. É

repetido este processo o número de vezes necessário para que toda a peça seja produzida por completo, tendo em conta o número de camadas definido no *software* em que o ficheiro com a extensão “.slm” foi gerado, sendo que o processo da parte computacional será descrita mais à frente no trabalho, especificamente no capítulo direcionado ao fabrico (Secção 3).

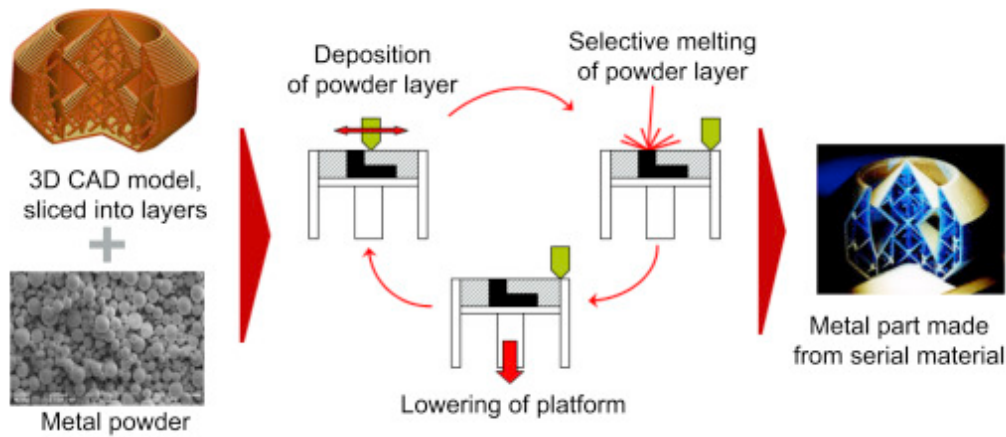


Figura 5 - Fases do processo de fabrico aditivo [10]

Este processo implica uma correta configuração dos parâmetros de fabrico para que os componentes produzidos sejam produzidos com a porosidade exigida e sem defeitos sendo que, alguns estudos da utilização da tecnologia SLM com aço, consultados no âmbito da pesquisa bibliográfica, demonstram a importância da correta parametrização nos aspetos anteriormente mencionados [10, 11, 12].

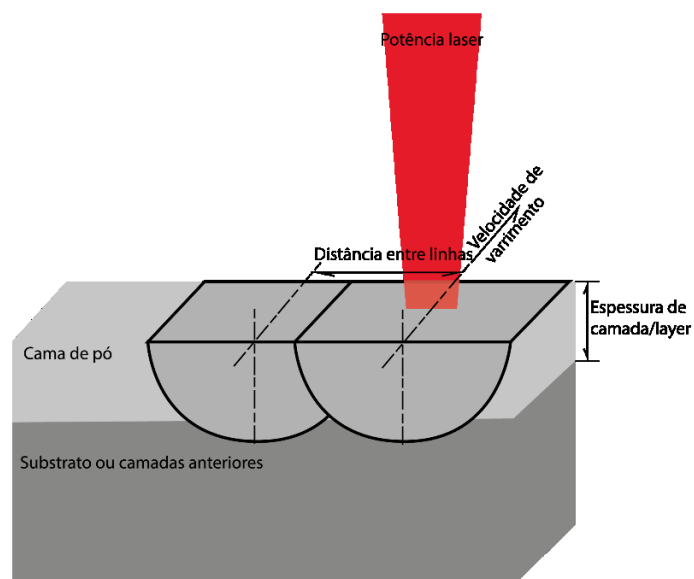


Figura 6 - Parâmetros de Produção SLM [10]

De acordo com o estudo de Kai Guan *et all* [10] e Hengfeng Gu *et all* [12] é possível perceber os parâmetros que mais influenciam a porosidade e a microestrutura de uma peça produzida por SLM, sendo a densidade energética o fator mais importante e o que aborda os diversos elementos configuráveis, como é possível verificar na equação (1),

$$E_D = \frac{P}{e * h * v} \quad (1)$$

onde os diversos elementos constituintes da equação indicam:

- P [W]: potência do laser a ser utilizada. Este parâmetro necessita de ser configurado tendo em conta os restantes parâmetros para que se consigam componentes tão densos como desejado, sendo que este é o fator mais preponderante. Como mencionado, a potência é o fator mais preponderante, sendo aquele que mais influenciará o resultado final, conjugando-se apenas com as variáveis do denominador para pequenos ajustes da densidade energética desejada [10] – [12].

-e [mm]: valor que define a espessura de camada de pó a ser depositada e que está diretamente relacionada com a dimensão das partículas do pó a ser utilizado, sendo que segundo alguns estudos esta deve ser inferior à dimensão da partícula para que se obtenham peças mais densas em virtude da compactação do pó por parte do dispensador [10] – [12].

-h [mm]: valor que especifica o espaçamento entre cada varrimento do feixe do laser, sendo que se deve sempre tentar que este valor não seja demasiado elevado para que se certifique que todo o pó depositado é fundido da mesma forma, de modo a assegurar uma porosidade uniforme ao longo de todo o componente produzido.

-v [$\frac{mm}{s}$]: determina a velocidade de passagem do feixe laser, sendo que, pela observação da equação (1) é possível verificar que para uma maior potência do laser é necessário que a velocidade de varrimento seja maior para que a poça de fusão seja a correta e não exista uma densidade energética excessiva.

Através dos gráficos representados nas figuras 7 e 8 é possível compreender a influência quer da densidade energética na densidade de um aço fabricado por SLM (neste

caso não o aço H13 que foi o utilizado no âmbito do presente trabalho), quer da influência da potência do laser e da velocidade de passagem do mesmo na densidade do material.

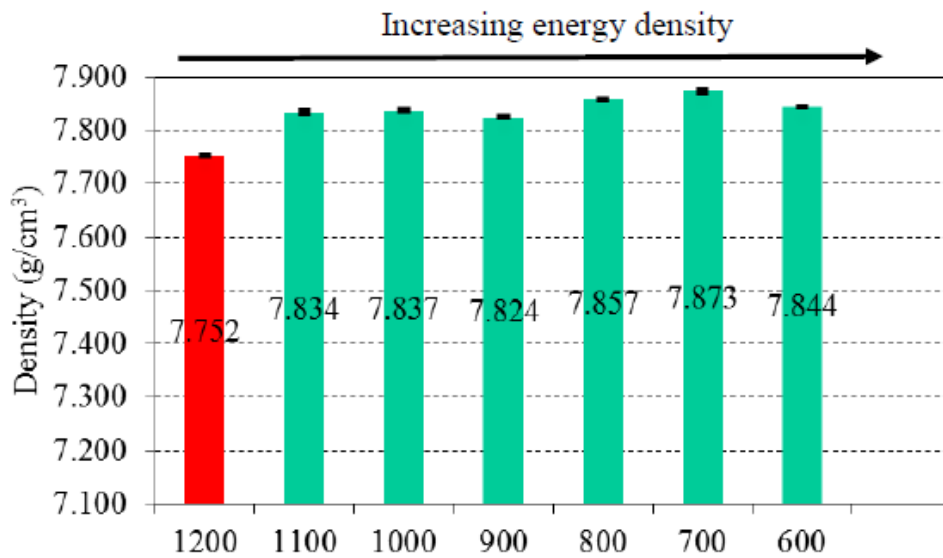


Figura 7 - Densidade energética, velocidade de varrimento e sua influência na densidade utilizando um laser de 195 W [12]

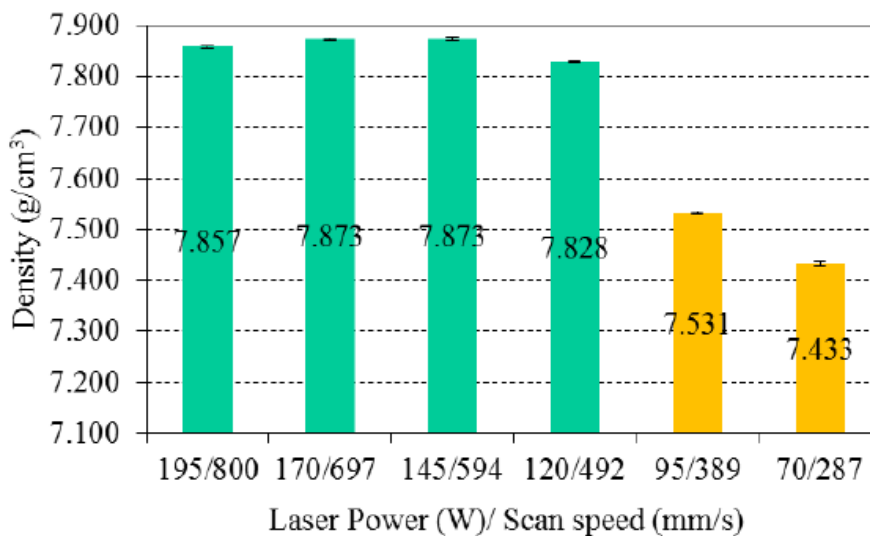


Figura 8 - Influência da velocidade do laser e da potência na densidade de um aço [12]

Pela análise das figuras 7 e 8, é possível verificar que existe uma correlação entre o aumento da densidade energética e uma melhor densidade do componente produzido, sendo, contudo, necessário que não se corra o risco de a densidade energética ser demasiado reduzida, como é o caso da primeira barra da figura 7 (vermelha), em que a velocidade de

varrimento é tão elevada (1200 mm/s) para uma densidade de laser constante de 195 W que a densidade final do componente é afetada.

É também possível verificar na figura 8 este mesmo problema da densidade final através das barras amarelas, mantendo-se agora a densidade energética constante. É possível verificar que diversas combinações de potência do laser e de velocidade de varrimento levam a que a densidade de uma peça varia, mesmo mantendo a densidade energética constante.

Para além destes fatores, será também necessário ter em conta a estratégia de passagem do laser para que se consiga obter uma boa conjugação de densidade do componente, porosidade, precisão e produtividade, existindo diferentes estratégias passíveis de ser utilizadas, tal como apresentado na figura 9.

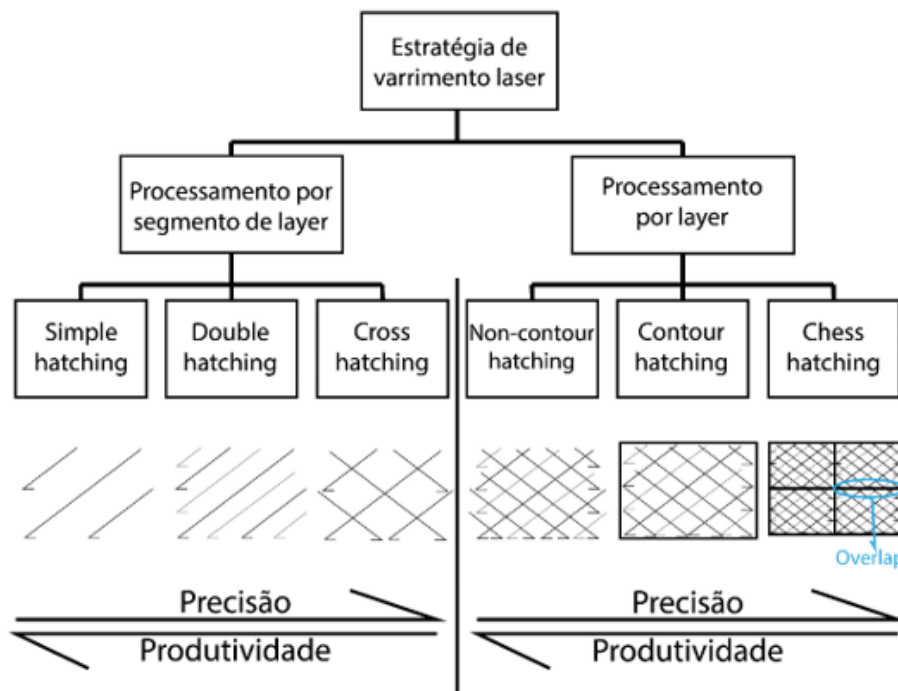


Figura 9 - Estratégias de passagem de laser [13]

A correta parametrização das diferentes variáveis já mencionadas, para além de melhorar o acabamento, densidade e porosidade do componente produzido devido a uma correta poça de fusão gerada, evita igualmente um efeito denominado por "balling" (Figura 9). Este caracteriza-se pela existência de uma malformação da poça de fusão após

solidificação, o que impede um correto fabrico do componente, nivelamento e até depósito do pó metálico, levando por vezes até que o processo tenha de ser interrompido devido ao bloqueamento da passagem do *recoater*.

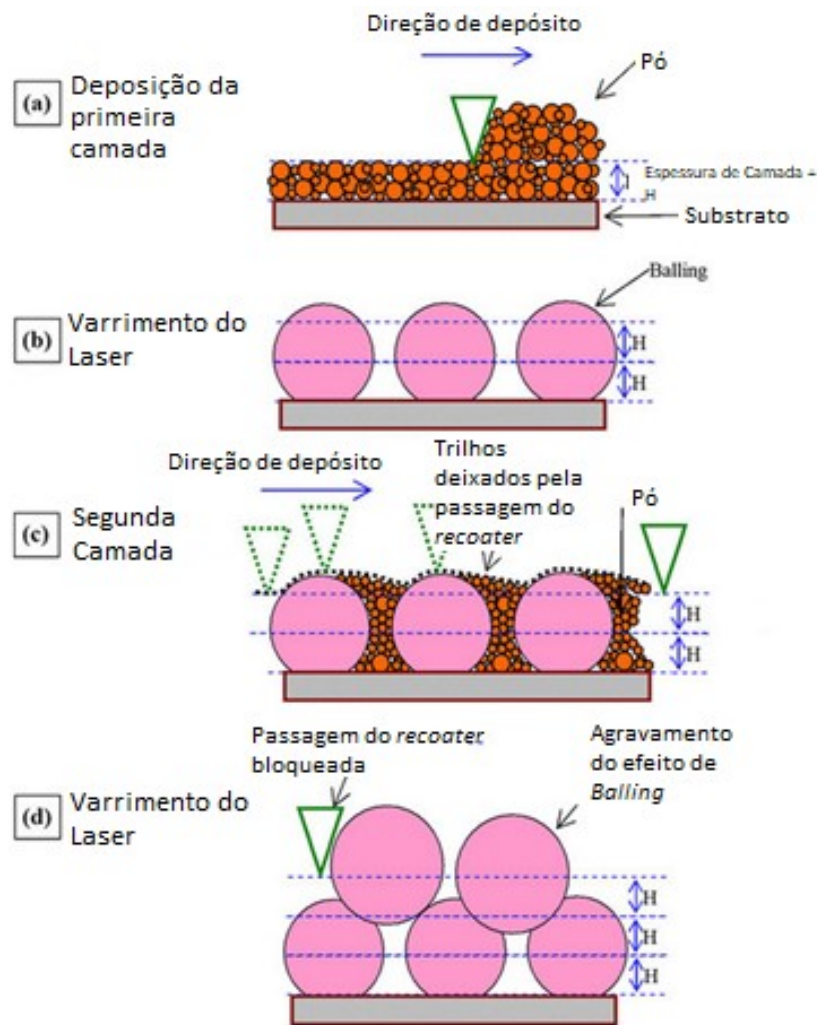


Figura 10 - Efeito de "balling" e os seus efeitos adversos [14]

3. Modelação Tridimensional

Após análise dos diversos componentes do sistema, quer do corpo da bomba quer da tampa, quer do pistão, quer da manete de travão é então perceptível que os elementos que poderão ser realmente alvo de análise serão o corpo da bomba, a tampa do reservatório e a manete de travão, foi decidido que o estudo apenas iria recair nos 2 primeiros. Atualmente o pistão da bomba também já é realizado através de injeção de plástico, mas é algo apenas utilizado em alguns motociclos e ainda alvo de bastante estudo e desenvolvimento, não sendo também viável a sua produção através de processos de fabrico aditivo pois não seria possível atender aos fatores de porosidade e rigor geométrico e dimensional da peça em questão.

Para os componentes selecionados o objetivo focou-se em proceder ao seu fabrico através de processos de fabrico aditivo de metais. Os materiais colocados à disposição pelo Centro de Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto (CDRSP) do Instituto Politécnico de Leiria para o fabrico do componente por SLM foi o aço H13, quer pelo seu custo mais reduzido e elevada disponibilidade comparativamente a outros materiais passíveis de serem utilizados, bem como a razoável adequabilidade da utilização deste material à função desempenhada pelo mesmo.

Após ser selecionado o tipo de sistema de travagem a ser objeto de estudo, foi necessário obter uma bomba de travão já existente no mercado, para efeitos de análise. Esse componente, bomba de travão frontal do tipo axial de uma *Vespa Gran Turismo 200*, foi cedida uma pelo concessionário Lombas e Curvas, Lda.

Após a obtenção da bomba de travão procedeu-se à modelação tridimensional do conjunto para que fosse possível realizar os diversos ajustes ao modelo e respetiva preparação para fabrico, seguindo as diversas diretrizes disponíveis na bibliografia consultada relativas aos conceitos de *Design for Manufacturing* (DFM) [15] e *Design for Assembly* (DFA) [16, 17]. A utilização destes conceitos tem por objetivo o desenvolvimento de componentes que sejam fácil e economicamente produzidos. A importância do DFM para o fabrico é realçada pelo facto de que cerca de 70% dos custos de fabricação de um produto (custo de materiais, processamento e montagem) dependerem diretamente de decisões de projeto e desenvolvimento, sendo as decisões de produção (como planeamento de processo

de fabrico ou seleção de equipamentos) responsáveis por apenas 20% dos custos de fabrico (Figura 11).

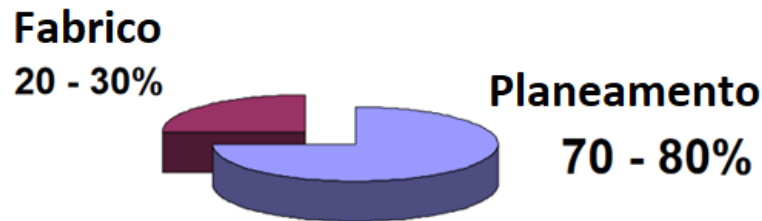


Figura 11 - Custos de Fabrico [16]

Tanto o DFM como o DFA têm por objetivo reduzir o material utilizado, o tempo de desenvolvimento do produto e os custos de produção. Nesse sentido, é necessário realizar primeiramente um conceito do produto a realizar, seguido da aplicação de DFA para que se otimize o *design* inicial para a montagem de todos componentes. Após este passo seguem-se os ajustes para fabrico, ou seja, DFM, com vista à otimização do *design* mais uma vez para produção [16].

Os principais princípios a ter em conta para DFA e DFM são:

- Minimizar o número de componentes;
- Minimizar a reorientação dos componentes durante a montagem do conjunto;
- Otimizar a montagem por forma a que seja possível de realizar de forma sequencial e da base para o topo do componente, reforçando o ponto mencionado anteriormente;
- Utilizar componentes *standard*;
- *Design* do produto com vista a que este seja modular e que seja simétrico no que toca à sua montagem, facilitando assim todo o processo de montagem;
- Simplificar e reduzir o número de operações de fabrico a realizar;
- Utilizar tolerâncias e acabamentos aceitáveis e passíveis de serem realizados com o menor custo possível sem que o funcionamento seja colocado em causa.

De forma a realizar a modelação do conjunto, foram separados todos os seus componentes e realizou-se a medição dos mesmos para sua modelação no *software* de modelação 3D *Solidworks*.

Primeiramente foi elaborado um modelo simples, sem boleados nem chanfros, para uma montagem inicial do conjunto virtual, sendo depois adicionados os boleados e os chanfros para uma aproximação mais exata ao conjunto real. Na figura 12 é possível visualizar o conjunto utilizado para a avaliação inicial e para decisão das peças a serem fabricadas por SLM.

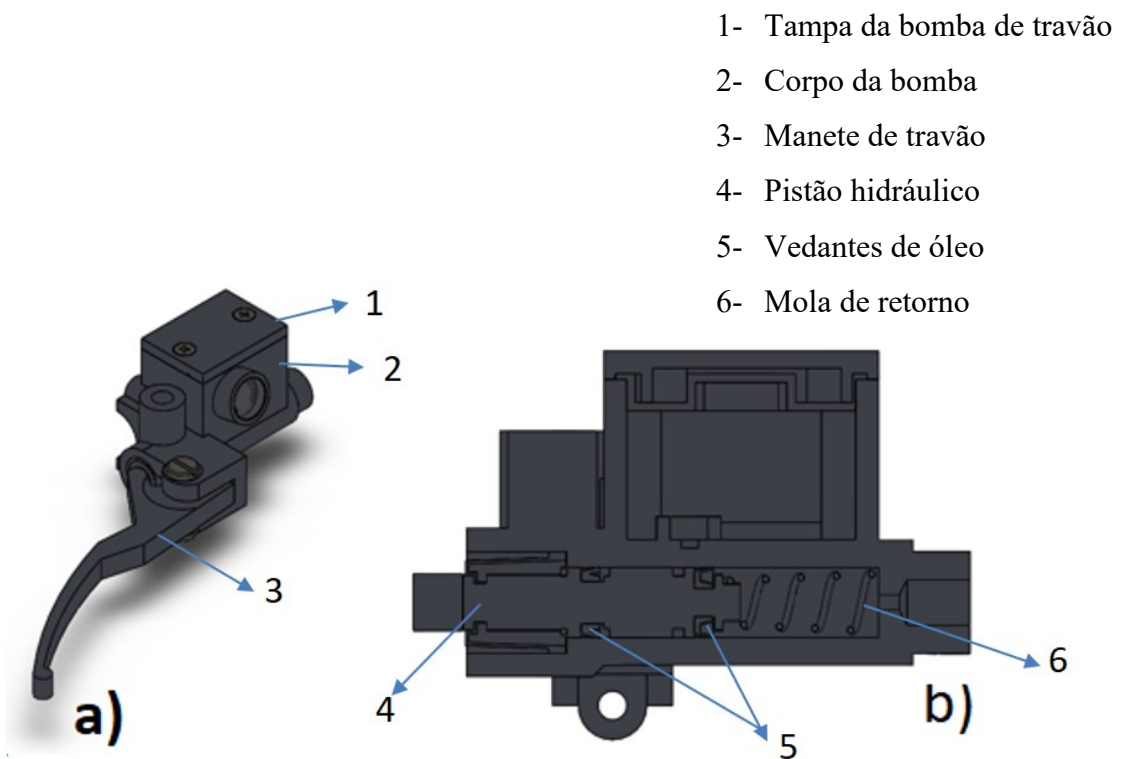


Figura 12 - a) Modelo Inicial do Conjunto e b) Vista em corte

Tendo sido feita a avaliação funcional do conjunto e o estudo dos componentes a serem fabricados, foi então decidido que os componentes a fabricar e a serem alvo de maior análise seriam o corpo da bomba e respetivo cilindro, a tampa da bomba e, na eventualidade de uma aplicação a um guiador para testes, o restante do suporte de apoio ao guiador.

Procedeu-se seguidamente aos ajustes necessários, como chanfros e boleados, para que os componentes ficassem mais detalhados com vista à análise para produção e montagem.

Neste modelo foram também removidas as roscas e consultadas tabelas para verificar as furações a realizar para ser realizada a roscagem das mesmas posteriormente.

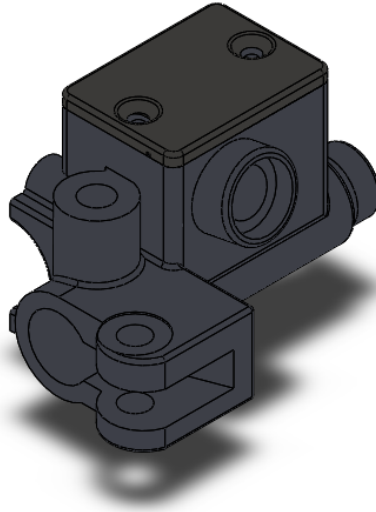


Figura 13 - Modelo aproximado ao real a ser estudado

Conforme referido anteriormente e após contacto com o Centro de Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto (CDRSP) do Instituto Politécnico de Leiria, foi definido que o material que seria utilizado no fabrico dos componentes seria o aço H13, ao invés da liga de alumínio do componente real que foi considerada como sendo a liga JIS - AC2A que é das mais utilizadas em cilindros de travão. Ficou também definido que o processo de fabrico que seria utilizado seria então SLM.

Devido às diferenças, quer em termos de densidade quer de propriedades mecânicas entre os dois materiais (Tabela 1), foi necessário proceder novamente a um conjunto de alterações em ambos os componentes, com maior incidência no corpo da bomba, com vista à preparação para fabrico.

Tabela 2 - Propriedades dos Materiais

Propriedades físicas e mecânicas	Aço H13	Liga de Alumínio JIS - AC2A
Densidade (@20°C)	7.76 g/cm ³	~2.75 g/cm ³
Tensão de ruptura (@20°C)	1200 - 1590 MPa	345 MPa
Tensão de cedência (@20°C)	1000 - 1380 MPa	280 MPa
Módulo de elasticidade (@20°C)	215 GPa	~ 70 GPa
Coefficiente de Poisson	0.27-0.30	0.33

Querendo sempre trabalhar dentro da zona elástica, ou seja, abaixo da tensão de cedência do material, e considerando que as forças exercidas nos componentes se mantêm constantes, é possível analisar-se a relação entre a força aplicada e a área da secção transversal onde atua essa força, que se traduz na tensão segundo o eixo da força aplicada (2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Sendo a força constante e sendo a relação das tensões de cedência dos dois materiais (3) na ordem de 4 vezes superior do aço em relação ao alumínio é possível considerar que as áreas poderão claramente, em segurança, ser reduzidas para ¼ sem comprometer o funcionamento correto do conjunto, para que a massa deste fosse também mais próximo da inicial que, com o aço e sem alterações geométricas seria 2,8 vezes maior (4).

$$R\sigma = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{1190 \text{ MPa}}{280 \text{ MPa}} = 4,25 \quad (3)$$

$$R\rho = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{7,8}{2,75} = 2,83 \quad (4)$$

Com os resultados obtidos e já com os modelos definidos, optou-se por analisar as áreas chave de melhoramento, primeiramente no corpo da bomba e seguidamente na tampa da mesma, pois é a que será alvo de alterações menos profundas.

Em relação ao corpo da bomba é claro que os pontos-chave a alterar (Figura 14) serão o diâmetro do cilindro (i), a espessura das paredes do reservatório (ii), a espessura do apoio do espelho (iii), a espessura do apoio da manete de travão (iv) e as dimensões do apoio do guiador (v), tendo sido realizadas outras alterações gerais menos significativas. No que toca à tampa realizou-se apenas uma diminuição geral das espessuras (vi) tendo em conta a análise já realizada (3).

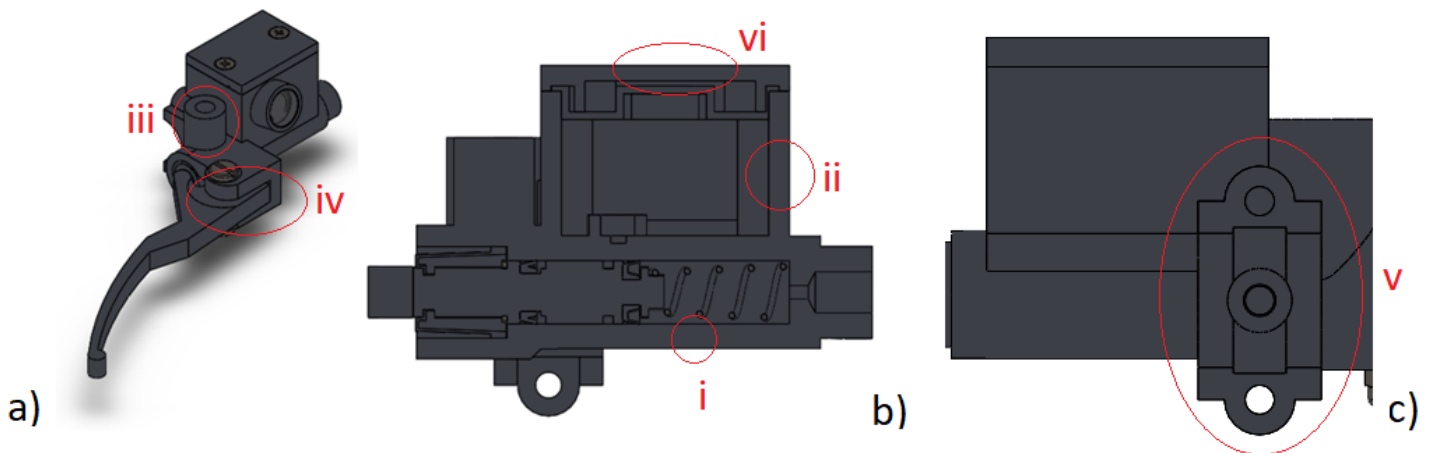


Figura 14 - Pontos Chave a alterar no Conjunto – Vista isométrica (a), vista em corte (b), vista de pormenor do suporte (c)

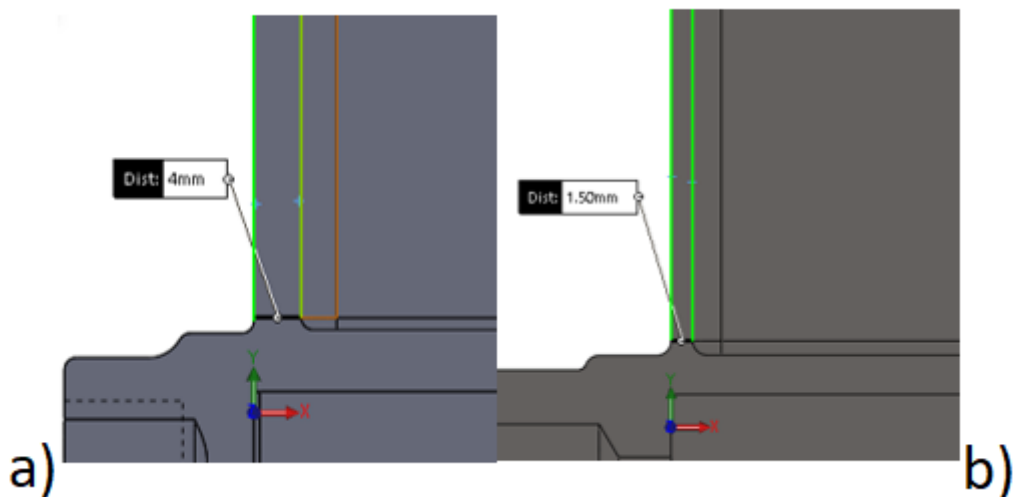


Figura 15 - Parede do reservatório original (a) e alterada (b)

Na figura 15 é possível observar a alteração da espessura do reservatório de 4 mm para 1,5 mm sem que fosse comprometido o formato da zona superior onde é colocada a tampa do reservatório e o respetivo vedante, bem como as zonas roscadas (Figura 16).

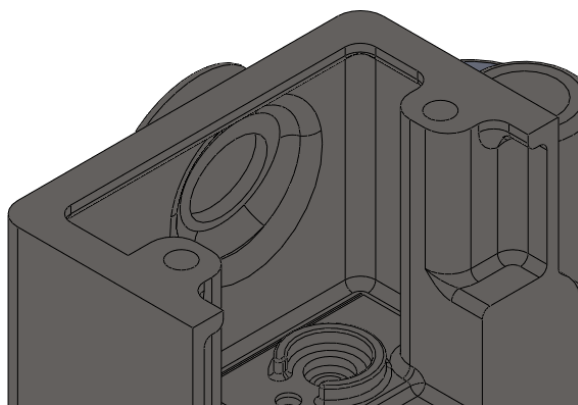


Figura 16 – Detalhe da zona superior do corpo da bomba

Como mencionado, outra das alterações principais foi a espessura do cilindro da bomba que foi reduzido de 4,70 mm para 2,70 mm (Figura 17). Esta alteração não se aproximou da relação anterior pois existem operações posteriores a serem realizadas nesta zona, quer de furação dos orifícios onde opera o fluido de travão, quer de encasquilhamento do local onde irá deslizar o pistão de travão, quer devido a operações de acabamento necessárias ou ainda quer à porosidade requerida. Assim, foi deixada uma maior espessura da parede (sobre espessura) para que durante estas operações a parede não se torne demasiado fina.

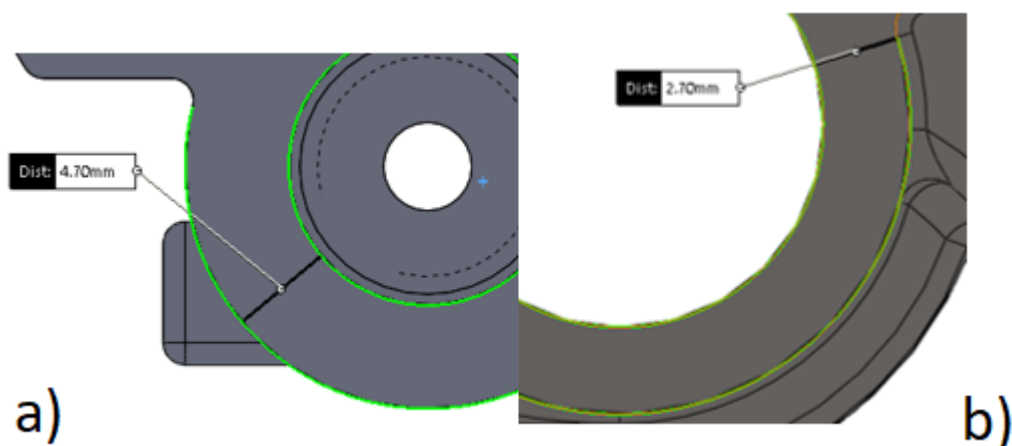


Figura 17 - Parede do cilindro original (a) e alterada (b)

Fica-se então com mais três pontos a focar no que toca às alterações realizadas no corpo da bomba de travão, os quais são o suporte de apoio ao guiador, a zona onde apoia a manete de travão e o suporte do espelho.

Nas figuras 18 e 19 é possível verificar as diversas alterações mais profundas realizadas à zona de encaixe no guia. Primeiramente temos uma redução de largura das saliências laterais de 6 mm para 3,5 mm e da largura total de 21 mm para 18 mm.

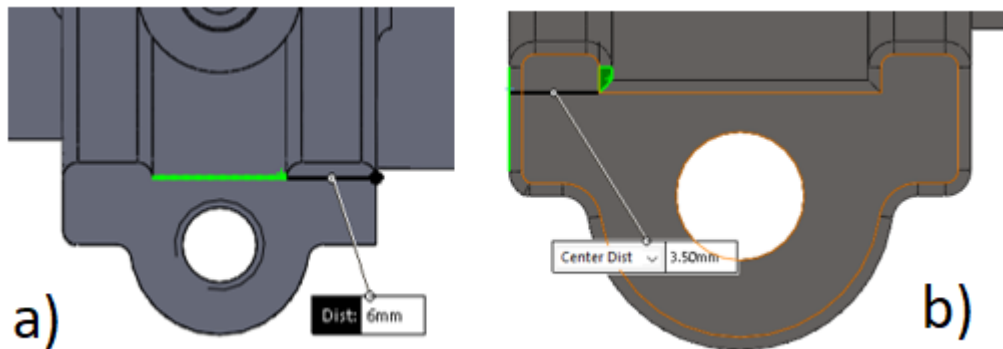


Figura 18 - Largura da parede lateral do apoio do guia original (a) e alterado (b)

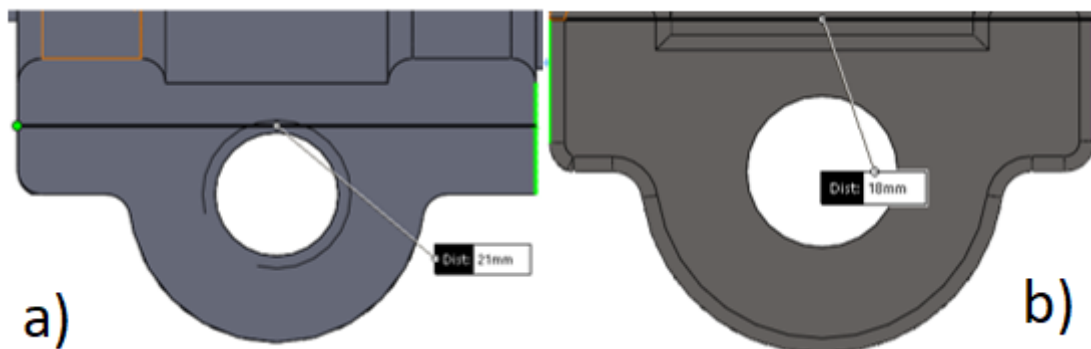


Figura 19 - Largura do apoio do guia original (a) e alterado (b)

Para além das espessuras alteradas foi também modificado o comprimento do apoio que anteriormente ia até ao suporte do espelho. Inicialmente, após a redução do diâmetro do apoio do espelho deixou-se o comprimento do apoio até meio do suporte, mas mais tarde verificou-se que seria possível a redução de material, tendo-se optado por reduzir o comprimento para 21,5 mm (Figura 20) e por adicionar uma nervura no apoio do espelho por forma a dar alguma integridade a este suporte em caso de queda (Figura 21).

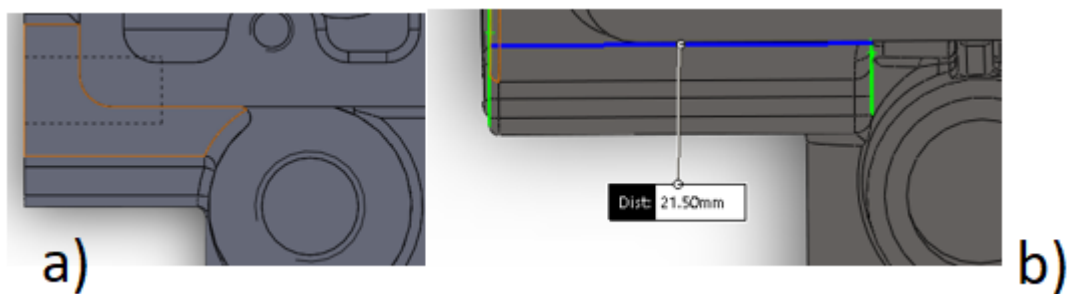


Figura 20 - Comprimento do apoio do guidador original (a) e alterado (b)

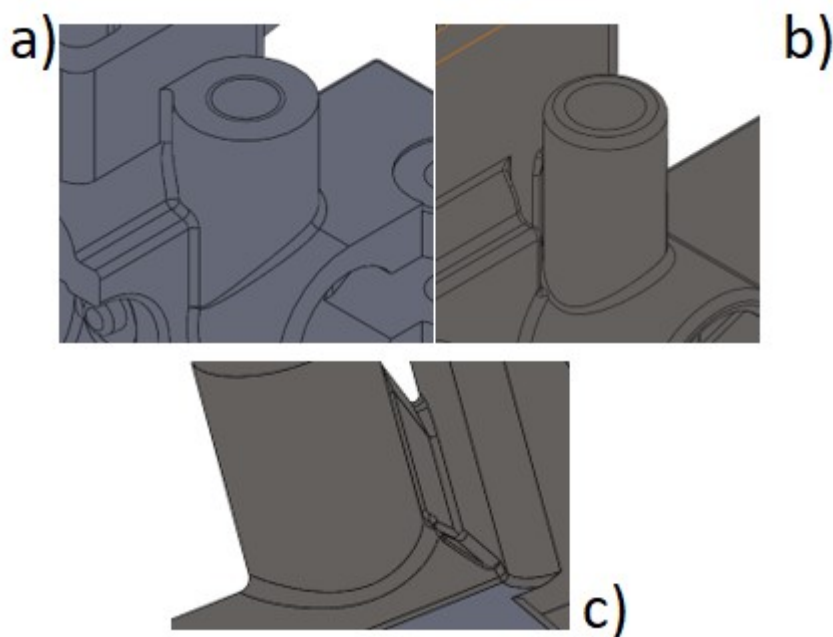


Figura 21 - Apoio do espelho original (a) e alterado (b,c)

O apoio da manete presente na figura 22 também foi alvo de alteração de espessura, tendo-se realizado uma diminuição para metade do valor de espessura inicial de 8 mm para os 4 mm finais.

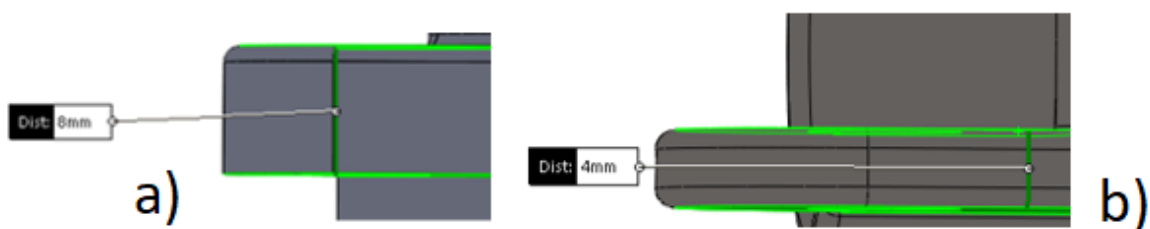


Figura 22 - Espessura do apoio da manete original (a) e alterado (b)

Por fim, no que toca ao suporte do espelho, realizou-se uma redução do diâmetro do suporte de 18,5 mm para 13 mm (Figura 23) existindo assim uma redução de massa da peça em aço para 356 g, valor ainda acima das 200 g do conjunto inicial em alumínio, mas mais razoável para a aplicação desejada, tendo-se obtido uma redução de 205 g relativamente à geometria original do componente em H13 (Tabela 2).

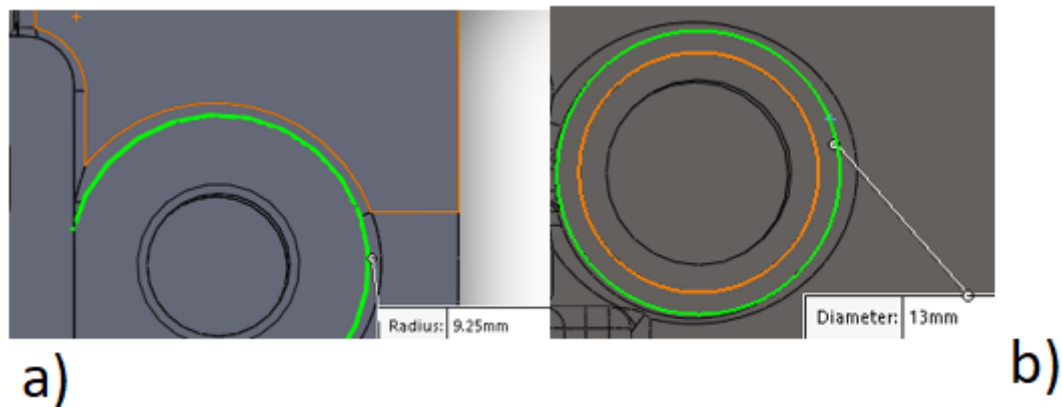


Figura 23 - Diâmetro do apoio do espelho original (a) e alterado (b)

Tabela 3 - Comparação das massas do corpo da bomba

Modelo Virtual	Massa Virtual [g]
Alumínio	201
Aço H13 (Geometria Original)	561
Aço H13 (Geometria Alterada)	356

Como também já dito anteriormente, para além dos pontos-chave abordados, existiu também a alteração de outras geometrias menos críticas e de boleados e chanfros para que a redução de peso fosse mais acentuada.

Após a análise do corpo da bomba foi realizada a alteração do outro componente a ser fabricado, ou seja, da tampa da bomba. Este componente foi alterado de forma menos acentuada e apenas com pequenas reduções de espessura, mas não de geometria (Figura 24).

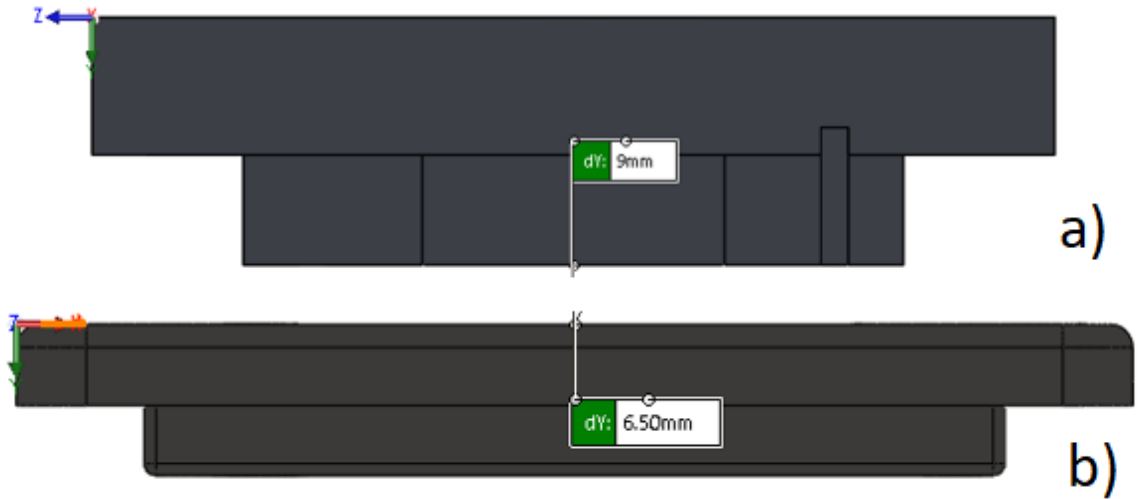


Figura 24 - Espessura da tampa da bomba original (a) e alterada (b)

Por fim obteve-se o seguinte conjunto, o qual se encontra representado na figura 25a, comparativamente com o modelo originalmente elaborado (Figura 25b). Após todas estas alterações o conjunto está então pronto para iniciar a fase de fabrico por SLM.

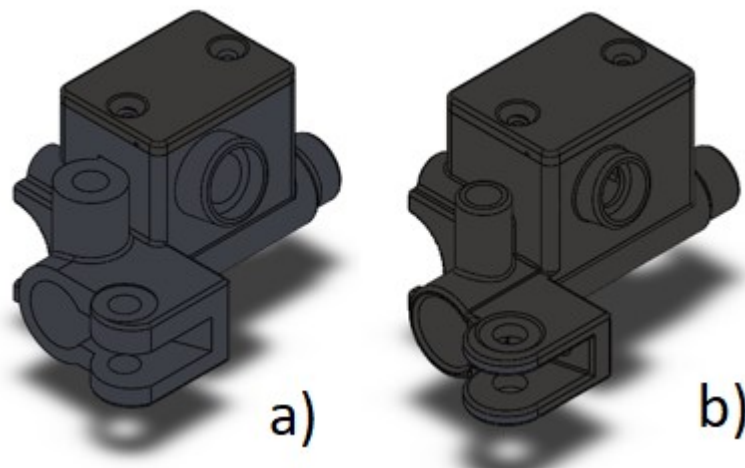


Figura 25 - Comparação do conjunto original (a) vs final (b)

4. Simulação Computacional

Após realizada a otimização geométrica dos componentes, apresentada no capítulo anterior, foi realizada uma simulação computacional do comportamento dos componentes em estudo quando sujeitos a esforços similares aqueles que estarão presentes em serviço.

Em primeiro lugar é necessário perceber quais as simulações necessárias para a bomba de travão e quais as simulações computacionais para a tampa.

Pela análise dos esforços a que habitualmente a tampa está sujeita em serviço, o componente mais simples, a tampa, está apenas sujeito à força axial dos parafusos de fixação devido ao aperto manual realizado para fixação deste e devido a ser um aperto manual é um caso que não será alvo de estudo pois o seu efeito não será significativo.

Já no caso da bomba de travão, para além de todos os apertos realizados, existe também a pressão criada pelo fluido de travagem e também as forças criadas pela manete de travão, quer em caso de travagem quer em caso de queda. Tentaram-se abordar todos os casos separadamente para que se valide ao máximo a metodologia de otimização descrita no capítulo anterior.

Pode considerar-se que as pressões atingidas dentro do reservatório são pouco significativas, atendendo ao facto do reservatório ser metálico, mesmo estando constantemente sujeito a variações de pressão devido à travagem e a um gradiente de pressões entre a parte superior do vedante (em que a pressão é a atmosférica) e a pressão abaixo deste vedante (que é inferior à de repouso em caso de travagem). Considera-se, portanto, que a pressão existente no reservatório não é suficiente para que ocorra, no mesmo, qualquer deformação. Na zona do cilindro de travagem, ao contrário do reservatório, as pressões existentes já são bem superiores, sendo necessário perceber a ordem de grandeza das pressões geradas neste tipo de sistemas de travagem e em motociclos de baixa cilindrada.

Analisando estudos já realizados para bombas de travão [18] e êmbolos de travão de motociclos de baixa cilindrada [19], bem como relacionados com o *design* de manetes de travão para motociclos [20], é possível perceber o tipo de forças envolvidas durante a travagem de um motociclo, quer na manete de travão, quer no êmbolo, sendo também possível obter valores de pressão de travagem no cilindro de travão, quer teóricos quer experimentais. Face à bibliografia consultada, pode ser tido como base para o estudo

computacional a realizar ao longo deste projeto estudos realizados para uma SYM RV 180 [18], motociclo com características técnicas e sistemas de travagem idênticos aos do motociclo do qual a bomba de travão estudada é proveniente.

Por forma a fundamentar o trabalho desenvolvido foi considerado útil a consulta da normativa britânica para testes de sistema de travagem de motociclos BS ISO 8710:2010 [21]. O ponto 7.1 da dita normativa refere o teste de sistemas de travagem em que cada sistema de travagem é controlado de forma independente e com o piso seco, mencionando nas condições do teste, em que a velocidade é 60 km/h ou $0,9 V_{\max}$, dependendo de qual for menor. Neste mesmo tópico é também mencionada uma força máxima aplicada na manete de travão de 200 N ou inferior.

Considerando então a velocidade de início de travagem de 60 km/h e analisando os resultados teóricos e experimentais presentes na figura 26 e 27, é possível perceber que a pressão máxima ronda os 70 a 75 bar, quer nos resultados experimentais quer nos teóricos, considerando-se, para efeitos de análise, a pressão máxima de 75 bar no cilindro, ou seja, 7,5 MPa [18].

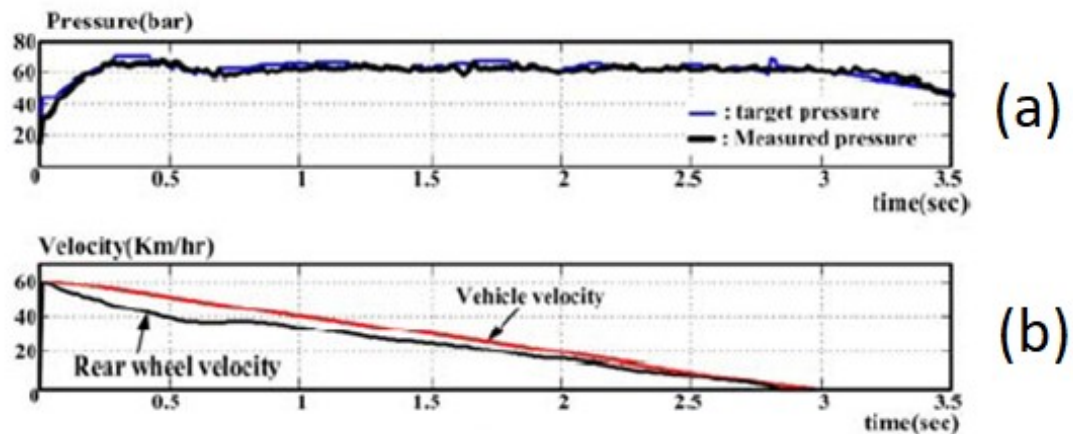


Figura 26 - Resultados simulados da pressão no sistema (a) e velocidade (b) para velocidade inicial de 60 km/h [18]

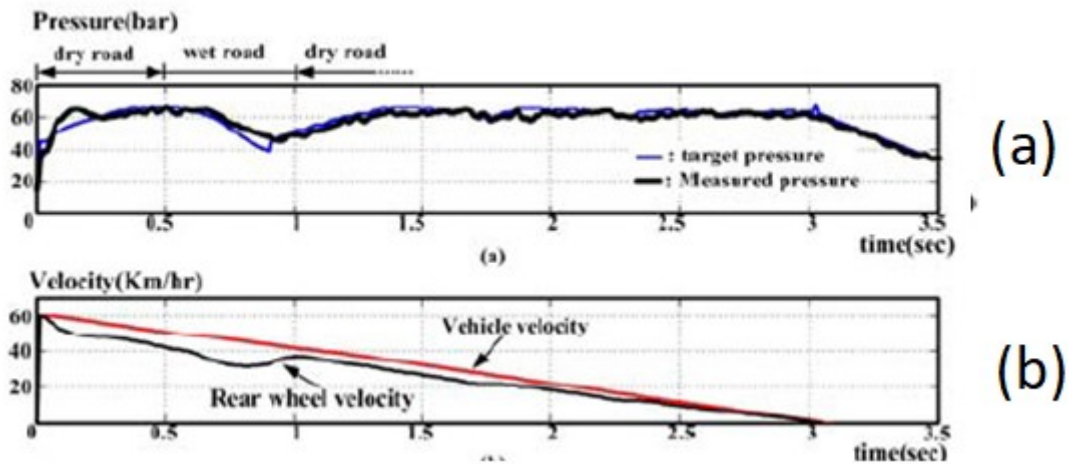


Figura 27 - Resultados experimentais da pressão no sistema (a) e da velocidade (b) de teste a 60 km/h [18]

Por forma a realizar uma análise computacional e já sabendo as condições de funcionamento da bomba, é necessário então perceber o comportamento e características mecânicas do material utilizado na produção dos componentes em questão, principalmente porque o mesmo é processado por SLM, o que altera as suas características.

Através de dados fornecidos pelo fornecedor do equipamento de SLM onde foram produzidos os componentes em questão, através de testes realizados a provetes normalizados e segundo os parâmetros sugeridos pelo mesmo para produção de componentes em H13 por SLM, é então possível obter as características mecânicas e de composição do material (Figura 28).

Mechanical data ¹	Formula symbol and unit	As-built ²	Heat-treated ²
Tensile strength	R_m [MPa]	1375	1775
Offset yield strength	$R_{p0,2}$ [MPa]	1245	1590
Elongation at break	A [%]	2	7
Reduction in area	Z [%]	5	15
Young's modulus	E [GPa]	210	255
Vickers hardness	HV10	-	-
Roughness average	Ra [μm]	-	-
Mean roughness depth	Rz [μm]	-	-

Material characteristics

- High tensile strength
- Moderate corrosion resistance
- Resistant to thermal fatigue cracking

Typical application areas

- Injection moulding
- Tooling

Figura 28 - Propriedades Mecânicas H13 produzido por SLM [22]

4.1. Parâmetros de Simulação

Após realizada a pesquisa acerca das propriedades mecânicas do material a ser utilizado para a produção (Figura 28) e do material da bomba original (Tabela 2) procedeu-se à configuração do material a utilizar nas diversas simulações no *software Ansys*.

Realizada a configuração dos materiais das bombas de travão foram então importados ambos os modelos para o *software* (modelo original em alumínio e modelo produzido por SLM) para que fossem criadas as malhas de elementos finitos para os estudos a realizar sendo que foram tidas em conta zonas críticas como arestas para que a malha fosse mais refinada nesses locais, tendo-se realizado uma transição gradual entre os elementos maiores e os elementos de reduzida dimensão para que não existissem alterações drásticas da malha (Figura 29).

Com a criação das mesmas passou-se à definição dos carregamentos para a realização dos estudos computacionais.

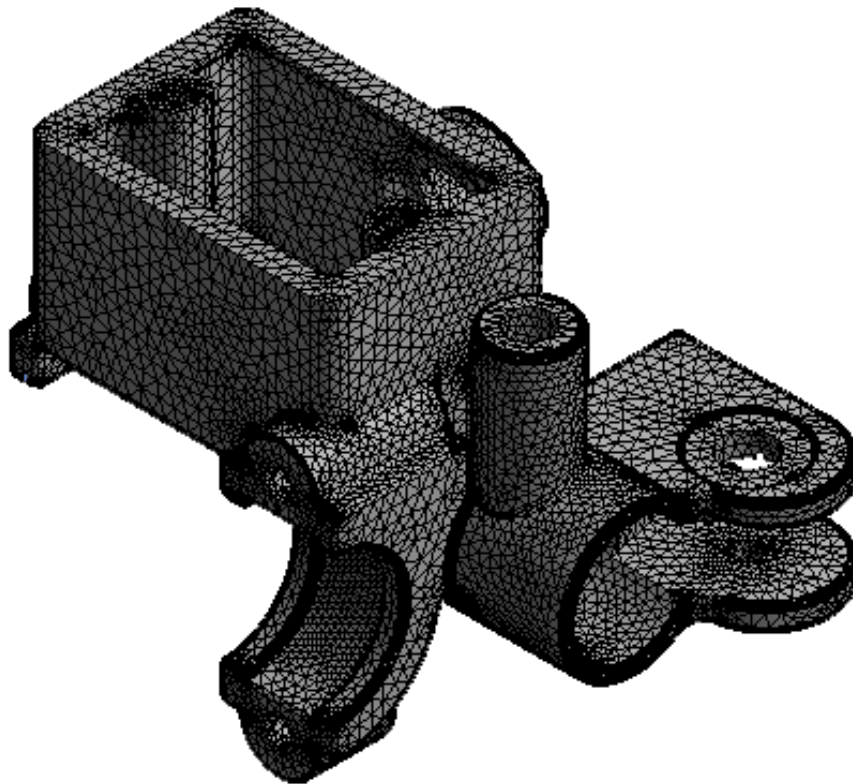


Figura 29 - Malha de elementos finitos - Bomba em Aço H13

4.1.1. Estudo 1 – Pressão no cilindro e reações no apoio da manete de travão

Por forma a realizar um estudo acerca do comportamento mecânico da bomba devido à pressão existente no cilindro em caso de travagem, que possui um valor de 75 bar [18], e devido às forças de reação existentes na zona de suporte da manete de travão devido à travagem, foi então necessário proceder à realização de um diagrama de forças presentes no corpo da bomba (Figura 30).

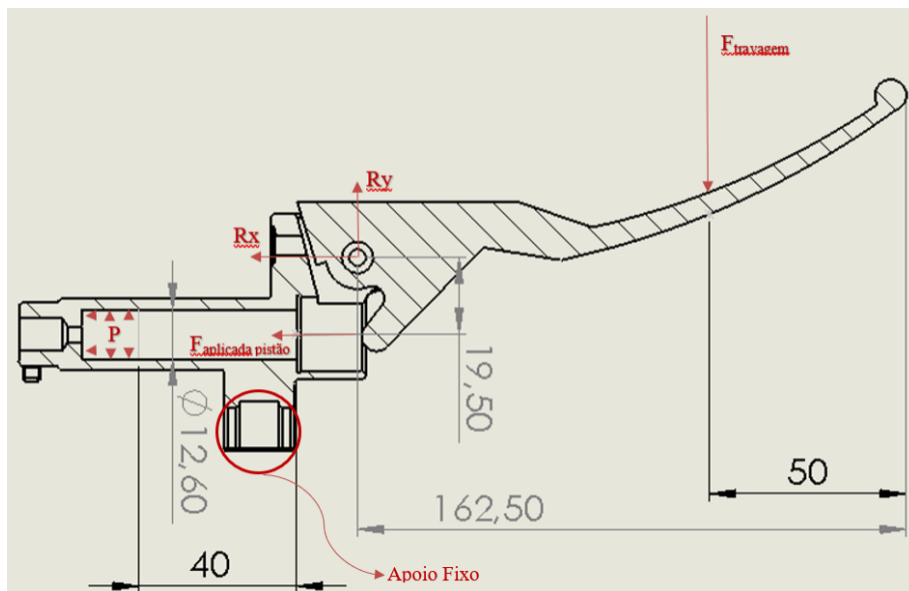


Figura 30 - Diagrama de Corpo Livre

Considerando, como mencionado anteriormente, que a pressão P criada (Figura 30) no sistema de travagem é de 75 bar, ou seja, 7,5 MPa, é possível então calcular a força que será aplicada no êmbolo ($F_{\text{aplicada pistão}}$) e conseqüentemente saber a que será exercida na manete (F_{travagem}) com ponto de aplicação a 50 mm da extremidade desta [21].

Primeiramente é necessário proceder ao cálculo da área do êmbolo,

$$A_{\hat{e}mbolo} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 0,0126^2}{4} = 1,247 \times 10^{-4} m^2 \quad (5)$$

Sendo possível agora calcular o valor de $F_{\text{aplicada pistão}}$,

$$P = \frac{F_{\text{aplicada pistão}}}{A_{\hat{e}mbolo}} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow F_{\text{aplicada pistão}} = A_{\hat{e}mbolo} \times P = 1,247 \times 10^{-4} \times 7,5 \times 10^6 \cong 935 N \quad (6)$$

Por forma a calcular a força necessária a ser aplicada na manete (F_{travagem}) calculou-se a relação entre a força aplicada na manete e a força aplicada no pistão,

$$\text{Relação de } F = \frac{112,5}{19,5} = 5,77 \quad (7)$$

Procedendo-se ao cálculo de F_{travagem} ,

$$F_{\text{travagem}} = \frac{935}{5,77} = 162,05 N \quad (8)$$

Sabendo então tanto F_{travagem} como $F_{\text{aplicada pistão}}$ é possível saber as forças de reação aplicadas na zona de suporte da manete R_x e R_y pois estas serão apenas geradas pelas anteriores, sendo apenas necessário que se divida estas forças pelo apoio superior e pelo apoio inferior de forma equitativa para que se possam aplicar no estudo computacional.

$$R_x = \frac{935}{2} = 467,5 N \quad (9)$$

$$R_y = \frac{162,05}{2} = 81,03 N \quad (10)$$

Após o cálculo analítico das forças aplicadas, realizou-se a importação das geometrias analisadas para o *software* para proceder à criação de uma malha de elementos finitos, sendo que foram tidas em conta zonas críticas como arestas para que a malha fosse mais refinada nesses locais, tendo-se realizado uma transição gradual entre os elementos maiores e os elementos de reduzida dimensão para que não existissem alterações drásticas da malha.

Tendo calculado todas as forças aplicadas pode-se então proceder à configuração das condições de fronteira (Figuras 31 e 32) no *software* para a bomba original em alumínio que e para a bomba produzida em aço H13. Considerou-se que, em ambos os casos, a zona do suporte seria tratada como um suporte fixo pois esta zona de apoio ao guiador é sujeita a um aperto que impede a movimentação geral da bomba.

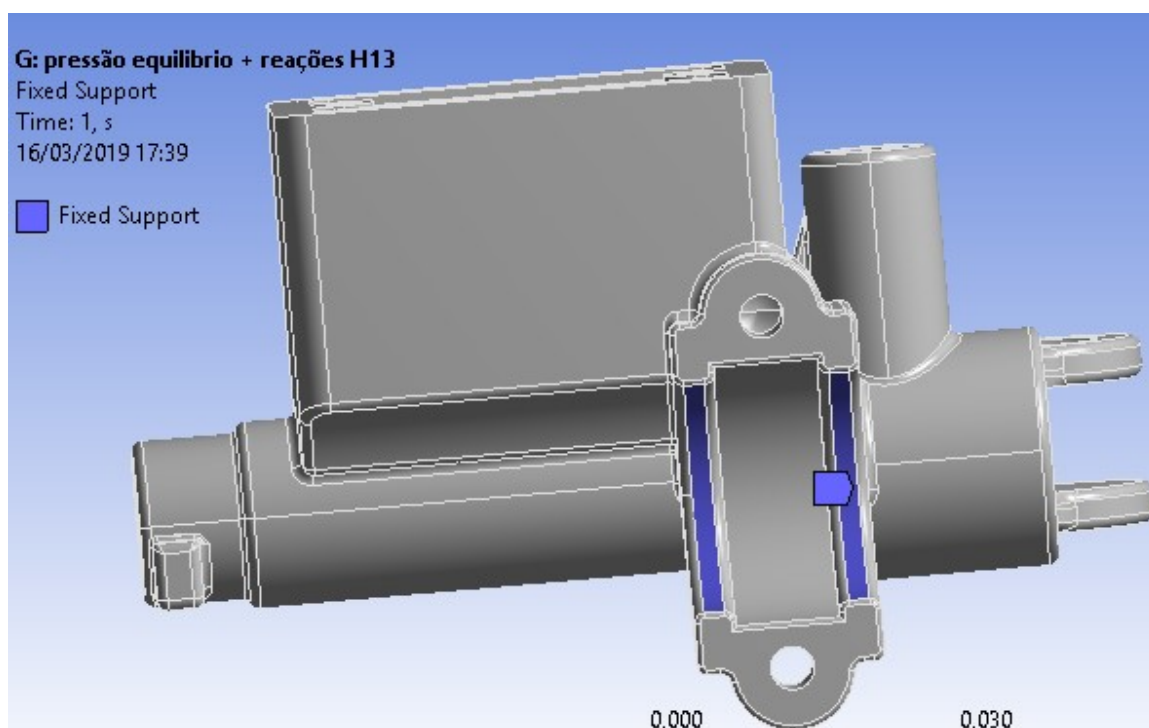


Figura 31 - Condições de fronteira - Bomba alterada em Aço H13

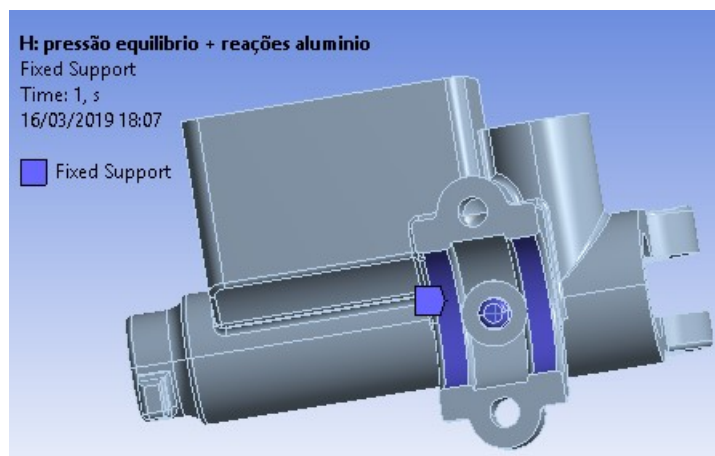


Figura 32 - Condições de fronteira - Bomba original em Alumínio

Após a configuração das condições de fronteira procedeu-se à aplicação das pressões e forças aplicadas nos devidos locais. A pressão P aplicou-se apenas a partir da zona de ação do vedante que cria pressão no óleo no momento de pressão máxima no reservatório, ou seja, quando este se encontra a 40 mm da superfície de entrada do êmbolo (Figura 30). A pressão foi então aplicada em direção normal às paredes laterais do cilindro e também na parede inferior do cilindro, perpendicular a estas (Figura 33).

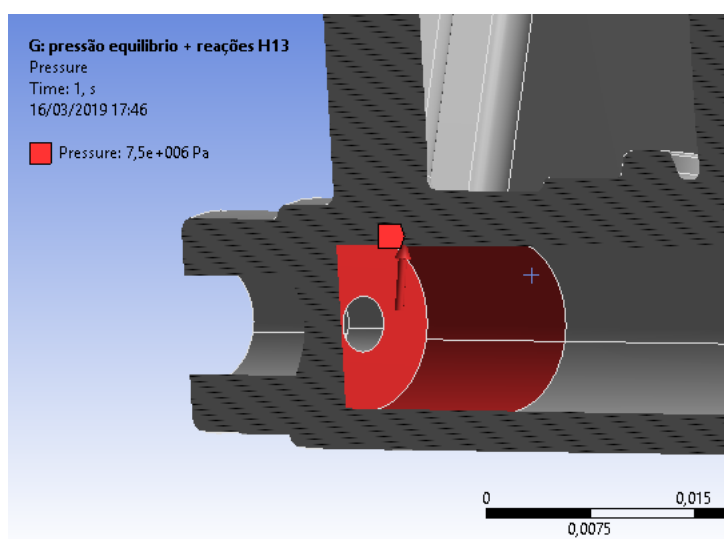


Figura 33 - Pressão do fluido de travagem

A pressão aplicada no fundo do cilindro gera uma força de reação de 840,91 N (Figura 34) no apoio do guidador que na realidade é inexistente pois, o sistema, é mantido em equilíbrio pela força oposta exercida no êmbolo de travagem. Como este não está considerado na análise foi necessário aplicar uma força externa na direção X para equilibrar o sistema (Figura 35).

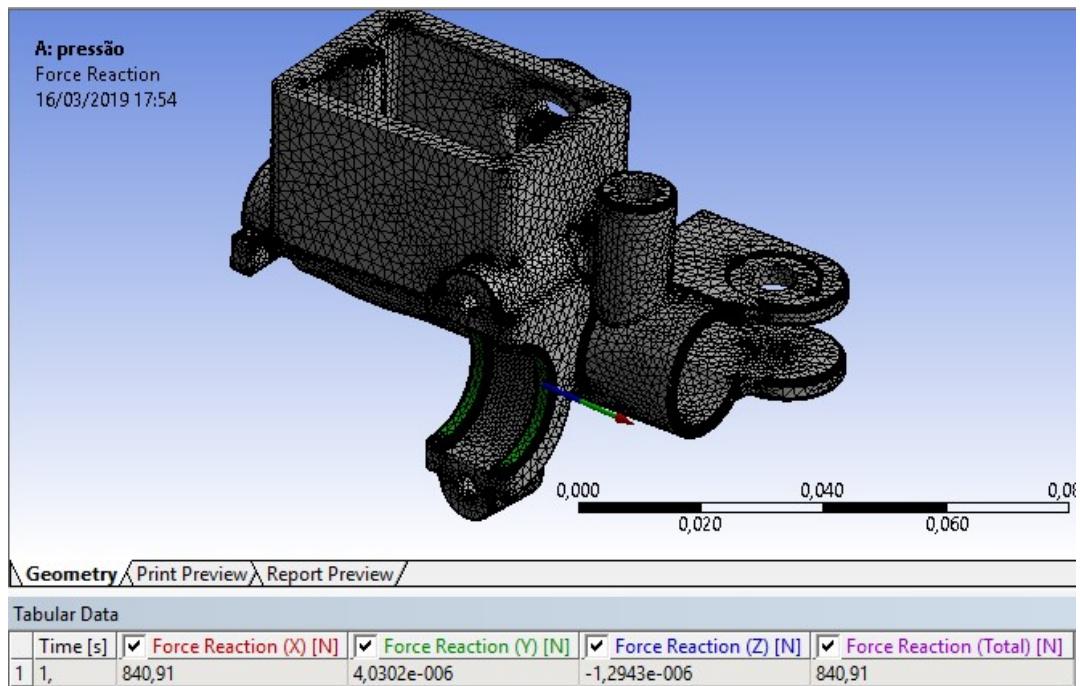


Figura 34 - Forças de Reação no apoio do guidador

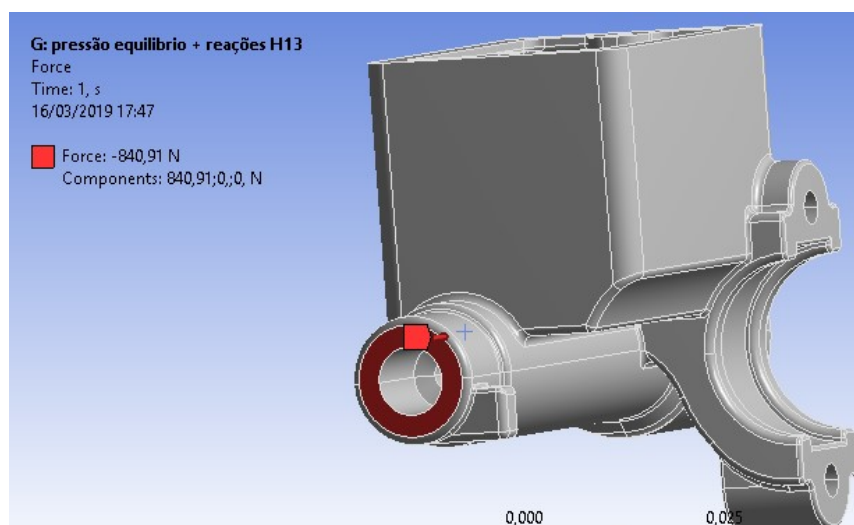


Figura 35 - Força externa para equilíbrio do conjunto

Por forma a finalizar a aplicação das cargas foram apenas aplicadas as reações nos furos dos apoios superiores e inferiores da manete de travão (Figura 36), desprezando a força que a manete iria realizar também na parede do apoio inferior pois não é significativa.

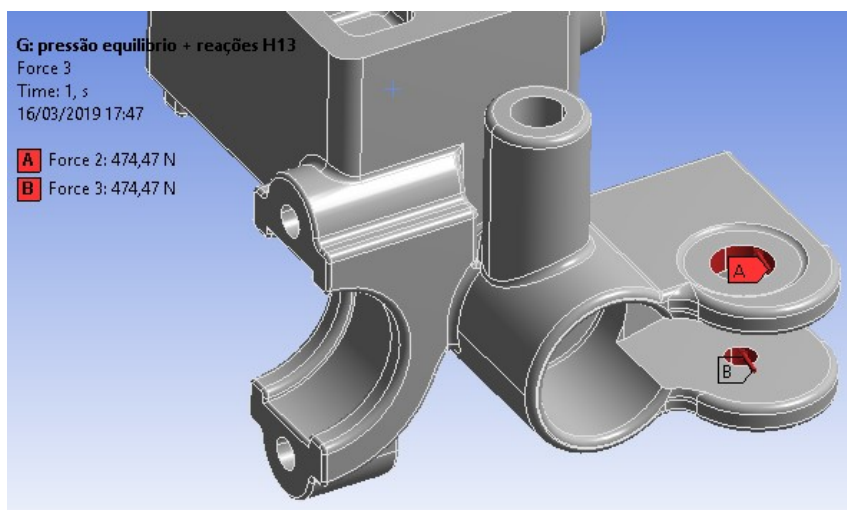


Figura 36 - Forças de reação nos apoios da manete de travão

4.1.1.1. Análise de resultados

Concluída a parametrização do estudo procedeu-se então à análise dos resultados. Observando os valores máximos de tensão equivalente de *von-Mises* para ambos os casos e os gráficos de tensões (Figuras 37 e 38), conclui-se que as zonas de tensão máxima e mínima são idênticas, situando-se na zona de apoio do guiador.

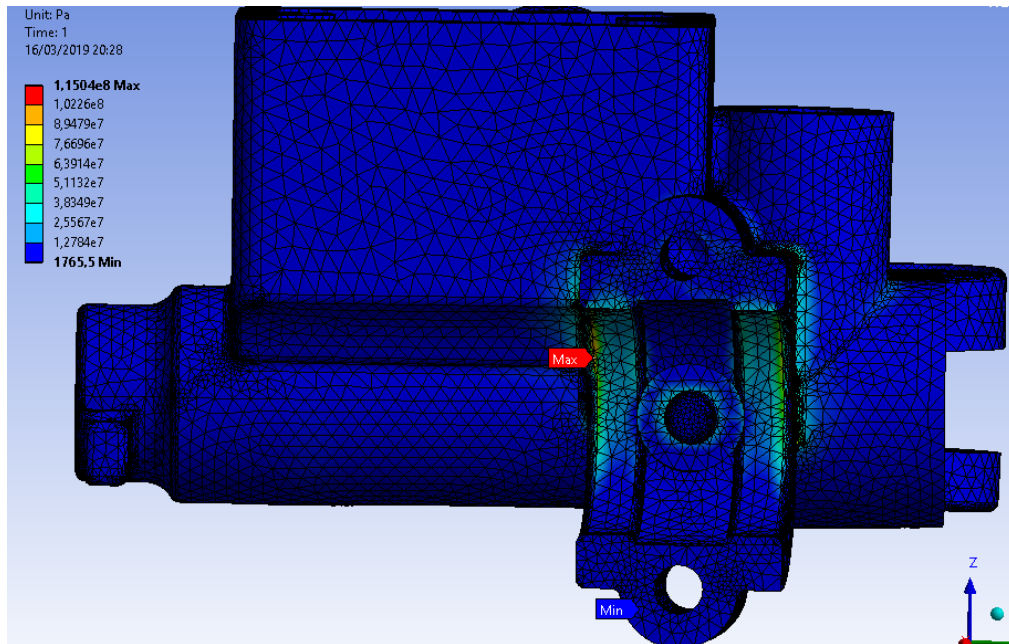


Figura 37 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises - Bomba Original

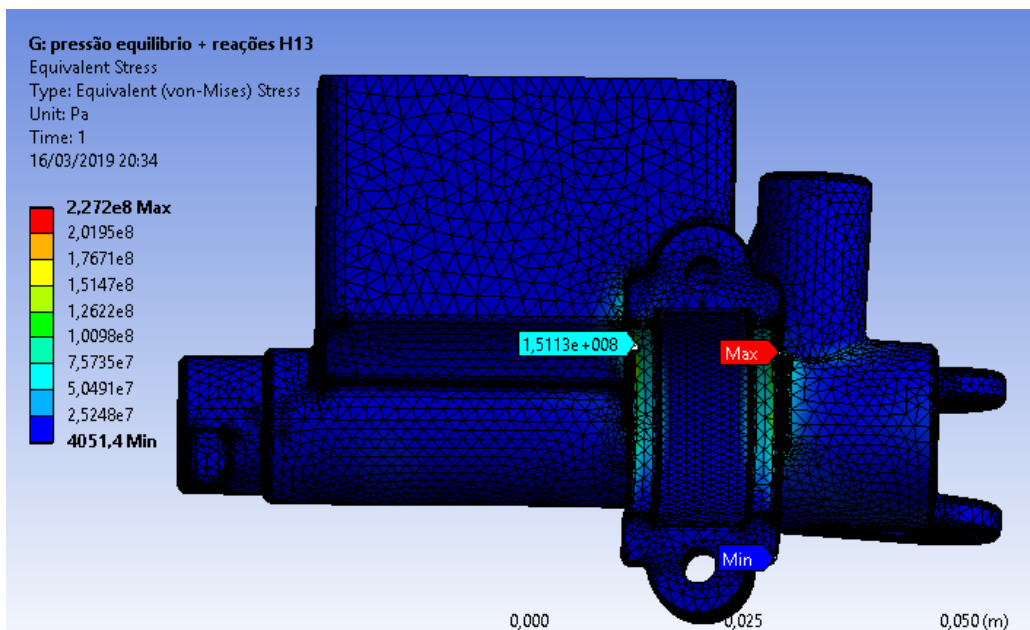


Figura 38 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises - Bomba Alterada

Os valores são comparáveis para as zonas de apoio, mas existe uma zona de acumulação de tensões no apoio alterado do guiador na zona do espelho (Figura 39), sendo onde se atinge a tensão máxima do estudo em questão. Sendo os valores comparáveis e tendo o aço uma tensão admissível 4,25 vezes superior, como calculado na equação 3, é possível

concluir que seria possível realizar uma melhor otimização do componente no sentido de reduzir ainda mais a sua massa em determinadas zonas, segundo este estudo.

A zona de tensão máxima na bomba alterada também seria possível de solucionar através da alteração desta zona, quer através de um boleado de maior raio ou através de uma geometria de união desta zona ao apoio do espelho.

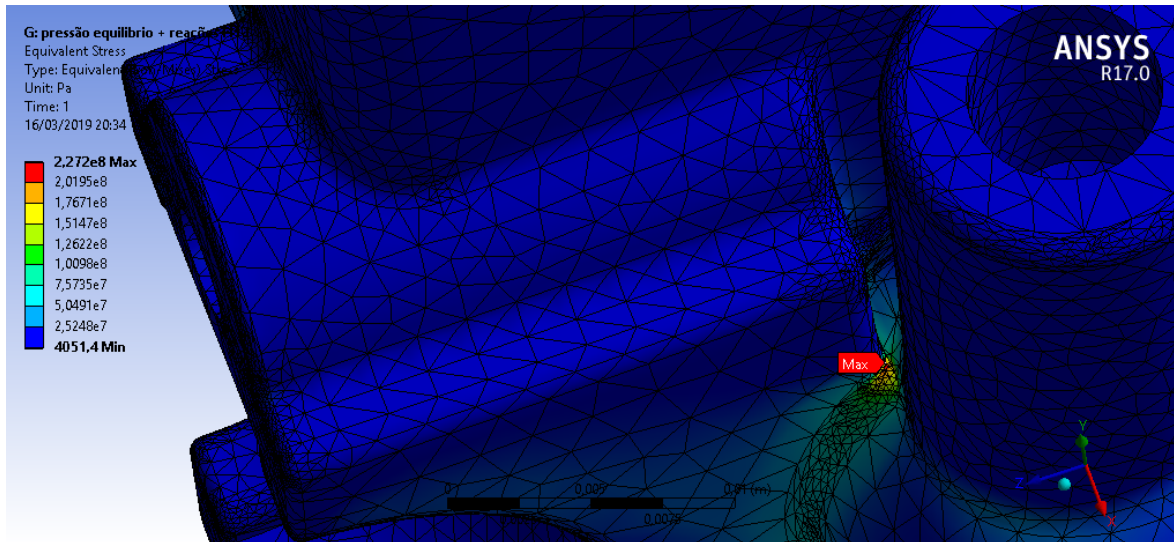


Figura 39 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises - Bomba Original (Ponto de tensão máxima)

Analisando a figura 40 relativo ao coeficiente de segurança do componente original tendo a bomba original sido estudada pelo seu fabricante, é possível compreender que o coeficiente de segurança de 2,43 seria um bom ponto de partida como valor alvo para a bomba alterada.

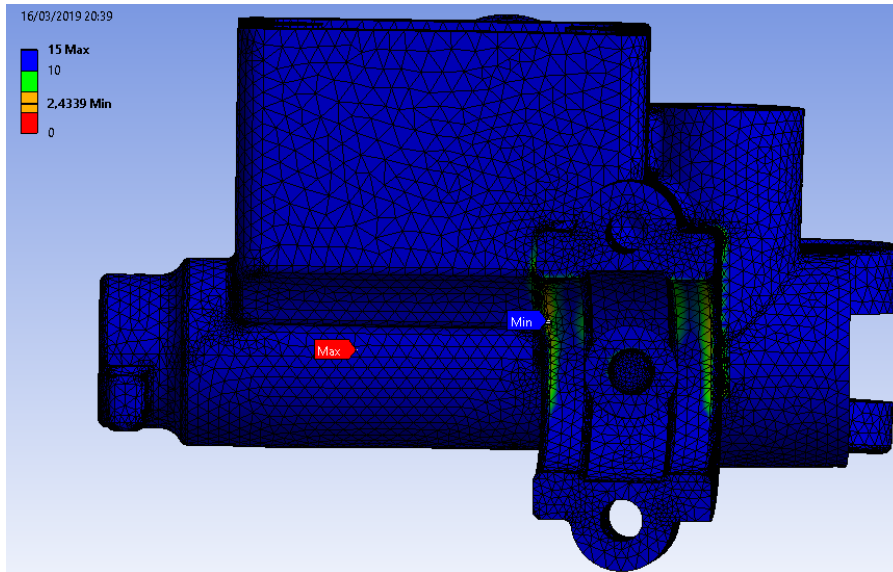


Figura 40 - Gráfico de Coeficiente de Segurança - Bomba Original

Sendo o valor do coeficiente de segurança da bomba original em alumínio de 2,43 como já mencionado, é possível comparar este valor com o da bomba alterada, sendo que para a mesma zona o coeficiente de segurança é de 7,94, sugerindo que poderia ter existido uma melhor otimização do modelo em determinadas zonas para que o coeficiente de segurança reduzisse para aproximadamente 2,5. No caso da zona de tensão máxima existe um coeficiente de segurança de 5,48, estando também a zona em segurança e dentro da zona de deformação elástica do material.

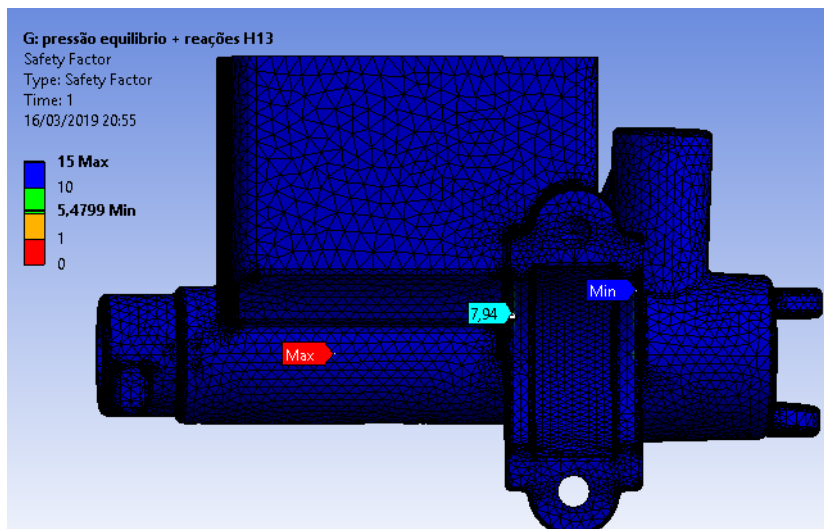
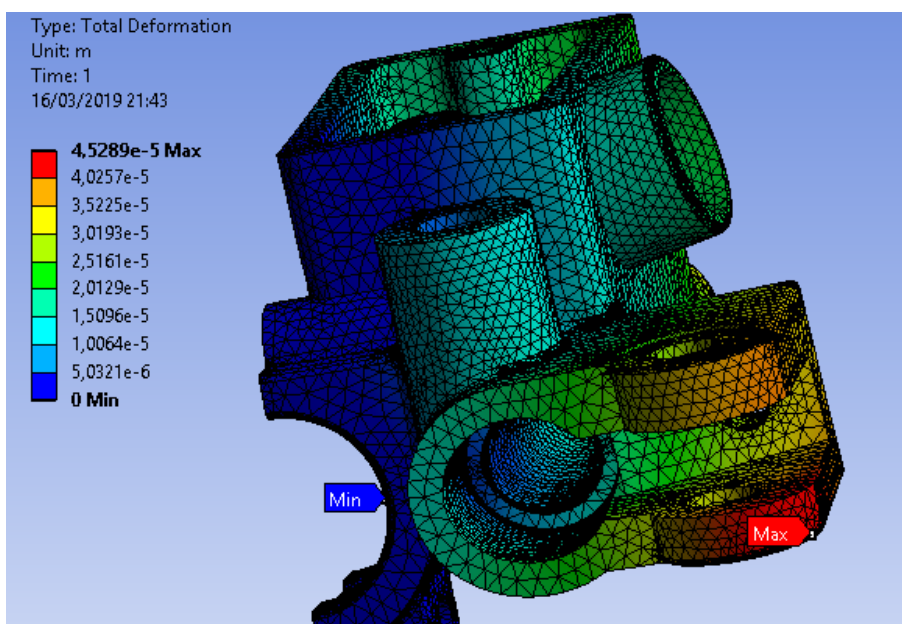


Figura 41 - Gráfico de Coeficiente de Segurança - Bomba Alterada

Por fim, e comparando apenas os valores de deformação máxima obtida para ambos os componentes, é possível de verificar que as zonas de deformação máxima se encontram no mesmo local em ambos, na zona do suporte inferior da manete de travão. Os valores observados estão na ordem das centésimas de milímetro, como seria de esperar, pois as cargas aplicadas possuem valores reduzidos e as tensões equivalentes encontram-se muito abaixo das tensões admissíveis para ambos os materiais (Figura 42 e 43).



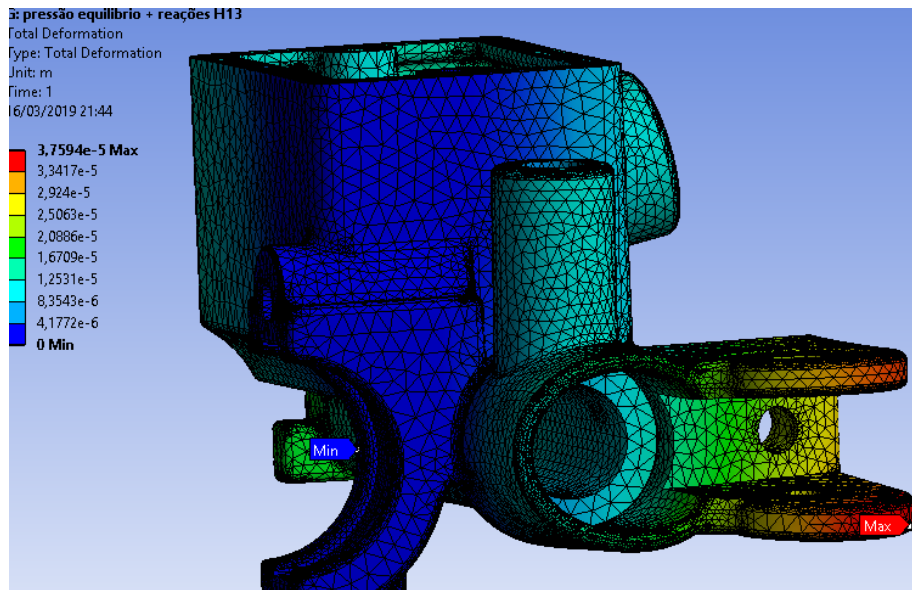


Figura 43 - Gráfico de deformação - Bomba Alterada

De forma resumida é possível observar na tabela 4 os valores previamente analisados para ambos os componentes.

Tabela 4 - Resultados do estudo

	Aço H13	Alumínio	Rácio	Rácio ótimo
Tensão zona de apoio do guiador	151,13 MPa	115,04 MPa	1,31	4,25
Tensão máxima	227,2 MPa	115,04 MPa	1,97	4,25
Coefficiente de segurança mínimo	5,48	2,43	2,25	1
Deformação máxima	0,038 mm	0,045 mm	0,84	1

Pode-se concluir que seria possível realizar uma melhor otimização do componente, tendo sempre em consideração os valores de referência da bomba original, para que fosse possível uma maior redução de massa do conjunto, tempo de processamento e material utilizado, levando a que os custos totais de produção também fossem minimizados.

4.1.2. Estudo 2 – Queda lateral estacionária

Após realizar o estudo anterior procedeu-se a uma tentativa de simplificação e estudo de um caso de queda lateral com veículo estacionário.

Em primeiro lugar foi realizada uma pesquisa bibliográfica acerca das principais características do motociclo do qual a bomba de travão é originária, através da consulta do manual de serviço [23].

Na figura 44 estão presentes as principais características da Vespa GT 200, sendo que os valores a reter para análise serão a altura máxima de 1170 mm e o peso máximo permitido de 332 kg. Para questões de análise e visto ser um caso de queda com o veículo estacionário foi deduzida a massa de dois ocupantes de 75 kg, obtendo-se um valor de 182 kg.



Specification	Desc./Quantity
Kerb weight	158 ± 5 kg
Maximum weight allowed	332 kg
Maximum height	1170 mm
Overall width	755 mm
Maximum length	1930 mm
Wheelbase	1370 mm

Figura 44 - Vespa GT 200 - Dimensões Gerais e Massa [23]

Considerando estes valores e atentando nas equações da energia potencial e energia cinética bem como na Lei de conservação de energia, é possível calcular a velocidade final do motociclo na altura do impacto com o solo.

Para um cálculo mais preciso seria necessário encontrar o centro de massa do veículo através de medições no eixo frontal e traseiro.

No caso estudado a carga encontra-se majorada, pelo facto de ser considerado que todo o veículo se encontra em queda desde a altura da manete de travão.

Considerando que o motociclo se encontra em estado estacionário,

Velocidade inicial ($v_{inicial}$) = 0

Altura final (h_f) = 0

Altura inicial (h_i) = 1170 – 70 = 1100 mm, sendo os 70 mm a distância vertical entre o topo da ótica e o nível da manete de travão.

Logo, a energia potencial final e a energia cinética inicial serão nulas,

$$E_{p \text{ inicial}} = E_{c \text{ final}} \leftrightarrow \quad (11)$$

$$\leftrightarrow m g h_i = \frac{1}{2} m v_f^2 \leftrightarrow v_f = \sqrt{2gh_i} \leftrightarrow v_f = 4,645 \text{ m/s}$$

No caso de um acidente ou impacto, o trabalho realizado pode ser equiparado ao trabalho realizado por uma mola com uma constante k . Sabe-se também que o que irá realizar trabalho no momento do impacto será a energia cinética do motociclo (equação 12) tendo-se então que,

$$W_{mola} = E_{c \text{ final}} \leftrightarrow \quad (12)$$

$$\frac{1}{2} F_{max} s = \frac{1}{2} m v_f^2 \leftrightarrow F_{max} = \frac{m v_f^2}{s}$$

Em que s será a deformação no momento do impacto que se considera como tendo um valor a rondar os 0,04 m, por medição da deformação da carenagem traseira deste modelo de motociclos em casos de queda lateral estacionária, fornecido pela Lombas e Curvas, Lda. Através deste valor obteve-se então a força máxima no momento do impacto,

$$F_{max} = \frac{m v_f^2}{s} \leftrightarrow \quad (13)$$

$$\Leftrightarrow F_{max} = \frac{182 \times 4,645^2}{0,04} = 98171 \text{ N}$$

Esta força máxima será aplicada em toda a lateral do motociclo sendo que, por forma a distribuir esta força por toda a lateral traseira do veículo, lateral inferior do estrado e lateral frontal, carenagem do guiador, guiador e manete de travão considerou-se que a força aplicada na manete representará no máximo apenas 3% da força total devido à sua reduzida área. Com a consideração anterior obtém-se uma força na manete de travão de 2945,13 N.

Esta força pode ser considerada como uma força resultante, sendo que no momento do impacto do motociclo com o solo existe uma força de compressão na manete e uma força perpendicular a esta que gera um momento em torno do apoio da mesma.

Considerando que as forças terão a mesma intensidade para simplificação do estudo, obtém-se uma força de compressão de 2082,52 N e uma força perpendicular com a mesma magnitude.

Como mencionado anteriormente, esta força perpendicular à manete de travão irá gerar um momento em torno do apoio da manete de travão no sentido inverso aos ponteiros do relógio, sendo possível calcular o seu valor utilizando o comprimento da manete de travão e o valor da deformação no caso do impacto, sendo este de 40 mm. Tendo este valor em consideração e sabendo que comprimento da manete é de 162,5 mm, tem-se então um braço de forças de 122,5 mm, obtendo-se um momento de 255,10 Nm.

Por forma a completar a determinação das forças envolvidas realizou-se apenas a divisão equitativa da força de compressão na manete por ambos os apoios do parafuso de fixação da manete de travão, tendo um valor de 1041,26 N.

Finalizado o cálculo das forças procedeu-se à configuração do estudo em questão no *software Ansys*, tendo-se mantido as geometrias, as malhas de elementos finitos e as condições de fronteira.

Por forma a realizar o estudo foram aplicadas as forças de 1041,26 N nas superfícies de encaixe do parafuso de fixação da manete e um momento de 255,10 Nm no apoio da manete, quer no elemento superior quer no inferior (Figura 45).

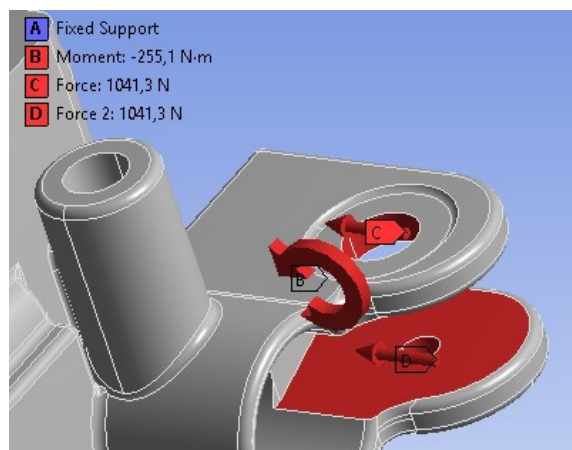


Figura 45 - Carregamento do 2º Estudo

4.1.2.1. Análise de resultados

Observando em primeiro lugar a deformação dos componentes em alumínio e aço é perceptível que a maior deformação ocorrerá na zona do suporte do guiador, estando coerente com o que se verifica na realidade e na mesma ordem de grandeza, de 1 mm.

A diferença no que toca à deformação entre ambos os componentes é devida à diminuição de espessura do suporte, sendo que no de aço ambas as zonas possuem a mesma espessura (Figura 46) contrariamente ao de alumínio em que a espessura é superior no suporte superior relativamente ao inferior (Figura 47). Tal poderá ser justificado pelo facto de o fabricante querer precaver desde logo as situações de queda para que não exista quebra do apoio superior, que na realidade será aquele sujeito ao maior esforço.

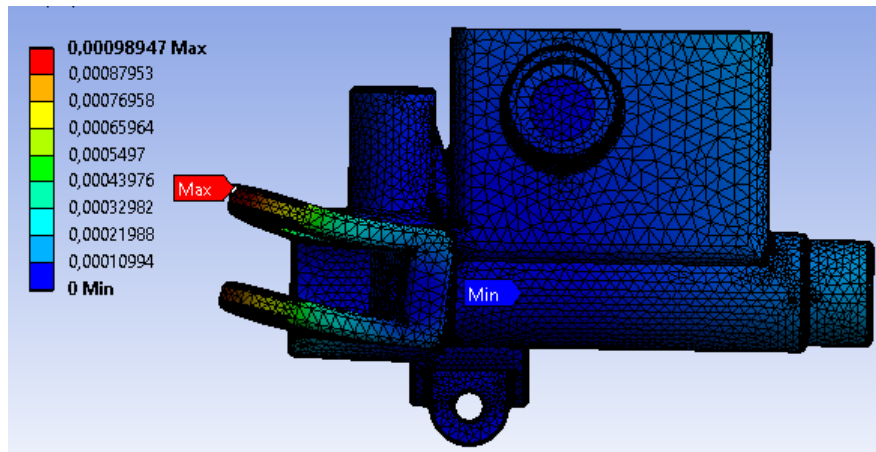


Figura 466 - Deformação em caso de queda da bomba em Aço H13

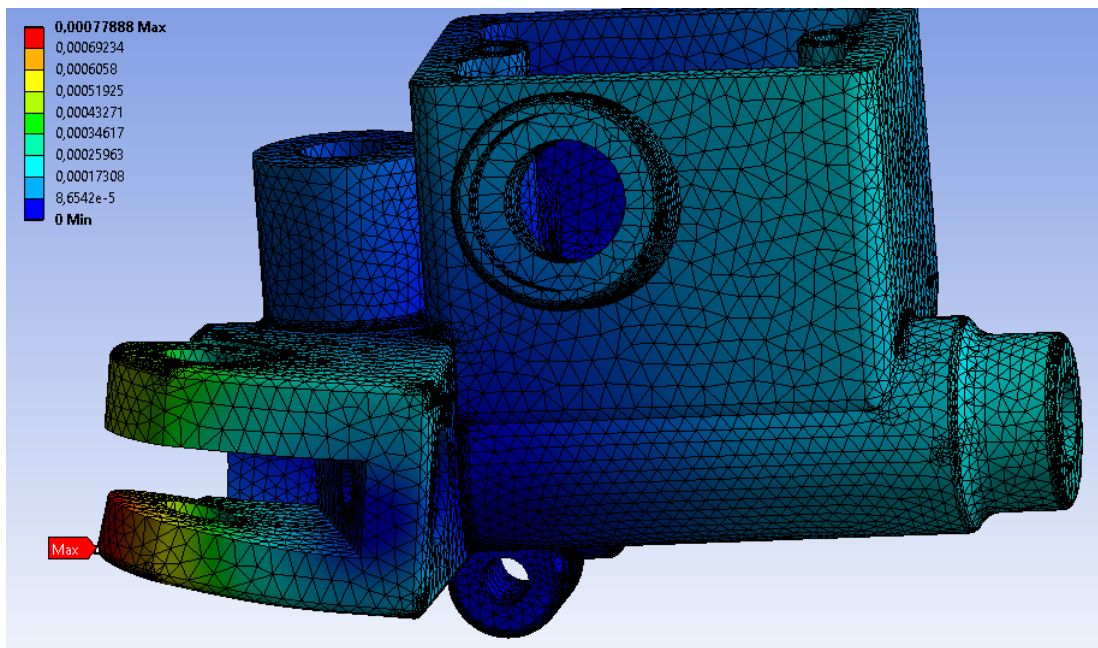


Figura 47 - Deformação em caso de queda da bomba em Alumínio

Observando agora os resultados referentes à tensão equivalente de *von-Mises* para ambos os casos, são verificadas algumas diferenças no que toca à localização da zona de tensão máxima.

A diferença deve-se ao facto de ter existido uma alteração de geometria e de ter sido colocado um reforço na zona de apoio do espelho em caso de queda, sendo aí a zona de tensão máxima na bomba em aço (Figura 48).

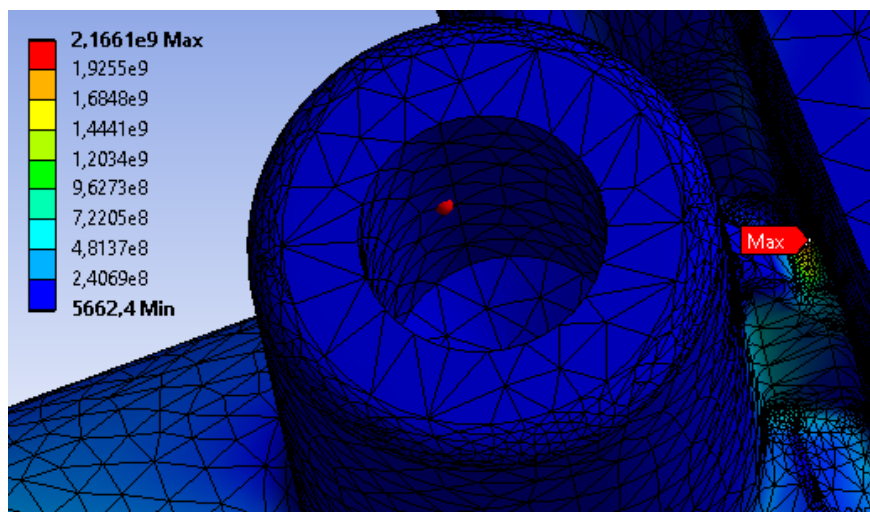


Figura 48 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises - Bomba Alterada (Ponto de tensão máxima)

Em termos de tensões nas restantes zonas dos componentes observa-se um comportamento idêntico e coerente com o estudo em questão.

Analisando os valores de tensão máxima dos componentes é possível verificar que em ambos os casos a tensão máxima é superior à tensão limite de cedência, saindo-se fora da zona de deformação elástica e entrando-se então em deformação plástica e definitiva, sendo também o que se observa em casos experimentais e análises de sinistros deste tipo, segundo a Lombas e Curvas, Lda. e segundo observação dos componentes em estudo em casos reais.

Nestes casos não chega a existir uma rutura do material, mas sim uma ligeira deformação na zona do suporte da manete, quase impercetível e usualmente na ordem de 1 mm ou inferior, como se verifica no estudo em questão.

Nas figuras 49 e 50 é possível observar os gráficos de tensão equivalente de *von-Mises*, sendo perceptíveis diferenças na distribuição de tensões devido às alterações de geometria realizadas.

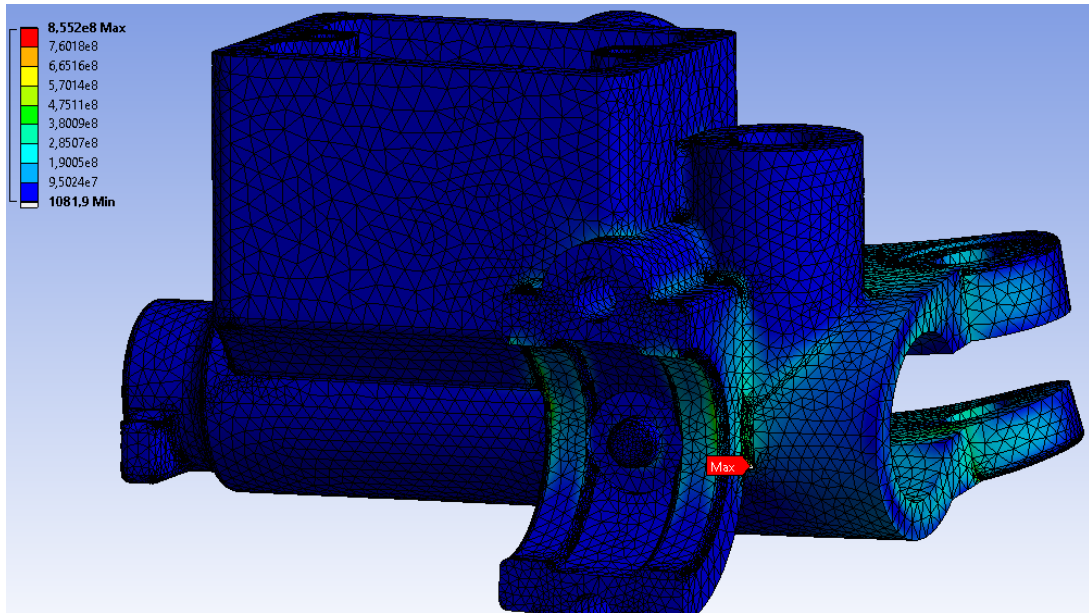


Figura 49 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises em caso de queda- Bomba Original

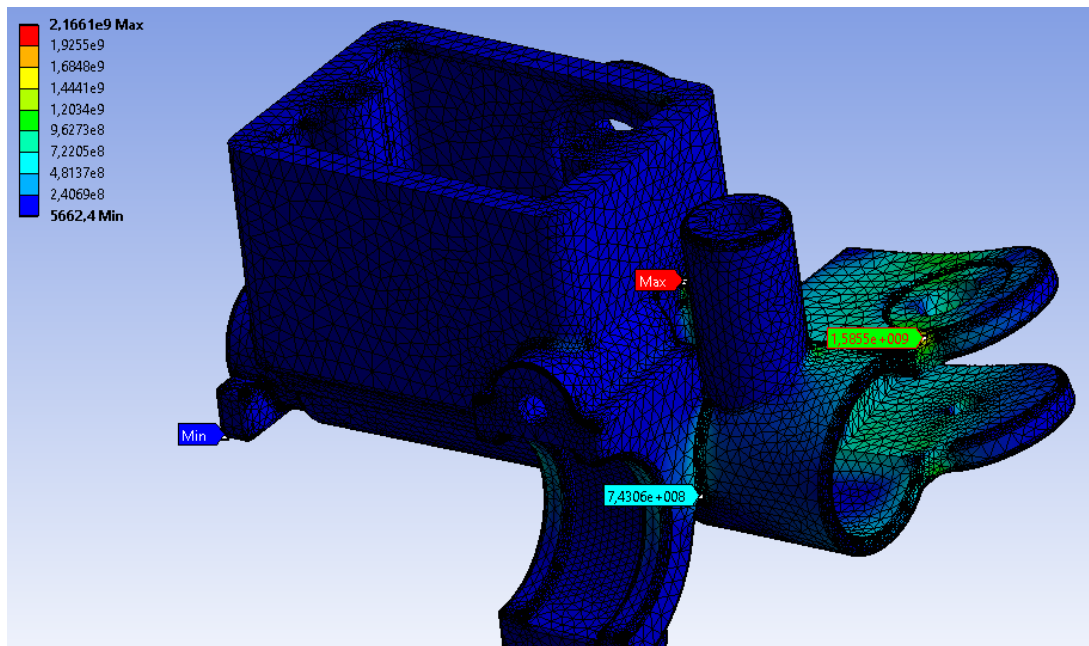


Figura 50 - Gráfico de Tensão equivalente de von-Mises em caso de queda- Bomba Alterada

No caso da bomba original verifica-se um valor de tensão máximo na zona de apoio do guiador, sendo que na mesma zona da bomba alterada esta tensão é inferior, mesmo com a diminuição das espessuras. Devido a esta alteração generalizada da peça verifica-se também um ponto crítico na zona do suporte superior da manete (Figura 50), sendo possível

de resolver recorrendo à mesma metodologia utilizada na bomba original, de alteração de espessura apenas da zona do suporte superior para maior reforço.

No que toca ao coeficiente de segurança em caso de queda é perceptível pela análise de tensões que este será inferior a 1 nas zonas de tensão elevada já verificadas anteriormente na zona de apoio do guiador e na zona de suporte da manete, com a exceção da zona de reforço do apoio do espelho no caso da bomba alterada (Figura 51 e 52).

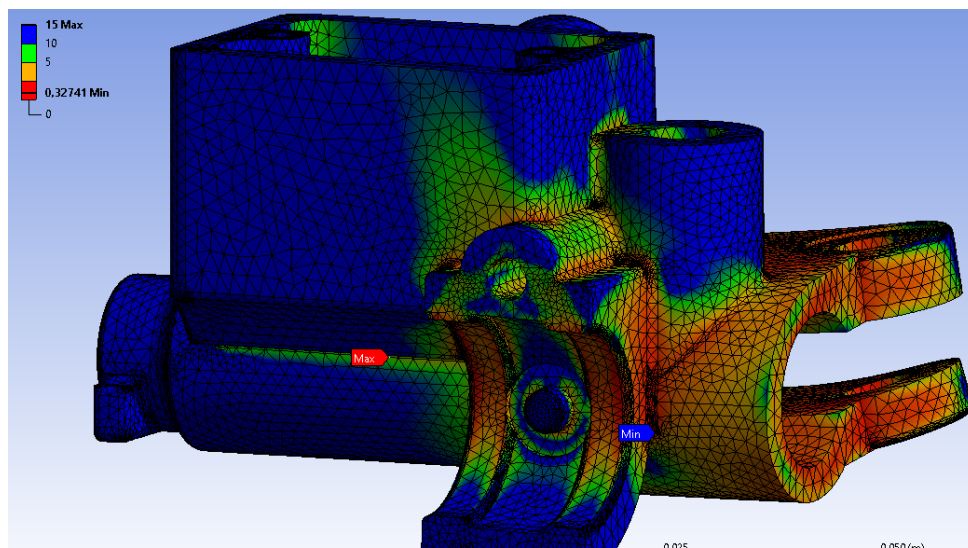


Figura 51 - Gráfico de Coeficiente de Segurança em caso de queda- Bomba Original

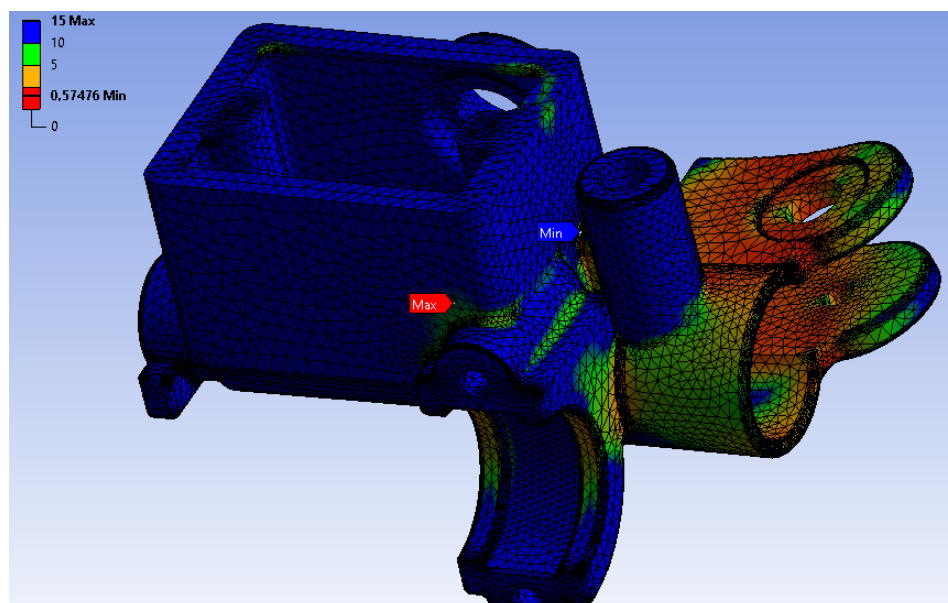


Figura 52 - Gráfico de Coeficiente de Segurança em caso de queda- Bomba Alterada

Através da análise do presente estudo é possível então concluir que, em ambos os casos, existe a deformação plástica dos componentes, sendo que no caso da bomba original existe claramente a tentativa de minimizar a deformação do apoio da manete como zona crítica através do aumento da espessura do suporte superior, sendo algo a considerar para uma alteração de geometria no que diz respeito à bomba alterada, em que a espessura de ambos os suportes permaneceu igual.

Outro ponto a ter em conta e a corrigir será a zona de suporte do espelho, para que não exista este ponto crítico. Este reforço poderá ser alterado prolongando o suporte do espelho para o reservatório com uma parede mais espessa e retangular, com a mesma altura do suporte, para não existir uma concentração de tensões como a observada.

5. Produção do componente pela tecnologia SLM

Para a produção do componente foi utilizado o Aço H13, fornecido pelo Centro de Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto (CDRSP) do Instituto Politécnico de Leiria e foi utilizado o equipamento da *SLM Solutions* SLM 125 HL para o seu processamento (Figura 53). Este tipo de equipamento é o de entrada de gama e possui as características técnicas presentes na tabela 5.

Tabela 5 - Características Técnicas SLM 125 HL

Componente	Característica	Especificação técnica
Laser	Tipo de laser	Laser de fibra: Yb
	Potência máxima	400 W
	Comprimento de onda	1070 nm
	Diâmetro do feixe laser	70-100 μm
Base	Tamanho	125 x 125 (mm x mm)
	Temperatura de pré-aquecimento	200°C
	Materiais de base (substrato)	Aço 316L / Aço H13 / Cobre
Processo	Espessura de camada	20-75 μm
	Velocidade de construção	25 cm^3/h
	Tamanho mínimo de parede	140 μm
Atmosfera	Tipo	Árgon (99,992%)
	O ₂	<0,2%
	Pressão relativa	1-1,2 kPa



Figura 53 - SLM Solutions SLM 125 HL

Por forma a iniciar a produção do componente e após a sua modelação otimizada já mencionados anteriormente, procedeu-se à criação dos ficheiros no formato STL, para que se procedesse então à preparação do seu fabrico com recurso a um *software* apropriado.

Como primeira fase de preparação do processo de fabrico por SLM, foi necessária a criação de suportes através do *software Magics* para que estes dessem apoio e suporte no fabrico da peça, bem como, de certo modo, ajudassem no arrefecimento das diferentes camadas ao longo da passagem do laser (Figura 54).

Algo importante a ter em conta na preparação do fabrico é a orientação das peças devido ao facto de se tentar ao máximo reduzir a área de incidência do laser por camada para evitar uma grande concentração de energia e conseqüente aumento excessivo da temperatura.

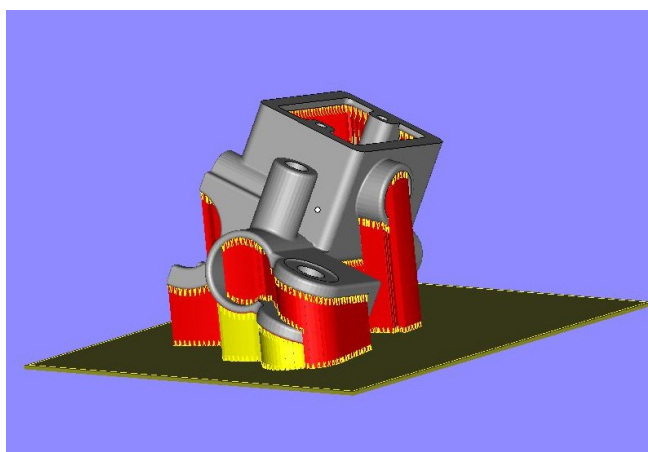


Figura 54 - Preparação em Magics

Com os devidos suportes já criados foi então necessário proceder à criação do ficheiro SLM para leitura pelo equipamento de fabrico SLM 125 HL, através do *software SLM AutoFab* (Figura 55). Através deste *software* foi possível definir os parâmetros de fabrico representados na tabela 6, bem como dividir o ficheiro em pequenas camadas de 50 μm para que se atingisse a precisão no processo requerida para o fabrico das peças em questão.

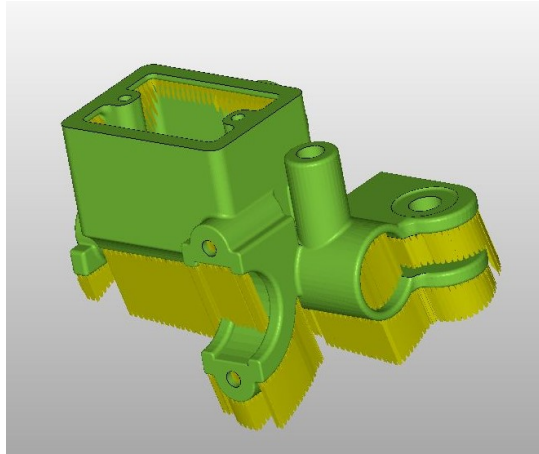


Figura 55 - Preparação do ficheiro em Autofab

As primeiras tentativas de fabrico foram realizadas com os parâmetros possíveis de visualizar na tabela 6, sendo os mais importantes a potência do laser e a velocidade do varrimento do mesmo.

Procedeu-se, seguidamente, à importação do ficheiro a produzir para o equipamento e após a preparação do equipamento e carregamento do material a utilizar iniciou-se a produção.

Durante a primeira tentativa os suportes não ficaram bem fixos à base, o que levou a que alguns levantassem e se tivesse de interromper o processo, como é possível verificar na figura 56.

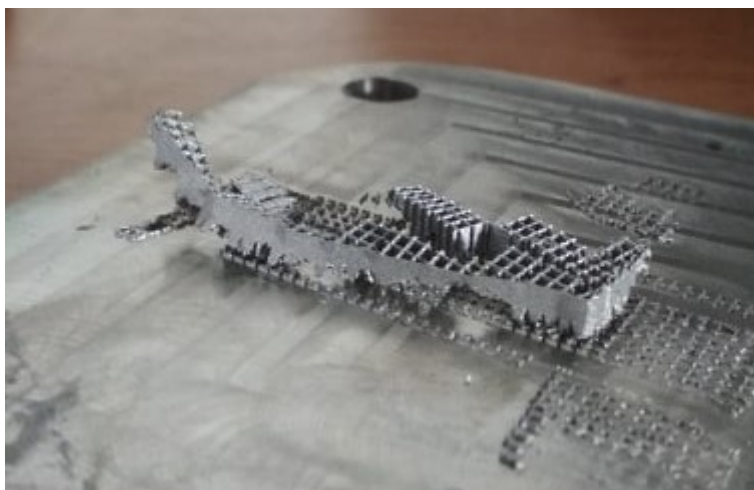


Figura 56 - Levantamento dos suportes para fabrico

Na segunda tentativa o *recoater* deixou de depositar material e o fabrico da peça foi comprometido. O problema relativo aos suportes que ocorreu na primeira tentativa foi resolvido com 3 pré passagens iniciais na zona da base, seguidas pela passagem principal do laser na primeira camada.

Na terceira tentativa de fabrico continuou-se a tentativa anterior através do recuo do processo de fabrico para a camada estimada de paragem de funcionamento do *recoater*, tendo o processo sido interrompido devido à paragem do *recoater* em saliências e consequente paragem do processo devido a dispensa deficiente do pó metálico.

Procedeu-se então à continuação da tentativa anterior através da dispensa de uma camada de pó mais espessa e *reset* da posição da base para evitar colisão com o *recoater*, tendo sido realizada uma passagem do laser prévia para estabelecer as camadas de pó realizadas.

Voltou a ocorrer o problema anterior de paragem do *recoater* em saliências, e consequente paragem do processo devido a dispensa deficiente do pó metálico e arranque de parte do componente.

Este levantamento poderá também ter ocorrido devido a uma temperatura demasiado elevada em zonas de área superior, sendo que ao longo do processo foi tentada a redução gradual da temperatura inicial da base de 200°C para 150°C, 120°C e 100°C, respetivamente, para que não existisse um empeno da peça devido a uma amplitude térmica excessiva entre a base e a zona de incidência do laser. Após a remoção da peça foi verificado que as camadas não estavam depositadas corretamente, como é possível observar na Figura 57, o que se deveu às sucessivas paragens do processo e a um recuo excessivo da base em certo momento da produção, não tendo respeitado a passagem de camada para camada.



Figura 57 - Levantamento de camadas devido às constantes paragens do recoater

Numa nova tentativa foi iniciada nova produção com diferentes parâmetros, tendo sido o processo configurado com menos potência e menos velocidade do laser, sendo que todos os outros parâmetros se mantiveram constantes. Para que não existisse novamente problema no depósito do pó metálico foi também realizado um pré-depósito na zona frontal da base e consequente disposição por parte do *recoater* de forma uniforme, ao invés do anteriormente realizado, que foi o depósito enquanto o *recoater* percorria a base resultando num depósito não uniforme ao longo da base de produção.

Após uma estimativa de 20 horas de produção e controlo do fabrico com monitorização constante das camadas de pó, foi possível a obtenção da peça final com alguns defeitos, mas funcional para o estudo (Figura 58).

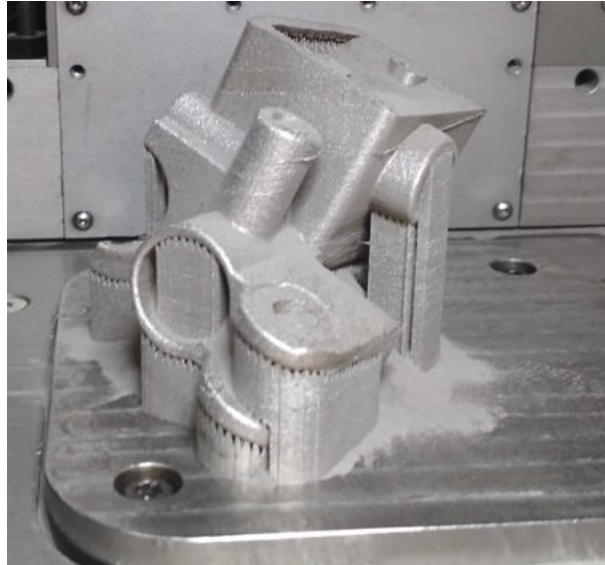


Figura 58 – Fabrico da bomba de travão finalizado

Ao observar a peça final é possível verificar o desnível de algumas partes da peça devido ao levantamento de algumas camadas durante a passagem do laser aquando da sinterização do material. Este pequeno levantamento denomina-se por efeito “*balling*” e ocorre na poça de fusão, sendo necessário estabelecer os parâmetros corretos para o fabrico da peça em questão.

Os diversos problemas encontrados ao longo do processo de fabrico foram resultado de uma configuração incorreta dos parâmetros não tendo em consideração a extensão de certas zonas de fabrico. Este facto levou a poça de fusão fosse bastante grande, o que consequentemente levou ao efeito de “*balling*” e à interrupção do processo de produção.

Outro fator que levou também a que tenham existido problemas na produção foi o desfoque do laser o que fazia com que a sua incidência em toda a área de produção não fosse uniforme, existindo uma maior concentração de energia no centro da plataforma e uma menor para as extremidades, sendo que a tampa da bomba foi colocada mais próxima de uma das extremidades e o fabrico ocorreu sem qualquer tipo de problema.

No que toca aos parâmetros de fabrico utilizados na produção da bomba, foram utilizadas algumas configurações já testadas pelo CDRSP em trabalhos anteriores, tendo-se verificado que a primeira configuração testada não era a mais apropriada, resultando numa má poça de fusão e numa densidade energética demasiado elevada. Assim sendo, optou-se por reduzir a potência do laser e por reduzir também a velocidade de passagem do laser,

resultando num tempo de produção mais elevado, mas numa qualidade do componente final melhor, ou seja, numa densidade maior e porosidade menor. Estes parâmetros são possíveis de ser observados na figura tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de Produção

1° Teste				2° Teste			
Contorno		Volume interno		Contorno		Volume interno	
Velocidade	180 mm/s	Velocidade	430 mm/s	Velocidade	300 mm/s	Velocidade	270 mm/s
Potência	100 W	Potência	175 W	Potência	100 W	Potência	100 W
Dist. entre passagens	200 μm	Dist. entre passagens	200 μm	Dist. entre passagens	200 μm	Dist. entre passagens	200 μm
Espessura de camada	50 μm						

Para a produção da tampa foi seguido o mesmo processo em termos de etapas anteriormente descritas e foi realizada apenas uma pequena movimentação desta na área de fabrico para que não existisse o problema do laser descrito anteriormente e foram utilizados também todos os parâmetros do segundo teste da bomba, o que permitiu que ambos os componentes fossem fabricados com sucesso (Figura 59).

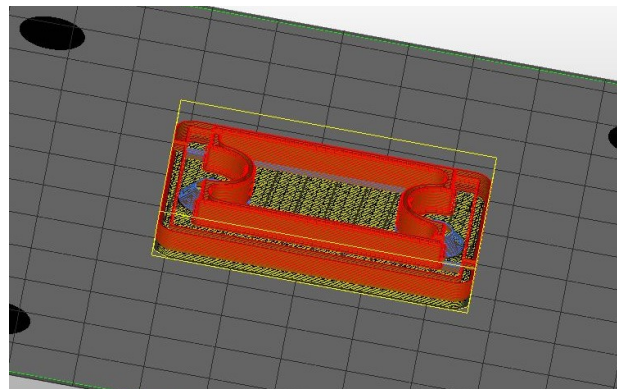


Figura 59 - Preparação do ficheiro da tampa em Magics

5.1. Análise após fabrico

Após realizar o fabrico dos componentes procedeu-se a algumas análises para determinar a porosidade da peça, densidade e diminuição de volume da peça devido ao processo de fabrico. Foi então comparado a bomba original realizada por processos convencionais e a bomba alterada em aço H13 (Figura 60).



Figura 60 - Bomba produzida por SLM e em Aço H13 (a) e bomba original em Alumínio (b)

Em primeiro lugar a bomba de travão foi pesada a seco utilizando uma balança com precisão de 0,1g e pesada após a submersão em líquido por 1h para que fosse possível calcular a sua porosidade, onde foi também analisado o seu volume por alteração da volumetria de líquido num copo volumétrico.

Olhando para o seu peso a seco, de 311,9g, e o seu peso após submersão, de 313,5g, é possível perceber que existe alguma porosidade associada ao componente, sendo que foi verificado que todos os orifícios da peça se encontravam sem líquidos, tendo existido uma variação de aproximadamente 1,6g. Realizando o quociente entre a alteração de massa e a massa total do conjunto obtém-se então uma diferença a rondar os 0,5%, que corresponde à porosidade associada ao componente, estando dentro da gama de valores associados ao aço H13 e a este tipo de fabrico, como é possível observar na figura 61. A bomba produzida

encontra-se nos limites externos deste gráfico (zona assinalada a vermelho), em que existe um *plot* da densidade consoante os parâmetros de fabrico utilizados, neste caso a potência do laser e a distância entre varrimentos do laser.

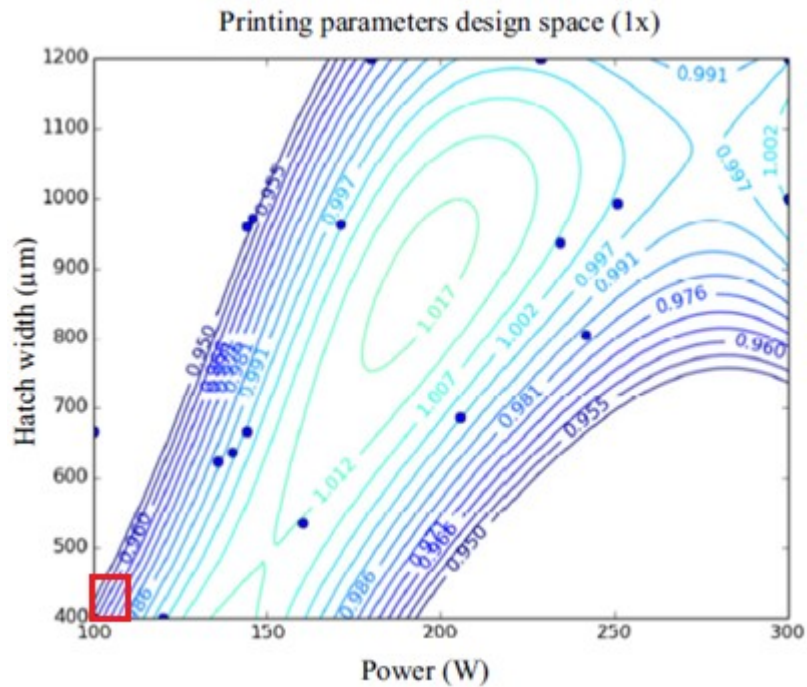


Figura 61 - Variação da densidade do aço H13 produzido por SLM e os seus parâmetros de produção [24]

Para verificação e comparação com o gráfico da figura 61, é possível calcular a densidade da peça fabricada por SLM e comparar com a densidade do mesmo componente, mas fabricado por processos de fabrico convencionais, que seria de $7,76 \text{ g/cm}^3$.

Utilizando o peso obtido a seco de $311,9 \text{ g}$ e a variação de altura da coluna de líquido após submersão do componente, que equivale a $41,57 \text{ ml}$, ou seja, $41,57 \text{ cm}^3$, sendo o modelo tridimensional de $45,8 \text{ cm}^3$ e efetuando o quociente entre ambos, obtém-se uma densidade de $7,503 \text{ g/cm}^3$. Realizando depois o quociente entre esta densidade obtida e a densidade correspondente ao fabrico convencional, ou seja, $\frac{7,503}{7,76}$, obtém-se um valor de $0,967$, que está próximo dos valores obtidos pela diferença de massas e também de acordo com o estudo realizado presente na figura 61 [24], sendo que, de acordo com os parâmetros de fabrico utilizados se estaria na zona inferior esquerda do gráfico, ou seja com valores a rondar os $0,95-0,96$.

No que toca à tampa da bomba de travão (Figura 62) os resultados foram idênticos, tendo-se seguido o mesmo raciocínio. Neste caso obteve-se uma densidade de $7,531 \text{ g/cm}^3$ que pode ser justificada pelo facto de a peça ter sido produzida sem paragens e sem os problemas que ocorreram durante o fabrico da bomba, obtendo-se uma densidade relativa de 0,97.

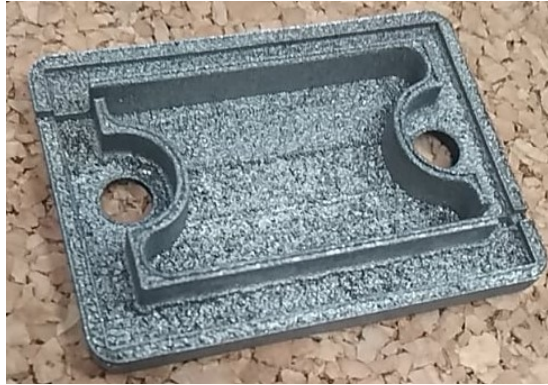


Figura 62 - Tampa fabricada por SLM

5.2. Processos após fabrico

Após o fabrico dos componentes procederam-se a processos de acabamento, nomeadamente furação, roscagem e encasquilhamento da peça, com a ajuda da empresa LUSAMAR, Lda, tendo sido estabelecidas as diversas tarefas a serem realizadas.

No decorrer das semanas após o fabrico, existiram diversos problemas no que toca à furação e roscagem da peça pois o material utilizado apresenta uma resistência mecânica demasiado elevada para que os furos de menor dimensão fossem roscados, levando à quebra de machos e de brocas ao longo do processo. Realizou-se também a tentativa de abertura do cilindro para encasquilhamento mas sem sucesso devido ao facto de o material ser originário de um pó, o que, conjugado com a sua rigidez, torna o material demasiado abrasivo para as ferramentas de corte, danificando-as.

Optou-se então por não proceder às tarefas previstas devido ao facto de as ferramentas de corte terem custos elevados e terem existido quebras e danos nas mesmas ao longo dos processos exigidos, não sendo possível realizar o teste do sistema em condições reais.

6. Conclusões Finais e Trabalhos Futuros

Finalizado o presente projeto é possível rever os diversos objetivos propostos no início do mesmo e retirar as devidas conclusões.

No que respeita à escolha do processo e do material a utilizar considera-se que apesar de a escolha do processo se considerar apropriada foi possível concluir que o material possível de utilizar e fornecido pelo CDRSP - Centro de Desenvolvimento Rápido e Sustentável do Produto não será uma boa opção para futuros trabalhos neste campo, principalmente para componentes que envolvam um grau de precisão mais elevado, pois resultará num difícil acabamento do componente com recurso a etapas de maquinaria subsequentes.

Relativamente às alterações geométricas realizadas para fabrico e considerando apenas as tensões máximas admissíveis dos materiais pode-se concluir que o componente alterado poderia ter sido sujeito a mais reduções de material e otimizações de estrutura para que se obtivesse a mesma massa final que o componente em alumínio ou inferior. Este processo deverá ser realizado e analisado tendo em conta o material escolhido para trabalhos futuros, realizando uma análise prévia de tensões admissíveis dos materiais, procedida de uma análise computacional para avaliação do componente e preparação para fabrico.

Em relação ao fabrico e a todos os processos após fabrico também é possível retirar conclusões importantes para trabalhos futuros, nomeadamente a tentativa de minimização de estruturas de suporte no fabrico devido à sua difícil remoção. Algo a ter em conta será também a poça de fusão realizada durante o fabrico e a otimização dos parâmetros de fabrico para que se minimize a existência do efeito de *balling*.

Futuramente será apropriado realizar um estudo utilizando a mesma tecnologia, mas com pós metálicos de materiais com resistência mecânica inferior para que seja possível proceder a todas as tarefas necessárias realizar após o fabrico, sugerindo por exemplo pó de alumínio ao invés de aço H13.

Bibliografia

- [1] R.. Lemmy, “What are radial brakes and why do modern sportbikes have them?,” 22 julho 2014. [Online]. Available: <https://www.revzilla.com/common-tread/why-things-are-radial-brakes>. [Acedido em 29 setembro 2018].
- [2] Brembo, “A brief history of the radial master cylinder,” 17 4 2017. [Online]. Available: <https://www.brembo.com/en/company/news/history-radial-master-cylinder-brembo-brakes>. [Acedido em 20 setembro 2018].
- [3] P. Young, “Motorcycle brakes - Autralian Motorcycle News,” 30 maio 2017. [Online]. Available: <https://amcn.com.au/editorial/motorcycle-brakes/>. [Acedido em 3 novembro 2018].
- [4] Ducati, “Conventional (Axial) vs. Radial Master Cylinders,” 3 agosto 2007. [Online]. Available: <https://www.ducati.ms/forums/80-hall-wisdom/27159-conventional-axial-vs-radial-master-cylinders.html>. [Acedido em 20 setembro 2018].
- [5] “ISO / ASTM52910-18, Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org,” [Online].
- [6] Hybrid Manufacturing Technologies, [Online]. Available: <http://www.hybridmanutech.com/resources.html>. [Acedido em 13 março 2019].
- [7] 3. Hubs, “3D HUBS - What is 3D Printing,” 2016. [Online]. Available: www.3dhubs.com/what-is-3d-printing. [Acedido em 3 fevereiro 2019].
- [8] Consultants, Roland Berger Strategy, “Additive manufacturing - A game changer for the manufacturing industry?,” Munich, 2013.
- [9] XJET, “XJET 3D Technology,” [Online]. Available: <https://xjet3d.com/technology/>. [Acedido em 3 fevereiro 2019].

- [10] Kai Guan, Z. Wang, M. Gao, X. Li, X. Zeng, *Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel*, 27 março 2013.
- [11] Chor Yen Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Swee Leong Sing, “Review of selective laser melting: Materials and applications,” dezembro 2015.
- [12] Hengfeng Gu, H. Gong, D. Pal, K. Rafi, T. Starr, B. Stucker, “Influences of Energy Density on Porosity and Microstructure of Selective Laser Melted Stainless Steel,” *University of Louisville*, agosto 2013.
- [13] CDRSP, “Direct Digital Manufacturing for Glass Moulding / Anexo Técnico,” 2017.
- [14] Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., & Jiang, W., “Balling behavior of stainless steel and,” *The International Journal of Advanced*, Vols. %1 de %259(9-12), pp. 1025-1035, 2012.
- [15] G. Boothroyd and P. Dewhurst, Boothroyd Dewhurst., *Product Design for Manufacture and Assembly*, 1994.
- [16] D. Stienstra (Rose-Hulman), *Introduction to Design for (Cost Effective) Assembly and Manufacturing*, 2014.
- [17] Connelly, G. Lewis and H., *Product Design for Assembly: The Methodology Applied*, 1993.
- [18] Shih, Chun-Kuei Huang and Ming-Chang, “Design of a hydraulic anti-lock braking system (ABS) for a motorcycle,” 4 Março 2010.
- [19] Sourabh Dhole, V. V. Saidpatil, S. Y. Gajjal. , “Stress Calculation in Two Wheeler Disc Brake Master Cylinder Aluminium Piston in CAE”, 18 de fevereiro de 2016
- [20] J.L. Santolaya, J. Sevil, R. Miralbés., “Design of a Hydraulic Front Brake Handle for Large Displacement Motorcycles,” em *The Manufacturing Engineering Society International Conference*, Espanha, 2013.

- [21] B. STANDARD, “BS ISO 8710:2010 : Motorcycles Brakes and Brake Systems - Tests and measurement methods,” 2010.
- [22] SLM Solutions, “3D Metals - Mechanical properties and applications,” Germany, 2018.
- [23] Piaggio Group, “VESPA GT 200 Service and Workshop Manual,” Pontedera, 2007.
- [24] Petri Laakso, T. Riipinen, A. Laukkanen, T. Andersson, A. Jokinen, A. Revuelta, K. Ruusuvoori, “Optimization and simulation of SLM process for high density H13 tool steel parts,” em *9th International Conference on Photonic Technologies*, 2016.