



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

*Estudo e comparação das propriedades do
produto do processo de fabrico aditivo com o
material convencional*

Ivan Moroz

Leiria, Março de 2019



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

Estudo e comparação das propriedades do produto do processo de fabrico aditivo com o material convencional

Ivan Moroz

Projeto de Mestrado realizado sob a orientação do Doutor Joel Vasco, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e co-orientação do Doutor Rui Rúben, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Março de 2019

Agradecimentos

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, pelo equipamento necessário para a realização dos ensaios práticos;

Ao Doutor Joel Vasco, orientador, pela disponibilidade, orientação, ajuda na parte científica e prática, a qual foi fundamental para a progressão deste projeto;

Ao Doutor Rui Ruben, coorientador, pela partilha dos seus conhecimentos sobre o software de simulação, disponibilidade, orientação, ajuda na parte científica e prática;

À Sra. Fernanda Carvalho pelo apoio na realização dos ensaios de tração;

À empresa 3D Ever, Lda, pela disponibilidade, fabrico dos provetes e peça otimizada em PA12, e pelo interesse em participar neste projeto;

À empresa Moldegama SA, pela disponibilidade das máquinas para o fabrico das peças auxiliares para os ensaios práticos;

Ao meu colega Vitor Raimundo, responsável pelo setor das máquinas convencionais na empresa Moldegama SA, pela disponibilidade e ajuda no processo de fabrico das peças auxiliares para os ensaios práticos;

À minha família e aos amigos pela paciência e o apoio neste projeto.

Resumo

A tecnologia de fabrico aditivo é uma área que tem vindo a sofrer uma grande evolução nos últimos tempos. O fabrico aditivo é um processo onde a peça é produzida por adição de material, camada a camada. A sua aplicação já não se limita apenas ao fabrico dos protótipos, pois a evolução atingiu o nível de fabrico das peças estruturais e um bom acabamento superficial.

Neste projeto será feita a substituição do componente convencional por outro produzido por um processo aditivo. Foi escolhida uma manilha, em aço, com intuito de suportar as cargas. Para a realização dos ensaios de tração, fabricaram-se os suportes especiais para a máquina de ensaios. Em paralelo produziram-se os provetes na impressora 3D HP Multijet Fusion, com o material PA12. Os provetes eram necessários para obter as propriedades mecânicas reais do material.

Tendo os resultados da capacidade de carga das manilhas e as propriedades mecânicas reais do PA12, procedeu-se a uma otimização geométrica. Por fim, obtendo a geometria otimizada avançou-se para o fabrico da mesma. Foi feito o ensaio de tração da peça final e a comparação dos resultados.

Palavras-chave: *Fabrico aditivo, otimização geométrica*

Abstract

Additive manufacturing technology is the area that has had great evolution latterly. Additive manufacturing is a process where the part is produced by adding material, layer by layer. Its application is no longer limited only for the manufacture of prototypes because the evolution reached the level of manufacturing structural parts and has good visual finishing.

In this project the conventional component will be replaced by another, produced by an additive manufacturing. The steel shackle was chosen with purpose to support the loads. Special supports have been manufactured for the purpose of carrying out the tensile tests. In parallel, the test samples were being manufactured on the 3D printer HP Multiplijet Fusion, with the PA12 material. The test samples were needed to obtain the actual mechanical properties of the material.

With the results of the load capacity of the shackles and the real mechanical properties of PA12, geometric optimization was started using simulation software. Finally, obtaining the optimized geometry, it's manufacture started. The tensile test of the final part and the comparison of the results were carried out.

Keywords: *Additive manufacturing, geometrical optimization*

Lista de Siglas

DMLS - *Direct Metal Laser Sintering*

SLM - *Selective Laser Melting*

SLS - *Selective Laser Sintering*

BJ - *Binder Jetting*

dpi - *Dots Per Inch* (Pontos por polegada)

Índice

Agradecimentos	III
Resumo	V
Abstract	VII
Lista de Siglas	IX
Lista de Figuras	XVIII
Lista de Tabelas	XIX
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Objetivos	1
1.2 Descrição do documento	2
2 Estado da Arte	3
2.1 Processos de Impressão 3D	3
2.1.1 Processo Selective Laser Sintering (SLS)	4
2.1.2 Processo Binder Jetting (BJ)	6
2.1.3 Processo HP Multi Jet Fusion (MJF)	7
2.2 Técnicas de Caracterização para Obtenção de Propriedades	9
2.2.1 Ensaios de Tração	9
2.3 Simulação Numérica Estrutural, Modelos Isotrópicos/ Anisotrópicos . .	11
3 Metodologia experimental	13
3.1 Objeto do caso de estudo	13
3.2 Processo de fabrico aditivo	15
3.2.1 Impressora 3D do caso de estudo	15
3.3 Materiais	16
3.4 Simulação numérica	16
4 Testes Experimentais	19
4.1 Produto Original	19
4.1.1 Preparação do Ensaio de Tração	20
4.1.2 Ensaio de Tração da Peça Original	24
4.2 Provetes	25
4.2.1 Construção dos Provetes	25
4.2.2 Ensaios dos Provetes	27
4.2.3 Tratamento de resultados dos Ensaios	27
4.3 Simulação numérica do objeto do caso de estudo	35
4.3.1 Simulação estrutural do material em estudo	35

5	Caso de Estudo	47
5.1	Setup de Ensaio para o Caso de Estudo	47
5.2	Ensaaios do Caso de Estudo	48
5.3	Tratamento de resultados	48
6	Discussão de Resultados	51
7	Conclusões	55
	Bibliografia	57
	Anexos	59
.1	Anexo A	60
.2	Anexo B	65

Lista de Figuras

2.1	<i>Selective Laser Sintering</i> [5]	4
2.2	Processo do <i>Selective Laser Sintering</i> [9]	5
2.3	Processo do <i>Binder Jetting</i> [4]	6
2.4	Processo do <i>Multi Jet Fusion</i> . Tradução de [13]	9
2.5	Ensaio de Tração	10
2.6	Gráfico Tensão-Deformação	11
3.1	Objeto do caso de estudo	14
3.2	Sequência de etapas	14
3.3	HP Multi Jet Fusion 4200	15
4.1	Manilha metálica	19
4.2	Máquina Zwick Z100	20
4.3	Suportes para Ensaio de Tração	20
4.4	Material C4 da Ramada Aços [3]	21
4.5	Desbaste e acabamento da caixa redonda no interior do aço	21
4.6	Controlo de diâmetro com calibre	22

4.7	Utilização do processo Eletroerosão nos suportes	22
4.8	Desbaste e acabamento dos topos dos suportes	23
4.9	Chanfros e Furo central dos suportes	23
4.10	Suportes Finais	23
4.11	Montagem das peças para o ensaio de tração	24
4.12	Imagens dos três ensaios realizados	24
4.13	Gráfico dos ensaios de tração das peças em aço	25
4.14	Provetes	26
4.15	Provetes construídos no sentido eixo X	26
4.16	Provetes construídos no sentido eixo Y	26
4.17	Provetes construídos no sentido eixo Z	26
4.18	Início do Ensaio	27
4.19	Secção do Provede	28
4.20	Série 1 de provetes	28
4.21	Gráfico dos resultados da Série 1 de provetes	29
4.22	Série 2 de provetes	29
4.23	Gráfico dos resultados da Série 2 de provetes	30
4.24	Série 3 de provetes	30
4.25	Gráfico dos resultados da Série 3 de provetes	31
4.26	Série 4 de provetes	31

4.27	Gráfico dos resultados da Série 4 de provetes	32
4.28	Módulo de Elasticidade do Provete 1-1	32
4.29	Solicitações da Cavilha	35
4.30	Diagrama de Corpo Livre	35
4.31	Secção 1	36
4.32	Secção 2	36
4.33	Peça do caso de estudo no Autodesk Inventor 2018	37
4.34	Parâmetros utilizados na peça do caso de estudo	38
4.35	Dados do Material PA12	38
4.36	Carga e constrangimentos	39
4.37	Simulação Autodesk 1	39
4.38	Simulação Autodesk 3	39
4.39	Parâmetros do material no Abaqus	40
4.40	Carga no objeto no Abaqus	41
4.41	Tensões locais não consideradas	41
4.42	Simulação d3=20mm + Pormenores	42
4.43	Valores dos elementos com maior tensão d3=20mm	42
4.44	Simulação d3=22mm + Pormenores	43
4.45	Valores dos elementos com maior tensão d3=22mm	43
4.46	Simulação d3=24mm + Pormenores	44

4.47	Valores dos elementos com maior tensão d3=24mm	44
4.48	Parâmetros do material retirado dos ensaios de tração	45
4.49	Simulação d3=24mm + Pormenores (PA12 ensaio prático)	45
4.50	Valores dos elementos com maior tensão d3=24mm (PA12 ensaio prático)	46
5.1	Diferença dimensional entre a peça inicial (esquerda) e a peça otimizada (direita)	47
5.2	Acessórios novos para o ensaio de tração final	47
5.3	Ensaio de tração da peça otimizada	48
5.4	Gráfico do ensaio de tração da peça otimizada	49
5.5	Peça otimizada depois do ensaio de tração	49
6.1	Comparação dos resultados entre peças originais com a peça otimizada	51
6.2	Resultados dos ensaios dos provetes	52
6.3	Provetes com o fenómeno de estrição	52
6.4	Comparação das zonas com maior tensão	53
6.5	Alinhamento do setup do ensaio de tração	53
1	Módulo de Elasticidade do Provede 1-2	60
2	Módulo de Elasticidade do Provede 1-3	60
3	Módulo de Elasticidade do Provede 2-1	61
4	Módulo de Elasticidade do Provede 2-2	61

5	Módulo de Elasticidade do Provete 2-3	61
6	Módulo de Elasticidade do Provete 3-1	62
7	Módulo de Elasticidade do Provete 3-2	62
8	Módulo de Elasticidade do Provete 3-3	62
9	Módulo de Elasticidade do Provete 3-4	63
10	Módulo de Elasticidade do Provete 4-1	63
11	Módulo de Elasticidade do Provete 4-2	63
12	Módulo de Elasticidade do Provete 4-3	64
13	Módulo de Elasticidade do Provete 4-4	64
14	Módulo de Elasticidade do Provete 4-5	64
15	Módulo de Elasticidade do Provete 4-6	65
16	Simulação Autodesk 1	65
17	Simulação Autodesk 2	66
18	Simulação Autodesk 3	66
19	Simulação Autodesk 4	67
20	Simulação Autodesk 5	67
21	Simulação Autodesk 6	68
22	Simulação Autodesk 7	68
23	Simulação Autodesk 8	69
24	Simulação Autodesk 9	69

25	Simulação Autodesk 10	70
26	Simulação Autodesk 11	70
27	Simulação Autodesk 12	71
28	Simulação Autodesk 13	71
29	Simulação Autodesk 14	72

Lista de Tabelas

2.1	Vantagens e Desvantagens do Processo SLS [5]	4
2.2	Vantagens e Desvantagens do Processo BJ [4]	6
2.3	Vantagens e Desvantagens do Processo MJF [1]	8
3.1	Propriedades dos Materiais - Aço e PA12 [3] [12]	16
4.1	Tabela de Módulo de Elasticidade e Distorção	33
4.2	Tabela de seleção de parâmetros do Autodesk Inventor 2018	37
4.3	Resultados das simulações	40

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Objetivos

Cada vez mais os componentes metálicos são substituídos pelos componentes plásticos. Esta mudança afeta as peças visuais, estruturais e funcionais. A principal vantagem das peças plásticas é a sua baixa massa volúmica, que é uma das características principais e mais relevantes na maior parte dos projetos. Por outro lado, as propriedades mecânicas do aço são muito superiores às dos termoplásticos, logo é necessário desenvolver outros tipos de geometria que respondam a estas necessidades.

Para cumprir com o objetivo, as geometrias projetadas podem gerar dificuldades de moldabilidade no fabrico de ferramenta para injeção de termoplásticos. Assim, a solução é a utilização das tecnologias de fabrico aditivo.

O fabrico aditivo consiste num conjunto de tecnologias destinadas ao fabrico de objetos por sobreposição de material camada a camada, em oposição aos modelos subtrativos. Os objetos podem ter qualquer forma ou geometria e são produzidos a partir de um modelo 3D. O fabrico aditivo reduz o tempo de desenvolvimento de novos produtos, reduzindo também os custos associados a erros de conceção [15].

A HP lançou para o mercado 3D uma nova tecnologia Multi Jet Fusion. O fabricante promete maior rapidez de impressão, melhor acabamento das peças produzidas e melhores propriedades mecânicas das mesmas.

Neste projeto não será abordado o tema do acabamento visual do caso de estudo, mas sim, as suas propriedades mecânicas, dado que os produtos das tecnologias aditivas ainda suscitam dúvidas no meio da comunidade industrial, retardando a sua aplicação numa forma generalizada.

O objetivo principal do projeto é substituir o material metálico de uma peça funcional, existente no mercado, por um material alternativo.

1.2 Descrição do documento

O projeto divide-se em vários capítulos:

- O capítulo do Estado da Arte consiste no levantamento das várias tecnologias do fabrico aditivo, suas vantagens e desvantagens e a técnica de obtenção das propriedades mecânicas do material.
- O capítulo da Metodologia Experimental consiste na seleção de um produto existente no mercado com os seguintes critérios:
 1. Pequenas dimensões;
 2. Material metálico;
 3. Capacidade de suporte de cargas.

Também se definiram os softwares de simulação numérica, o equipamento de tração e a tecnologia para o fabrico aditivo.

- O capítulo dos Testes Experimentais consiste na realização dos ensaios de tração da peça original, o fabrico dos provetes utilizando a tecnologia do fabrico aditivo e a realização dos ensaios de tração dos mesmos. Com os dados obtidos nos ensaios de tração foi feita a otimização da peça.
- O capítulo do Caso de Estudo consiste no fabrico da peça otimizada, a realização do ensaio de tração da mesma e a obtenção das propriedades mecânicas que são utilizadas nas simulações numéricas.
- O capítulo da Discussão de Resultados consiste na comparação dos resultados do ensaio da peça fabricada em material novo com os resultados da peça original e com os resultados obtidos nas simulações numéricas.
- O capítulo das Conclusões resume a possibilidade de substituição do material metálico pelo material polimérico nas peças com a capacidade estrutural semelhante.

Capítulo 2

Estado da Arte

Para a elaboração do Estado da Arte deste projeto foram tidos em conta diversos pontos cruciais, como processos de fabrico aditivo, técnicas de caracterização para a obtenção de propriedades e da simulação numérica estrutural, para uma boa análise dos dados a retirar.

Inicialmente, foram pesquisados diversos processos de fabrico aditivo como *Selective Laser Sintering*, *Binder Jetting* e *HP Multi Jet Fusion* para verificar qual a melhor solução que se adequava para este projeto. Posteriormente, passou-se para a pesquisa e explicação detalhada dos processos para a obtenção de propriedades a utilizar, como os ensaios de tração. Por fim, foi realizada uma pesquisa sobre a simulação numérica estrutural e modelos isotrópicos/ anisotrópicos de forma a analisar todos os dados relevantes para este projeto.

2.1 Processos de Impressão 3D

Para verificar quais as soluções existentes no mercado que melhor se possa adequar a este projeto foi realizada uma pesquisa sobre três tecnologias de impressão 3D: *Selective Laser Sintering*, *Binder Jetting* e *Multi Jet Fusion*.

O foco nestas tecnologias prende-se com a substituição de um produto em aço por outro construído num material alternativo mantendo, contudo, o desempenho mecânico.

2.1.1 Processo Selective Laser Sintering (SLS)

No processo *Selective Laser Sintering* as peças são construídas camada a camada na plataforma de construção, onde cada camada fina de pó é seletivamente sinterizada por um laser.

Este processo não exige que haja estruturas de suporte pois as peças são sustentadas pelo pó da plataforma, tal é possível devido à massa volúmica do material polimérico. Na plataforma de construção pode estar mais do que uma peça, sendo possível colocar várias até ocupar todo o volume da plataforma. Para realizar este processo, a plataforma deve ser pré-aquecida e estar sob um ambiente de gás de proteção [5][16].

O SLS é atualmente um processo relativamente caro e complexo sendo apenas usado para fabricar pequenas quantidades de peças de alto valor ou personalizadas [8].

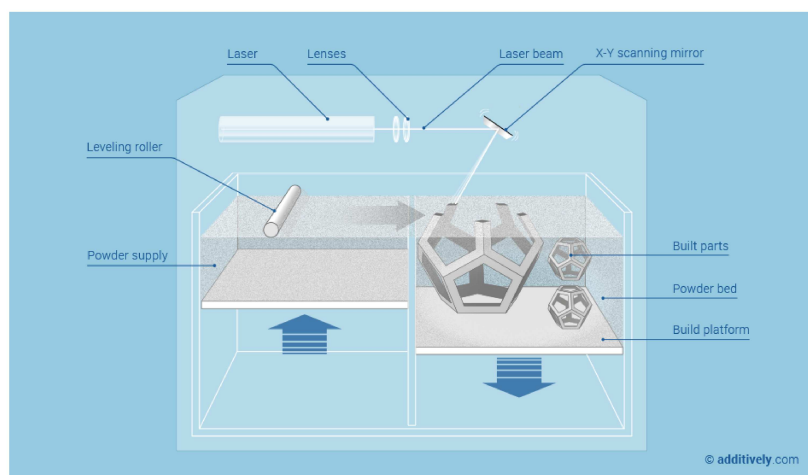


Figura 2.1: *Selective Laser Sintering* [5]

Vantagens e Desvantagens do Processo SLS

No processo *Selective Laser Sintering* como se pode ver na tabela 2.1 tem as suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2.1: Vantagens e Desvantagens do Processo SLS [5]

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Fabrica peças em plástico com boas propriedades mecânicas.• Existe vários tipos de plástico disponíveis.• Para pequenas produções é a solução mais barata.	<ul style="list-style-type: none">• As peças não têm as mesmas propriedades das que são fabricadas por injeção.• O acabamento superficial não é tão bom como as peças fabricadas por injeção.

Descrição do Processo de Fabrico - SLS

O processo de fabrico 3D em SLS tem os seguintes passos [8][16]:

1. Dispersão de uma camada fina na plataforma da impressora;
2. O equipamento pré-aquece a matéria-prima até uma temperatura abaixo do ponto de fusão para que seja fácil sinterizar o material;
3. O laser aquece o pó imediatamente antes do ponto de fusão do material e assim sinteriza as partículas para criar uma parte sólida. O pó que não é sinterizado ajuda a suportar a peça durante a impressão, eliminando a necessidade de suportes;
4. A plataforma do equipamento desce o suficiente para construir outra camada da peça que dependendo da máquina pode ser entre 50 a 200 μm . Após isto é aplicado uma nova camada de pó no topo e o laser volta a sinterizar o material;
5. O processo é repetido em todas as camadas da peça até que esteja completa. A peça acabada fica dentro da câmara de construção para arrefecer gradualmente;
6. Quando a peça arrefece é necessário remover a câmara de construção e transferi-la para um local de limpeza, onde o componente produzido é separado do pó.

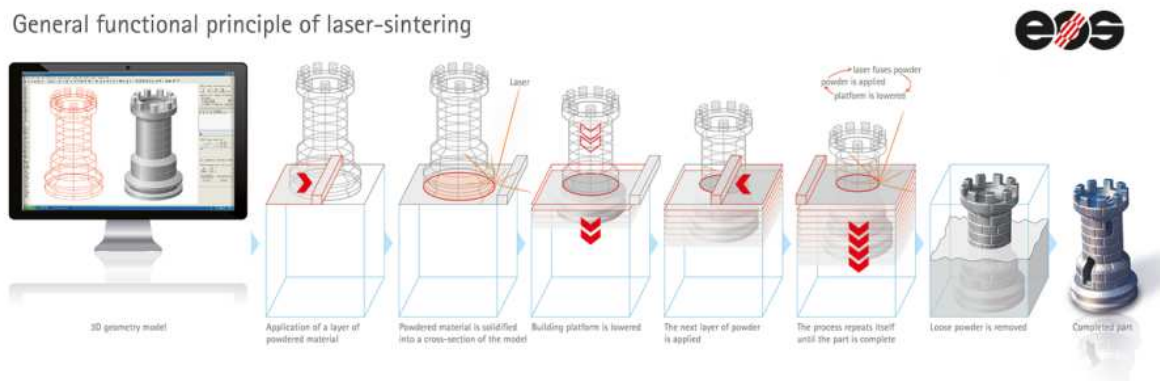


Figura 2.2: Processo do *Selective Laser Sintering* [9]

2.1.2 Processo Binder Jetting (BJ)

O *Binder Jetting* é um processo que consiste em aplicar um agente ligante líquido em finas camadas de pó de material para dar forma a determinada peça [4].

Este processo é uma tecnologia que funciona com quase todos os materiais disponíveis em pó, tais como plástico, cerâmico e metal. Produzir peças plásticas e cerâmicas em cores também é possível pois juntamente com o agente de ligação é colocada a cor [4].

Com este processo não há necessidade de ter estruturas de suporte devido à massa volúmica do material e assim o pó da plataforma de construção ajuda a sustentar a peça e dá a possibilidade de se poder fabricar várias peças [4].

As peças produzidas com o *Binder Jetting* possuem propriedades mecânicas limitadas porque são essencialmente partículas coladas. Assim necessitam do pós-processamento para se tornarem as peças funcionais [4][17].

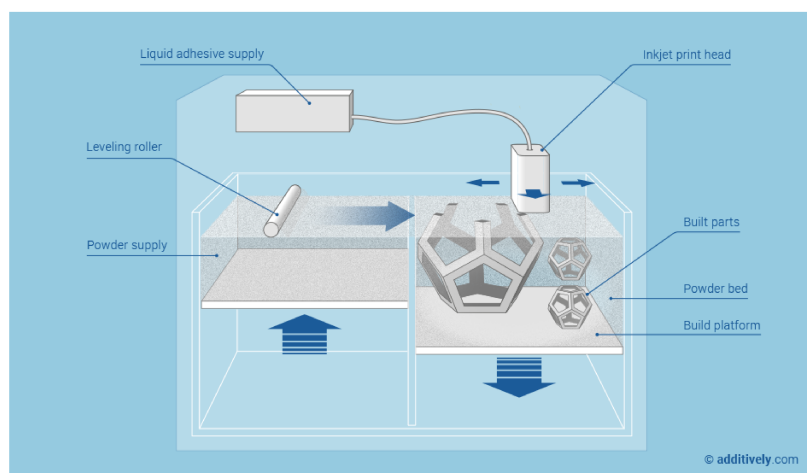


Figura 2.3: Processo do *Binder Jetting* [4]

Vantagens e Desvantagens do Processo BJ

No processo *Binder Jetting* como se pode ver na tabela 2.2 tem as suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2.2: Vantagens e Desvantagens do Processo BJ [4]

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Tecnologia rápida e barata.• Trabalha com vários materiais.• É possível fabricar peças com cores.	<ul style="list-style-type: none">• Tem características mecânicas limitadas.

Descrição do Processo de Fabrico - BJ

O processo de fabrico 3D em *Binder Jetting* segue os seguintes passos [4][17]:

1. Na plataforma de construção é distribuída uma camada fina de pó;
2. Através das cabeças de impressão a jato de tinta é aplicado um agente líquido nas zonas da peça;
3. A plataforma da impressora desce o suficiente para que seja colocada uma nova camada de material no topo e é novamente aplicado o agente líquido nas zonas da peça;
4. Este processo é repetido em todas as camadas da peça até a mesma estar concluída.

2.1.3 Processo HP Multi Jet Fusion (MJF)

O processo *HP Multi Jet Fusion* é idêntico ao processo *Binder Jetting* com a diferença que o primeiro para além de ser aplicado um agente líquido de fusão é também colocado um agente líquido de detalhe para dar um melhor acabamento.

O agente líquido de detalhe permite que não fique o efeito escada nas peças e assim ao toque é possível sentir uma textura uniforme.

Vantagens e Desvantagens do Processo MJF

No processo *Multi Jet Fusion* como se pode ver na tabela 2.3 tem as suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2.3: Vantagens e Desvantagens do Processo MJF [1]

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisão e resolução. • Peças com a sua resistência. • Extremamente rápido e económico. 	<ul style="list-style-type: none"> • A qualidade da superfície é boa, mas mais bruta do que a produzida pelas tecnologias baseadas em foto polímeros (Estereolitografia, Polyjet). • As partes cruas são cinza; essas peças podem ser facilmente tingidas de preto, mas outras cores exigem revestimento (a um custo extra). • Leque limitado de materiais disponíveis.

Descrição do Processo de Impressão - MJF

O processo de impressão 3D em *Multi Jet Fusion* segue os seguintes passos [13]:

1. Na plataforma de construção o pó é aquecido de forma uniforme;
2. Através das cabeças de impressão é depositado o agente de fusão nas partículas que precisam de ser fundidas;
3. Nos contornos da peça é colocado através de cabeças de impressão um agente líquido de detalhe;
4. A lâmpada passa pela plataforma de construção e nas zonas do material da peça é captado o calor e distribuído de forma uniforme e assim solidifica a peça;
5. A plataforma da impressora desce para ser colocada uma nova camada de material e volta a repetir os passos anteriores;
6. Este processo é repetido em todas as camadas da peça até a mesma estar concluída.

A HP Multi Jet Fusion 4200 é 10 vezes mais rápida que a maioria das impressoras que utiliza o conhecimento da HP para imprimir cerca de 30 milhões de gotas por segundo em cada $25.4mm^2$ da área de trabalho [11].

Com a inovação de ter dois agentes líquidos, um de fusão e outro de detalhe, permite que a precisão dimensional e os acabamentos sejam elevados. Com a ajuda do controle térmico que é possível com esta impressora em todas as camadas permite otimizar as propriedades mecânicas do material [11].

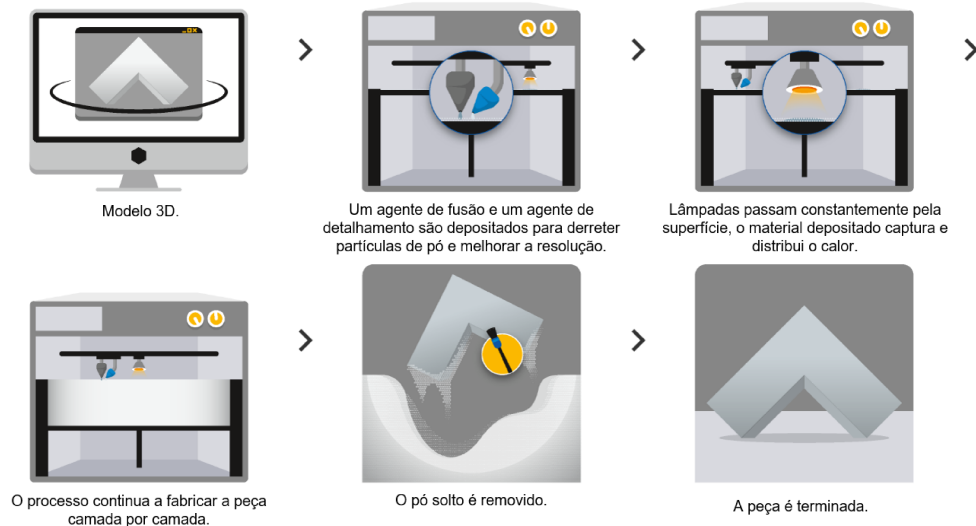


Figura 2.4: Processo do *Multi Jet Fusion*. Tradução de [13]

Os materiais que são possíveis de usar e re-usar na HP Multi Jet Fusion 4200 são HP 3D High Reusability Polyamide 12 (PA 12), HP 3D High Reusability Polyamide 12 (PA 12) Glass Beads e HP 3D High Reusability Polyamide 11 (PA 11). Para a mudança de material é extraído o material da plataforma de pós-processamento para um tanque [11].

Esta impressora tem o volume de impressão de 380 x 284 x 380 mm com uma espessura de cada camada que pode chegar aos 0.08mm e resolução de 1200 dpi e com a taxa de construção máxima de $4115 \text{ cm}^3/h$ [11].

2.2 Técnicas de Caracterização para Obtenção de Propriedades

Existem diversas técnicas de caracterização para a obtenção de propriedades sendo que neste projeto apenas se aplicam os ensaios de tração. Os ensaios de tração dão-nos a informação necessária para poder avançar para a otimização da peça.

2.2.1 Ensaios de Tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de um esforço num objeto até à sua rotura com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas como se pode ver na figura 2.5 [18].

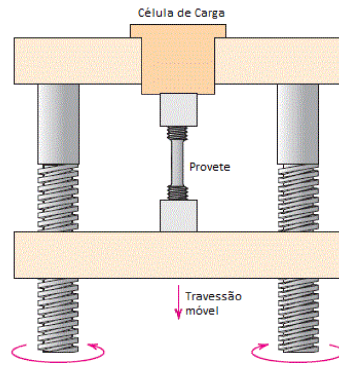


Figura 2.5: Ensaio de Tração

Os resultados são mostrados num gráfico Tensão-Deformação. A partir do gráfico pode-se obter tensão de elasticidade, tensão de cedência, tensão de rotura, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, etc [18].

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Onde σ é a tensão nominal, F é a força aplicada e A é a área da secção transversal.

$$\varepsilon = \frac{L}{L_0}$$

Onde ε é a deformação do corpo, L é o comprimento final, L_0 é o comprimento inicial.

Durante o ensaio o objeto sofre dois tipos de deformação: elástica e plástica. A deformação elástica acontece quando a carga é retirada e o objeto volta ao seu estado inicial. A deformação plástica acontece quando a carga é retirada e o objeto recupera da deformação elástica, mas não volta ao seu estado original ficando deformado plasticamente [18].

Com o aumento do módulo de elasticidade, diminui a deformação elástica para a mesma carga [18].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Onde E é o módulo de elasticidade, σ é a tensão nominal e ε é a deformação do corpo [18].

Coeficiente de Poisson é a relação entre extensão transversal e extensão longitudinal [18].

$$v = \frac{\varepsilon \text{ transversal}}{\varepsilon \text{ longitudinal}}$$

Tensão de elasticidade (σ_e) é a tensão a partir da qual o material começa deformar plasticamente [18].

Tensão de cedência (σ_c) é a tensão quando o material deformou plasticamente 0.2% [18].

Tensão de rotura (σ_r) é a tensão máxima da curva tensão-extensão. É o ponto da diminuição localizada da secção da peça. Com a continuação da deformação a tensão diminui até a fratura do material [18].

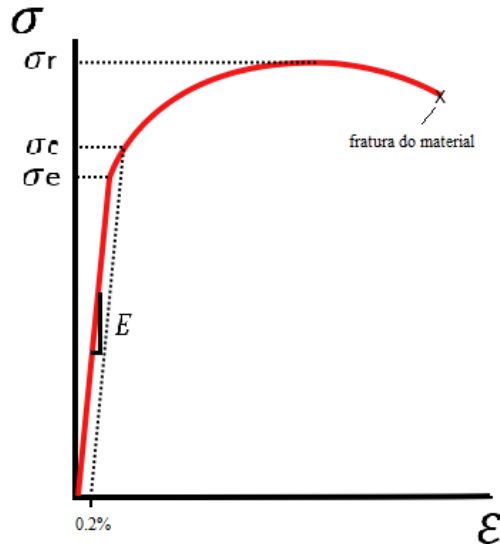


Figura 2.6: Gráfico Tensão-Deformação

2.3 Simulação Numérica Estrutural, Modelos Isotrópicos/ Anisotrópicos

Simulação Numérica Estrutural

A simulação numérica estrutural é um dos campos da engenharia assistida por computador sendo uma ferramenta que permite simular o modelo computacional e identificar o comportamento no modelo real.

Existem no mercado diversas soluções que permitem realizar o desenvolvimento e otimização dos produtos conforme a necessidade do projeto. As suas principais vantagens são a redução de custos e tempo na conceção do projeto, deteção dos erros e pontos críticos.

Este é um processo produtivo com muito impacto que exige certos pontos como [7]:

1. Para a realização destas simulações deve-se conhecer bem o processo de produção o que pode resultar de melhorias para o mesmo;
2. Visto que é uma simulação é possível modificá-la virtualmente sem modificar o processo real e assim otimizar o mesmo;
3. Novos produtos podem ser desenvolvidos mais rapidamente pois assim quando o produto entra em produção gastará menos tempo no seu desenvolvimento.

Ora vendo um exemplo podemos verificar que na indústria automóvel foi possível diminuir o tempo de conceção de um produto de três anos para um ano e meio, ou seja, uma redução para metade do tempo [7].

Para que os resultados destas simulações sejam corretos é necessário que haja bastante rigor na colocação dos dados para realizar o cálculo sendo assim se houver dados de testes realizados, estes devem ser usados porque são dados reais obtidos por testes normalizados.

Modelos Isotrópicos/ Anisotrópicos

Para estudar qualquer material é necessário ter em conta qual o modelo do material, isotrópico ou anisotrópico.

Se no material de estudo se verificar que as propriedades mecânicas podem ser discriminadas sem referência de direção, então o material é isotrópico, como por exemplo o aço e alumínio [19].

Caso o material tenha as suas propriedades mecânicas dependentes da direção dando valores do módulo de elasticidade variados em X, Y e Z, então o material é considerado anisotrópico como por exemplo a madeira [19].

Em alguns tipos de materiais, as suas propriedades são diferentes em direções perpendiculares entre si, estes materiais são ortotrópicos [19].

Capítulo 3

Metodologia experimental

Este capítulo irá referir-se ao objeto do caso de estudo, ao processo de fabrico aditivo escolhido, os materiais selecionados, os softwares de simulação numérica e o equipamento de tração utilizados para este projeto.

3.1 Objeto do caso de estudo

Hoje em dia, com a constante evolução de materiais surgem cada vez mais novos materiais com novas propriedades. No caso dos plásticos pode-se verificar que cada vez mais estão a substituir os metálicos. Já é possível encontrar várias peças estruturais em plástico na carroçaria do automóvel, feitas através de moldes de injeção de plástico.

Nos casos do processo aditivo e da prototipagem rápida foi possível um grande avanço em tecnologia nos últimos anos, muito também pelos novos materiais que vão surgindo. Para além do melhor acabamento que se consegue obter, pode-se verificar que as peças feitas por processo aditivo se tornam cada vez mais resistentes devido à incorporação de cargas, como fibras de vidro ou fibras de carbono.

Pegando no facto de o processo aditivo estar em crescimento verificou-se que seria relevante pegar numa peça metálica que está constantemente sujeita a cargas no seu meio ambiente. Sendo esta, uma peça fabricada por processo convencional seria interessante otimizá-la e fabricá-la em material utilizado no processo aditivo para, posteriormente, obter resultados e retirar conclusões.

A figura 3.1 mostra o objeto escolhido para o caso de estudo.



Figura 3.1: Objeto do caso de estudo

A metodologia experimental deste trabalho está resumida na sequência de etapas ilustrada na figura 3.2.

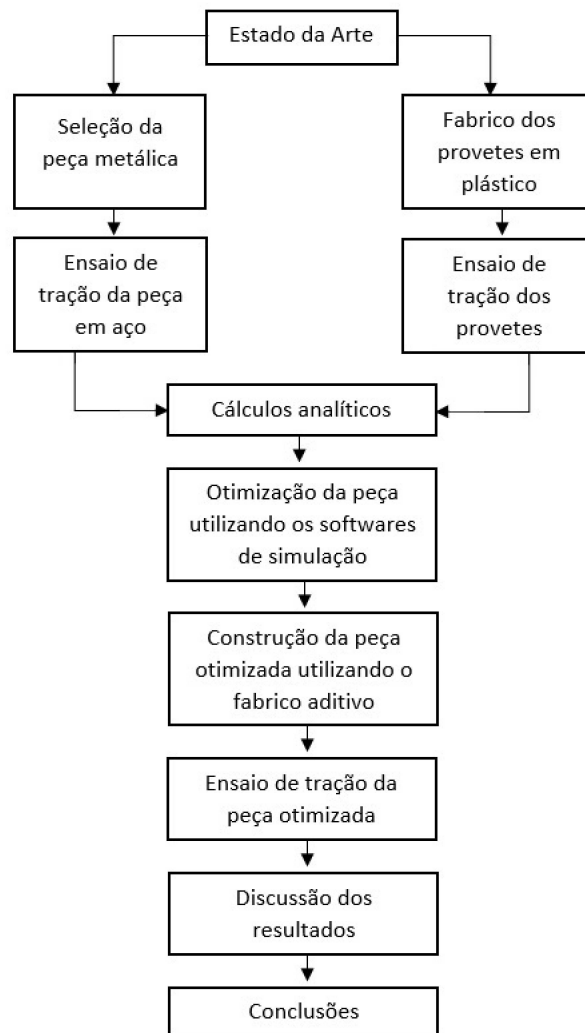


Figura 3.2: Sequência de etapas

3.2 Processo de fabrico aditivo

Para a realização deste projeto optou-se por usar a tecnologia HP MultiJet Fusion porque esta permite ter peças de alta densidade e baixa porosidade, que leva a uma superfície excecionalmente lisa e direta. As peças funcionais precisam de pouco acabamento no tempo pós-produção. Isto significa que os tempos de espera mais curtos tornam-se, assim, ideais para realizar protótipos funcionais e pequenas séries de peças finais [13].

Para a elaboração das peças com o fabrico aditivo foi necessária a colaboração de uma empresa especialista no setor, a 3D Ever, a qual produziu as peças na impressora 3D HP Multi Jet Fusion 4200.

3.2.1 Impressora 3D do caso de estudo

Como já referido anteriormente a impressora escolhida para a realização das peças em fabrico aditivo com a tecnologia *Multi Jet Fusion* é a HP Multi Jet Fusion 4200 (Figura 3.3).



Figura 3.3: HP Multi Jet Fusion 4200

Esta impressora produz várias peças com rapidez simplificando o fluxo de trabalho, sendo possível durante a produção inserir mais peças ao fabrico. Sendo que a plataforma de pós-processamento é separada da impressora faz com que a limpeza das peças seja mais limpa e simples. Visto que esta impressora tem dois módulos: um é a estação de fabrico e outro é a estação de pós-processamento, permite que se possa estar sempre a fabricar novas peças sem ter que esperar pelo pós-processamento esteja concluído [11].

3.3 Materiais

No âmbito deste projeto serão referidos dois materiais, um da peça original e outro da peça do caso de estudo.

A peça original para o caso de estudo é feita em aço galvanizado. O aço é uma liga metálica, constituída por ferro e carbono. Tem muita procura por causa das suas características variadas, o que permite sua utilização em diversas áreas. As propriedades mecânicas variam conforme a sua composição química e teor do carbono [3].

O processo de galvanização serve apenas para a proteção do aço contra a corrosão. Consiste na aplicação de uma camada fina de zinco através da forma eletrolítica.

Para a peça do caso de estudo foi escolhido o material poliamida 12. É um material termoplástico com alta resistência mecânica, química e resistência ao desgaste [14].

Os números na designação das poliamidas identificam a quantidade de átomos de carbono dos monómeros de partida. Os materiais PA11 e a PA12 têm maior estabilidade dimensional, mas menor rigidez do que PA6 e PA6.6. Podem ser utilizados em construção das peças funcionais em várias indústrias [12].

Na tabela 3.1, são apresentadas as propriedades do aço e do HP 3D High Reusability Polyamide 12 (PA 12).

Tabela 3.1: Propriedades dos Materiais - Aço e PA12 [3] [12]

Propriedade	Aço	PA12
Massa Volúmica (g/cm ³)	7,85	1,01
Módulo de Elasticidade (MPa) em X	207000	1700
Módulo de Elasticidade (MPa) em Y	207000	1700
Módulo de Elasticidade (MPa) em Z	207000	1800
Resistência à tração (MPa)	380-600	48

3.4 Simulação numérica

Softwares de Simulação Numérica

O Autodesk Inventor é um software para projeto 3D, que foi criado para o desenvolvimento dos projetos com objetivo de reduzir os custos e aumentar a produtividade. Para além da construção dos modelos 3D, permite simular e analisar o comportamento dos objetos em condições reais sujeitos aos esforços definidos pelo projetista [6].

O menu de simulação inclui a opção para poder otimizar o objeto em estudo alterando as dimensões apenas na tabela dos parâmetros. Alterando as dimensões na tabela, o software atualiza o modelo 3D, corre a simulação e assim não há necessidade de alterar o modelo 3D [6].

Possui uma ferramenta para dimensionamento dos veios, rolamentos e rodas dentadas com o catálogo atualizado dos produtos existentes no mercado. Não há necessidade de desenhar/modelar, por exemplo, os rolamentos ou rodas dentadas, dado que o software tem modelos pré-definidos [6].

O Abaqus CAE é um software desenvolvido para simulação de elementos finitos, visualização e automação de processos. Permite o cálculo dos deslocamentos, deformações e tensões em todos os pontos do caso de estudo. Permite criar ou importar os modelos 3D, definir o tipo de material, gerar malha de elementos finitos, criar as cargas e constrangimentos conforme a necessidade do projeto (pré-processador) e visualizar os resultados (pós-processador) [2].

Capítulo 4

Testes Experimentais

Neste capítulo refere-se qual o produto original utilizado, a preparação e os resultados dos ensaios de tração da peça original tal como os resultados dos ensaios de tração dos provetes realizados pelo processo aditivo escolhido anteriormente. Após os ensaios de tração realizou-se a simulação numérica do objeto do caso de estudo.

4.1 Produto Original

Para a elaboração deste projeto foi necessário escolher uma peça que já existisse no mercado para realizar a comparação.

Assim sendo, neste caso optou-se por escolher uma manilha metálica como se pode ver na figura 4.1.

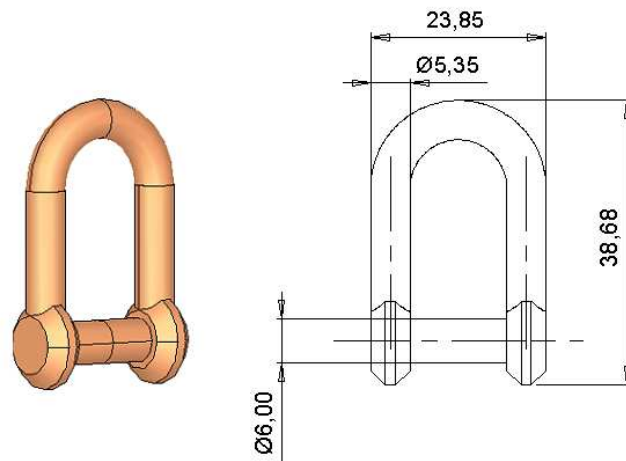


Figura 4.1: Manilha metálica

Esta peça foi escolhida por ser uma peça funcional, de material metálico e por ser de tamanho relativamente pequeno.

O fabricante da peça indica que a mesma suporta 100kg de carga, mas mesmo assim optou-se por realizar um ensaio de tração para verificar o real potencial.

4.1.1 Preparação do Ensaio de Tração

Para a realização do ensaio de tração foi utilizada a máquina Zwick Z100, como se pode ver na figura 4.2, do laboratório de Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão.



Figura 4.2: Máquina Zwick Z100

Foi necessário fabricar dois suportes para auxiliar a colocação da manilha na máquina de tração. Na figura 4.3 é possível ver o modelo 3D e o desenho para avançar com fabrico dos suportes.

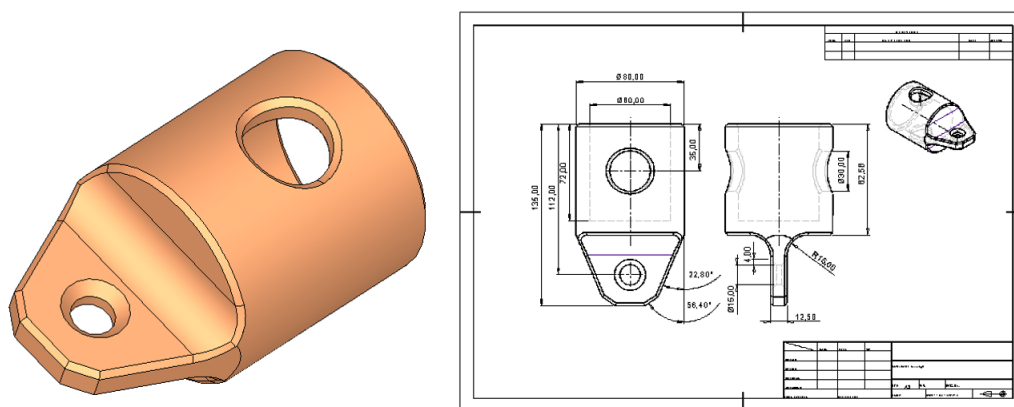


Figura 4.3: Suportes para Ensaio de Tração

Para a fabricação destes suportes foi utilizado o material C4 calibrado da empresa Ramada Aços, cujas características podem ser vistas na figura 4.4.

FAMÍLIA	MARCA	PERFIS DISPONÍVEIS	NORMAS				
			EURONORM	AISI	UNE	DIN	W.Nr.º
2 652	C 4	∅ ▧	C 45 E	1045	F-1140K	Ck 45 K	1.1191

COMPOSIÇÃO QUÍMICA %								
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	OUTROS
0,45	≤0,40	0,65						Cr+Mo+Ni≤0,63

APLICAÇÕES PRINCIPAIS
ORGÃOS DE MÁQUINAS, VEIOS, CAVILHAS, PARAFUSOS, PORCAS.

I

Figura 4.4: Material C4 da Ramada Aços [3]

Para a fabricação dos suportes foram utilizados dois processos: a fresagem convencional e a eletroerosão a fio. Detalhando um pouco como foi realizada esta fabricação, começou-se por obter 2 cilindros de aço com as dimensões conforme o desenho. Neste caso, o aço já veio com o diâmetro exterior de 60mm.

Na fresagem convencional foi realizada a maquinação da caixa redonda no interior do aço, onde foi necessário utilizar vários tipos de brocas, sendo que no desbaste e no acabamento foi utilizada a ferramenta *multi-bore* como se pode ver nas imagens da figura 4.5. Para poder fixar a peça na máquina foram produzidas duas faces paralelas.



Figura 4.5: Desbaste e acabamento da caixa redonda no interior do aço

Após a realização da caixa redonda, foi efetuada uma verificação do diâmetro com um calibre para garantir a dimensão correta, como se pode ver na figura 4.6.



Figura 4.6: Controle de diâmetro com calibre

Com o processo eletroerosão a fio, foi realizada a remoção do material para o furo da cavilha, visto que era necessário obter elevado rigor na maquinação. A figura 4.7 mostra as imagens do processo e o resultado final.

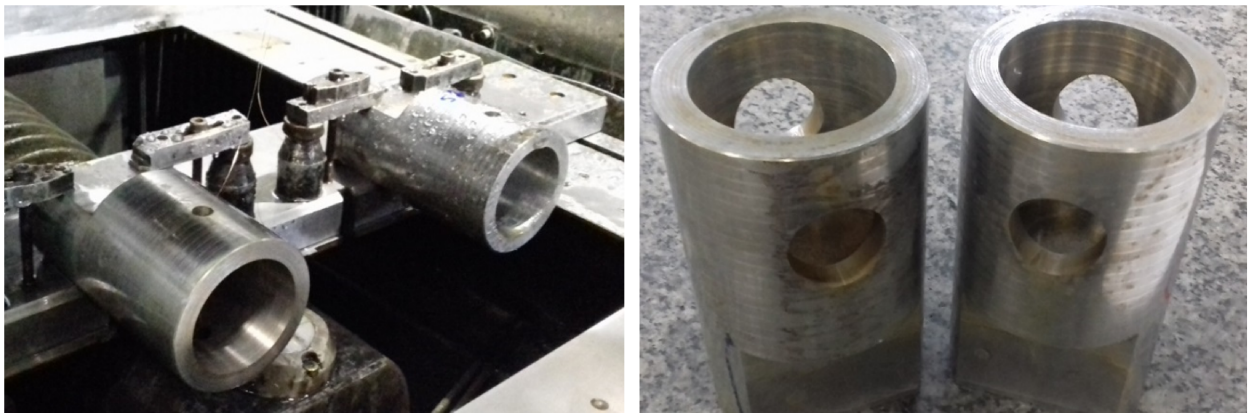


Figura 4.7: Utilização do processo Eletroerosão nos suportes

Após o processo da electroerosão as peças voltaram para a secção da fresagem convencional para serem terminadas.

Na figura 4.8 é possível ver como foi realizado o desbaste e acabamento das faces do topo dos suportes.

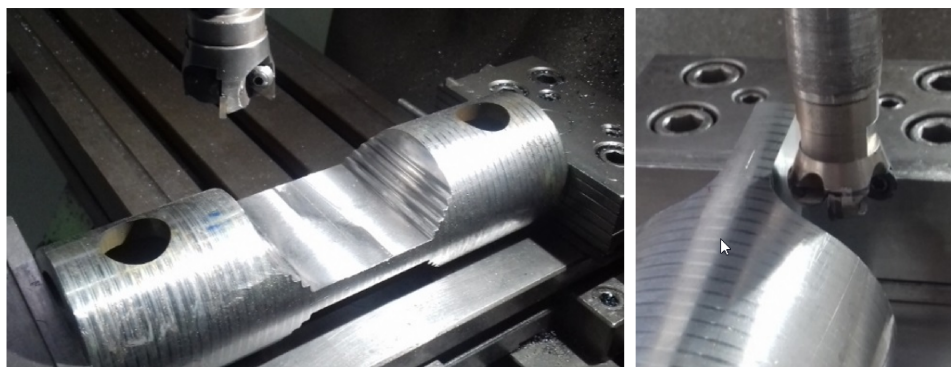


Figura 4.8: Desbaste e acabamento dos tops dos suportes

De seguida foram realizados chanfros nos suportes e realizado o furo central do topo do suporte para colocar os elos de ligação como se pode ver nas imagens da figura 4.9. Na figura 4.10 é possível ver o resultado final da fabricação dos suportes.



Figura 4.9: Chanfros e Furo central dos suportes



Figura 4.10: Suportes Finais

4.1.2 Ensaio de Tração da Peça Original

Para a realização do ensaio de tração da peça original, para além dos suportes que foram feitos, também foi necessário utilizar mais duas peças metálicas para fazer a ligação entre os suportes e a peça, como se pode ver na figura 4.11.

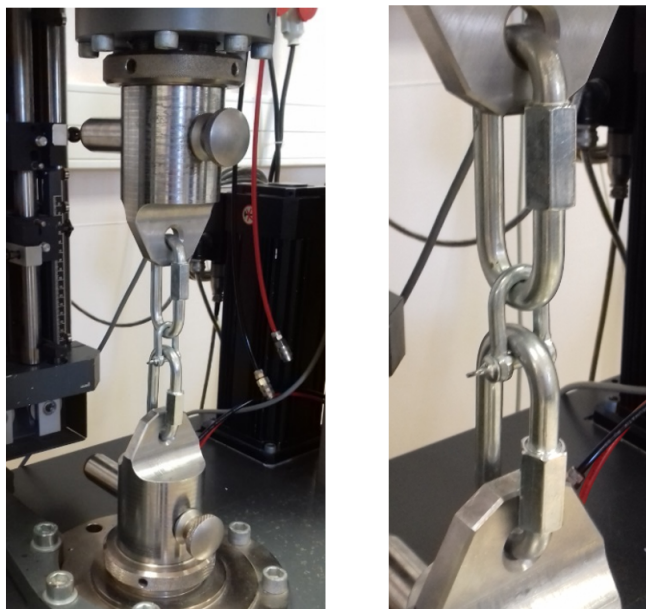


Figura 4.11: Montagem das peças para o ensaio de tração

Os parâmetros dos ensaios de tração foram uma pré-carga de 0.1MPa e uma velocidade de 3mm/minuto. Os elos de ligação foram medidos antes e depois dos ensaios e não houve qualquer deformação nos mesmos que pudesse pôr em causa os valores obtidos.

Foram realizados três ensaios de tração como se pode ver na figura 4.12.

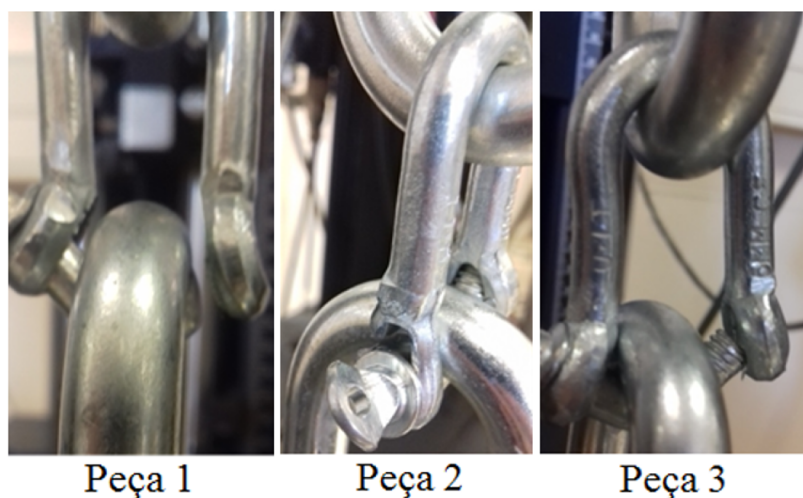


Figura 4.12: Imagens dos três ensaios realizados

No gráfico da figura 4.13 é possível verificar que a peça 1 e a peça 3 têm as curvas muito parecidas apesar de fraturarem em extensões diferentes. Na peça 1 a cavilha fraturou ao corte sendo que na peça 2 fraturou na orelha da argola e na peça 3 cedeu na zona da rosca da cavilha. A força de rutura mais baixa é na peça 2, 11000N, e a máxima é na peça 1, 13840N.

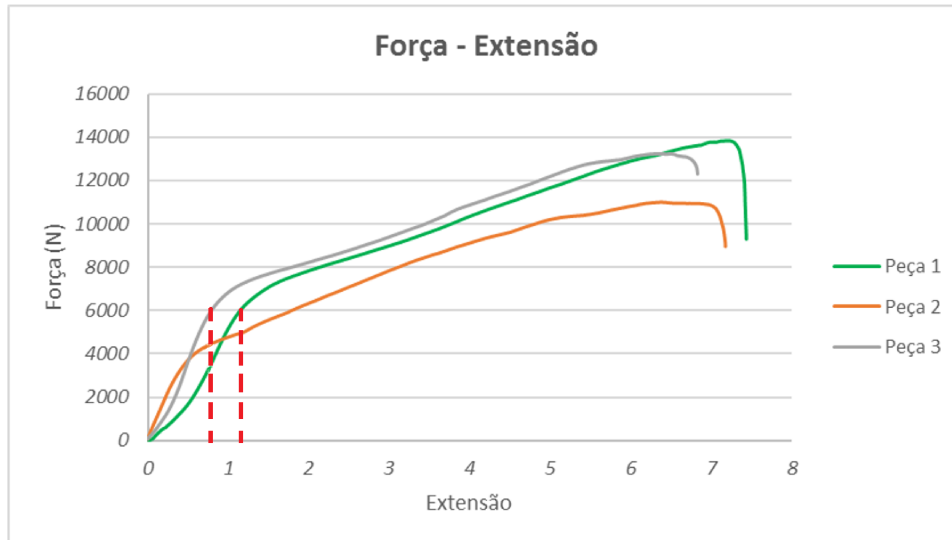


Figura 4.13: Gráfico dos ensaios de tração das peças em aço

Após análise destes resultados considerou-se que a força no ponto da tensão de cedência na otimização da nova peça deve ser de 6000N.

4.2 Provetes

4.2.1 Construção dos Provetes

O fabricante do PA12 apresenta as propriedades mecânicas do material com as características ortotropicas como se pode ver na tabela 3.1. No entanto, foram realizados os ensaios para caracterizar as propriedades do PA12 após construção na HP Multi Jet Fusion. Deste modo, para a construção dos provetes teve-se em conta três posições de construção, uma para cada eixo X, Y e Z como se pode ver na figura 4.14.

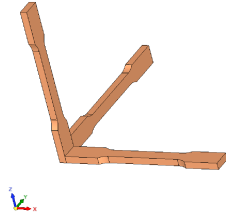


Figura 4.14: Provetes

Na figura 4.15 é possível verificar as amostras construídas no sentido do eixo X que foram marcados com série 1 e 2.



Figura 4.15: Provetes construídos no sentido eixo X

Os provetes construídos no sentido do eixo Y podem ser vistos na figura 4.16 que foram marcados com série 3.



Figura 4.16: Provetes construídos no sentido eixo Y

Provetes construídos no sentido do eixo Z podem ser vistos na figura 4.17 que foram marcados com série 4.



Figura 4.17: Provetes construídos no sentido eixo Z

4.2.2 Ensaio dos Provetes

O objetivo da realização destes ensaios é poder retirar a informação das propriedades mecânicas do material PA12 tais como: tensão de cedência e módulo de elasticidade.

A realização destes ensaios foi efetuada na máquina de ensaios de tração referido na secção 3.5.

Parâmetros do ensaio:

- Pré-carga - 0.1MPa
- Velocidade - 0.5mm/min

A figura 4.18 apresenta o ensaio de um dos provetes.

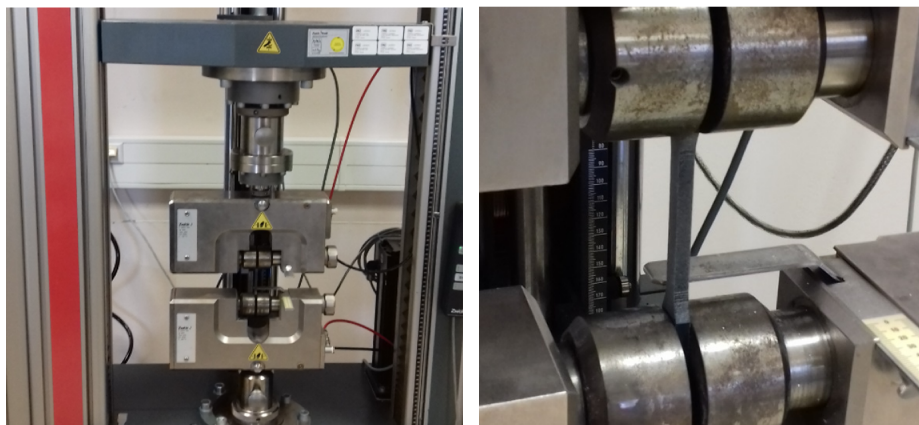


Figura 4.18: Início do Ensaio

4.2.3 Tratamento de resultados dos Ensaios

Após os ensaios foi possível retirar e observar os resultados de cada ensaio. Os resultados da máquina de ensaio de tração apresentam a carga aplicada em função da deformação.

Sabendo as dimensões da secção transversal dos provetes, foi calculada a tensão com seguinte equação:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Onde σ é a tensão, F é a força aplicada e A é a área da secção transversal do provete.

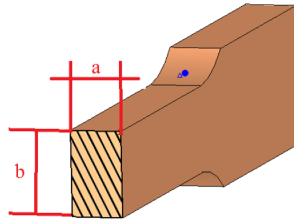


Figura 4.19: Secção do Provete

$$a = 5.2mm$$

$$b = 8.1mm$$

$$A = a \times b = 5.2 \times 8.1 = 42.12mm^2$$

Comparação de Resultados por Extensão-Tensão

Resultados dos Ensaios de Tração da Série 1

Na figura 4.20 é possível ver os resultados finais nos provetes da série 1.

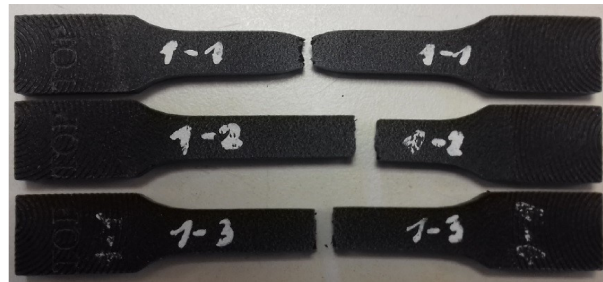


Figura 4.20: Série 1 de provetes

Pelos resultados obtidos pode-se verificar no gráfico da figura 4.21 que existem ligeiras diferenças tanto a nível de tensão no domínio plástico como a nível do comportamento depois da tensão de rotura. No provete 1-1 verifica-se o fenómeno de estrição pelo gráfico e pelo aspeto visual.

Com estes resultados conclui-se que a deformação elástica é idêntica nos 3 provetes e a tensão de rotura varia entre 56-60MPa.

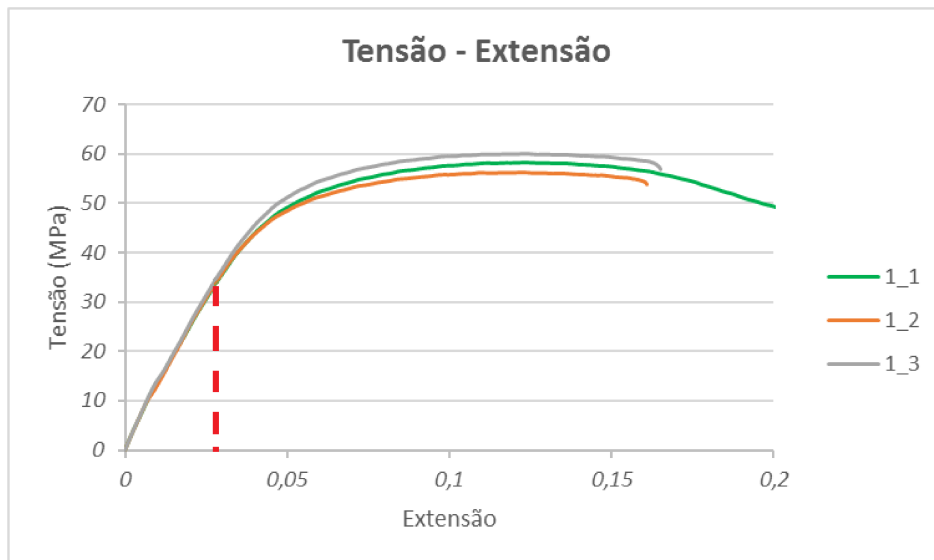


Figura 4.21: Gráfico dos resultados da Série 1 de provetes

Resultados dos Ensaios de Tração da Série 2

Na figura 4.22 é possível ver os resultados finais nos provetes da série 2.

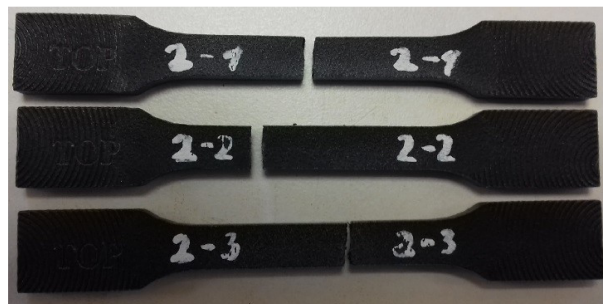


Figura 4.22: Série 2 de provetes

Pelos resultados obtidos no gráfico da figura 4.23 pode-se observar o comportamento, praticamente, idêntico nos provetes 2-2 e 2-3. O declive da zona elástica do provete 2-1 é ligeiramente mais baixo.

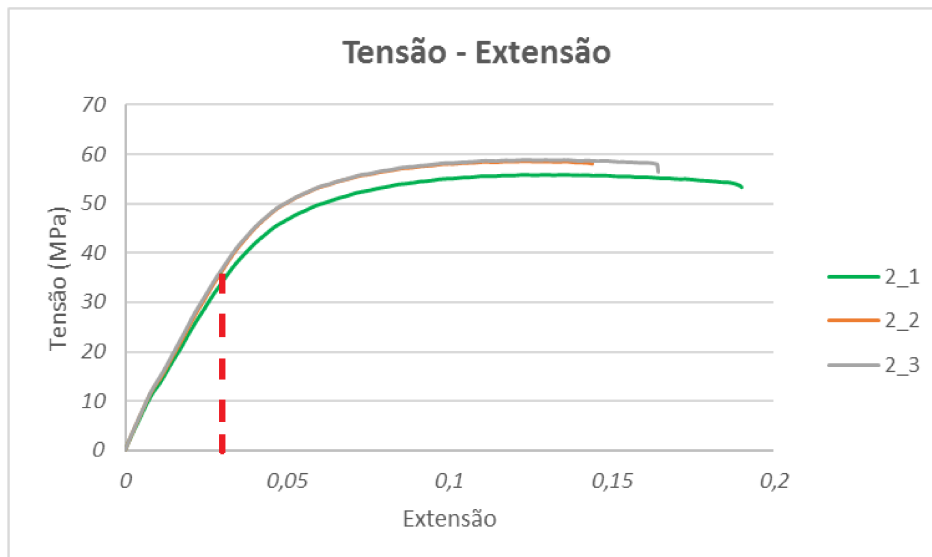


Figura 4.23: Gráfico dos resultados da Série 2 de provetes

Resultados dos Ensaio de Tração da Série 3

Na figura 4.24 é possível ver os resultados finais nos provetes da série 3.



Figura 4.24: Série 3 de provetes

No gráfico da figura 4.25, observa-se o comportamento elástico igual em todos os provetes da serie 3, tensões de rotura similares e diferenças na extensão. Os valores de rotura situam-se entre os 56-59MPa.

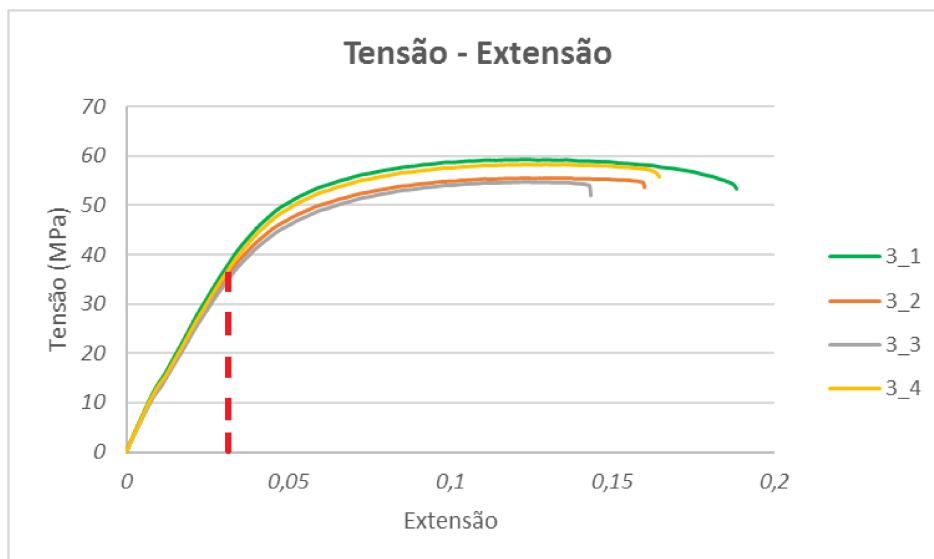


Figura 4.25: Gráfico dos resultados da Série 3 de provetes

Resultados dos Ensaios de Tração da Série 4

Na figura 4.26 é possível ver os resultados finais nos provetes da série 4.

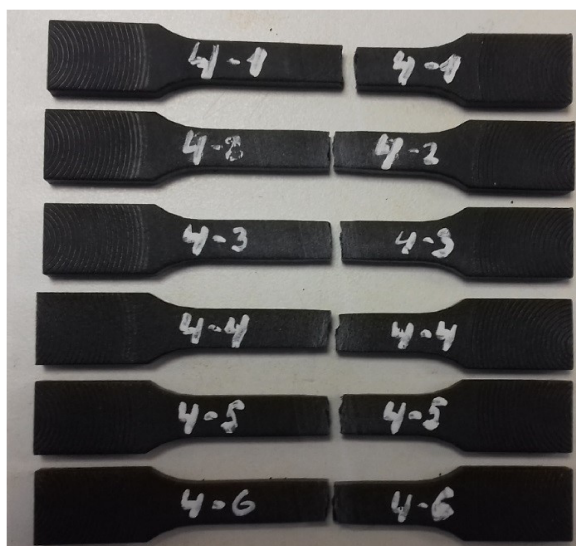


Figura 4.26: Série 4 de provetes

No gráfico da figura 4.27 é possível verificar que o provete 4-1 teve o comportamento anormal, os resultados não serão considerados, embora o comportamento elástico seja similar que nos outros cinco provetes. Quanto ao domínio plástico existe uma diferença considerável entre o provete 4-6 e 4-2. Os valores da tensão de rotura variam entre 55-63MPa.

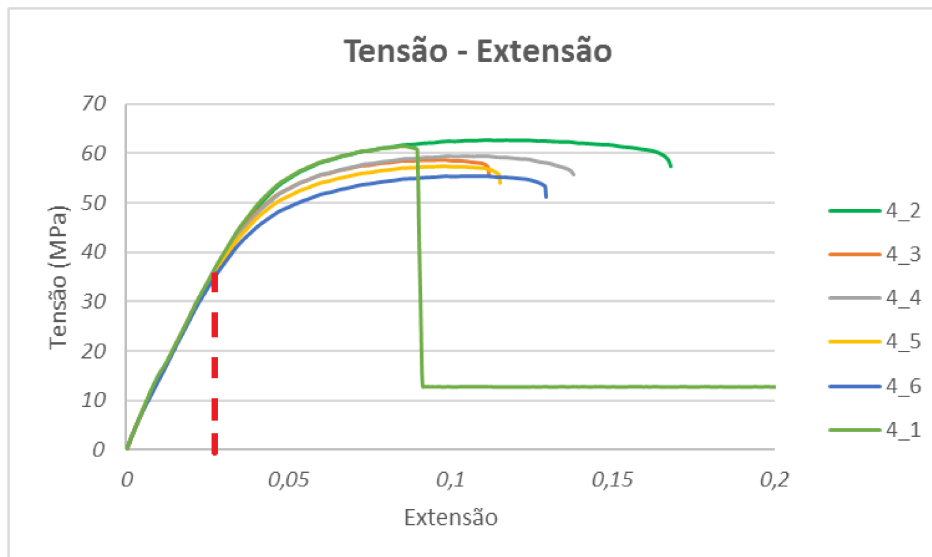


Figura 4.27: Gráfico dos resultados da Série 4 de provetes

Analisando os resultados obtidos de todos os provetes, considerou-se o valor de tensão máxima admissível de 35MPa para a otimização da peça nova. Este valor é o ponto da tensão de cedência do material.

Módulo de Elasticidade

Para obter o Módulo de Elasticidade de cada provete foram traçadas as linhas de tendência em cada gráfico para identificar os valores do mesmo como se pode ver no gráfico da figura 4.28. Os gráficos dos restantes provetes podem ser encontrados no anexo A.

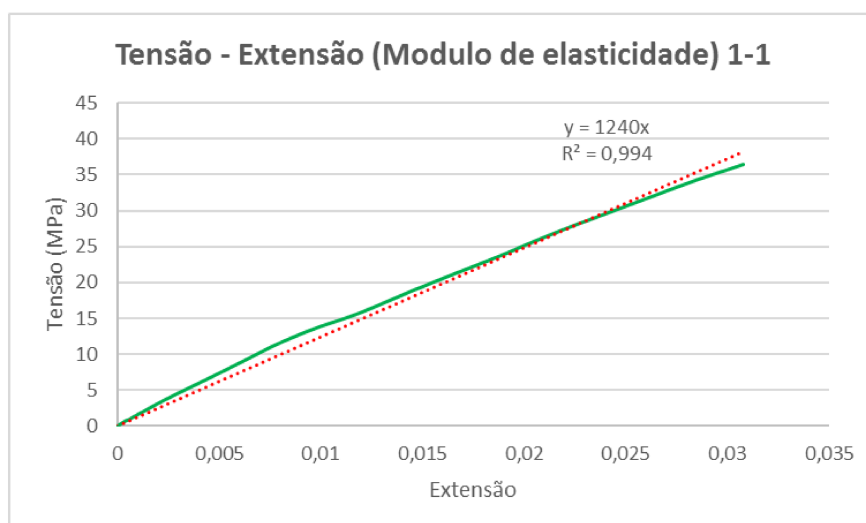


Figura 4.28: Módulo de Elasticidade do Provede 1-1

Na tabela 4.1 apresentam-se os resultados do cálculo do módulo de elasticidade e distorção de todos os provetes.

Tabela 4.1: Tabela de Módulo de Elasticidade e Distorção

x	Provetes tipo 1	E (MPa)	E medio (MPa)	Poisson	Desvio padrão
	1-1	1240	1.252,30	0,4	≈14,92
	1-2	1243,6			
	1-3	1273,3			
	Provetes tipo 2	E (MPa)	E medio (MPa)	Poisson	Desvio padrão
	2-1	1187,1	1.242,83	0,4	≈40,61
	2-2	1258,7			
2-3	1282,7				
y	Provetes tipo 3	E (MPa)	E medio (MPa)	Poisson	Desvio padrão
	3-1	1265,2	1.211,55	0,4	≈37,26
	3-2	1195,3			
	3-3	1163,6			
	3-4	1222,1			
z	Provetes tipo 4	E (MPa)	E medio (MPa)	Poisson	Desvio padrão
	4-1	1350,1	1.341,18	0,4	≈13,82
	4-2	1350,1			
	4-3	1361			
	4-4	1335,7			
	4-5	1339,1			
	4-6	1320			

Os módulos de distorção foram calculados com a seguinte equação para materiais anisotrópicos:

$$G_{ij} = \frac{\sqrt{E_{ii} \times E_{jj}}}{2 \times (1 + \sqrt{v_{ij} \times v_{ji}})}$$

Sendo:

$$E1 = 1252.30MPa$$

$$E2 = 1341.18Mpa$$

$$E3 = 1211.55Mpa$$

$$v = 0.4$$

Resultados:

$$G_{12} = \frac{\sqrt{1252.3 \times 1341.18}}{2 \times (1 + \sqrt{0.4 \times 0.4})} = 462.84MPa$$

$$G_{13} = \frac{\sqrt{1252.3 \times 1211.55}}{2 \times (1 + \sqrt{0.4 \times 0.4})} = 439.91MPa$$

$$G_{23} = \frac{\sqrt{1341.18 \times 1211.55}}{2 \times (1 + \sqrt{0.4 \times 0.4})} = 455.25MPa$$

Na tabela 3.1 são apresentados os valores do módulo de elasticidade do material PA12 retirados do *datasheet* da HP [10].

Sendo:

$$E1 = 1700MPa$$

$$E2 = 1700MPa$$

$$E3 = 1800Mpa$$

$$\nu = 0.4$$

Resultados:

$$G_{12} = \frac{\sqrt{1700 \times 1700}}{2 \times (1 + \sqrt{0.4 \times 0.4})} = 607.14MPa$$

$$G_{13} = \frac{\sqrt{1700 \times 1800}}{2 \times (1 + \sqrt{0.4 \times 0.4})} = 624.74MPa$$

$$G_{23} = \frac{\sqrt{1700 \times 1800}}{2 \times (1 + \sqrt{0.4 \times 0.4})} = 624.74MPa$$

4.3 Simulação numérica do objeto do caso de estudo

4.3.1 Simulação estrutural do material em estudo

Analisando as manilhas em aço, depois do ensaio de tração, concluiu-se que a zona crítica é a cavilha. Assim sendo, procedeu-se para o dimensionamento do diâmetro da cavilha, considerando as características do material novo e os resultados obtidos nos ensaios de tração das peças em aço.

Para dimensionar o diâmetro, foi utilizado o critério de cedência de Von Mises:

$$\frac{32}{\pi d^3} \times \sqrt{Mf^2 + 0.75Mt^2} \leq \sigma_{adm}$$

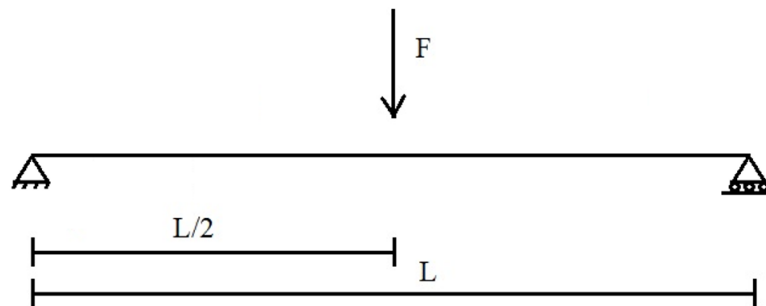


Figura 4.29: Solicitações da Cavilha

Onde:

$F = 6000N$ (força no ponto da tensão de cedência)

$L = 20mm$ (dimensão definida pelo autor)

$\sigma_{adm} = 35MPa$ (tensão de cedência dos provetes)

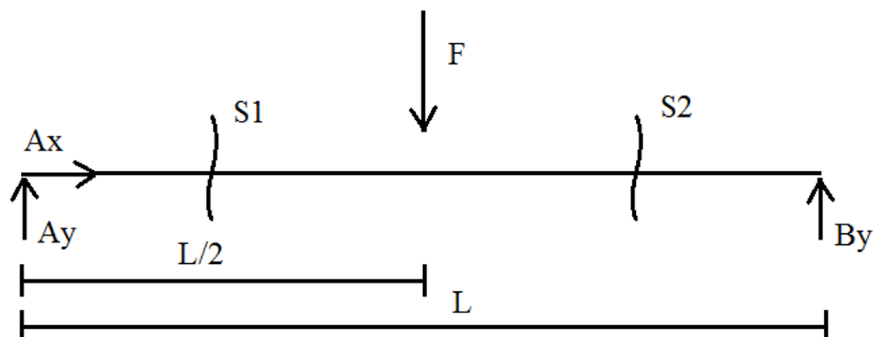


Figura 4.30: Diagrama de Corpo Livre

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum M = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Ax = 0 \\ Ay - F + By = 0 \\ -F \times \frac{L}{2} + By \times L = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Ay = F - By \\ By = \frac{F \times L}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} By = \frac{6000 \times 20}{2} \\ \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Ay = 6000 - 3000 \\ By = 3000 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Ax = 0 \\ Ay = 3000N \\ By = 3000N \end{cases}$$

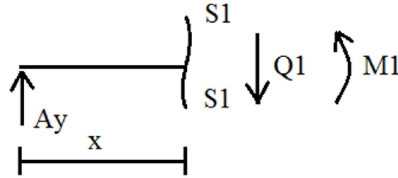


Figura 4.31: Secção 1

$$S1 \ S1 \ (0 \leq x \leq 10)$$

$$\begin{cases} F = 0 \\ M = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Ay - Q1 = 0 \\ M1 = -Q1 \times x = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Q1 = 3000 \\ M1 = -3000x \end{cases}$$

$$x = 0 \rightarrow M1 = 0$$

$$x = 10 \rightarrow M1 = -3000 \times 10 \Rightarrow M1 = -30000Nmm = -30Nm$$

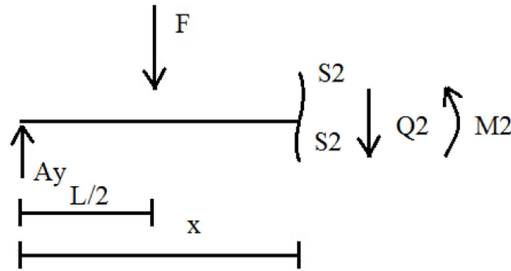


Figura 4.32: Secção 2

$$S2 \ S2 \ (10 \leq x \leq 20)$$

$$\begin{cases} F = 0 \\ M = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Ay - F - Q2 = 0 \\ M2 = -F \times \frac{L}{2} - Q2 \times x = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Q2 = Ay - F \\ \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q2 = 3000 - 6000 \\ \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Q2 = -3000 \\ M2 = -6000 \times 10 + 3000 \times x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M2 = -60000 + 3000 \times x \end{cases}$$

$$x = 10 \rightarrow M2 = -60000 + 3000 \times 10 \Rightarrow M2 = -30000Nmm = -30Nm$$

$$x = 20 \rightarrow M2 = -60000 + 3000 \times 20 \Rightarrow M2 = 0$$

Von Mises

$$\frac{32}{\pi d^3} \times \sqrt{Mf^2 + 0.75Mt^2} \leq \sigma_{adm}$$

$$\frac{32}{\pi d^3} \times \sqrt{-30^2 + 0} = 35 \times 10^6$$

$$d = 0,0206m = 20,6mm$$

Otimização nos softwares de simulação

Após concluída a modelação inicial do produto do caso de estudo, começou-se por otimizar a peça no software Autodesk Inventor 2018 como se pode ver na figura 4.33.



Figura 4.33: Peça do caso de estudo no Autodesk Inventor 2018

Com este software é possível escolher os parâmetros da geometria para poder alterá-los no separador da simulação. Na tabela 4.2 é possível ver a tabela dos parâmetros escolhidos.

Tabela 4.2: Tabela de seleção de parâmetros do Autodesk Inventor 2018

Select Parameters				
	Parameter Name	Unit	Equation	Nominal Value
Model Parameters				
<input type="checkbox"/>	d0	mm	44 mm	44,000
<input type="checkbox"/>	d1	mm	36,75 mm	36,750
<input type="checkbox"/>	d2	mm	36,75 mm	36,750
<input checked="" type="checkbox"/>	d3	mm	24 mm	24,000
<input type="checkbox"/>	d4	deg	0 deg	0,00
<input type="checkbox"/>	d5	deg	0 deg	0,00
<input checked="" type="checkbox"/>	d6	mm	35 mm	35,000
<input type="checkbox"/>	d7	mm	40,75 mm	40,750
	d8	mm	$d0 + d3$	68,000
<input type="checkbox"/>	d9	deg	0,0 deg	0,00
<input checked="" type="checkbox"/>	d11	mm	35 mm	35,000
<input type="checkbox"/>	d12	mm	40,75 mm	40,750
<input checked="" type="checkbox"/>	d15	mm	24 mm	24,000
	d16	mm	$d0 + d3$	68,000
<input type="checkbox"/>	d17	deg	0,0 deg	0,00
	d18	mm	$d0 - d3$	20,000
<input type="checkbox"/>	d19	deg	0,0 deg	0,00
<input checked="" type="checkbox"/>	d20	mm	2 mm	2,000
<input checked="" type="checkbox"/>	d23	mm	2 mm	2,000
	sa_0	N	0,000 N	0,000
	sa_1	N	6000 N	6000,000
	sa_2	N	0,000 N	0,000
User Parameters				

Onde:

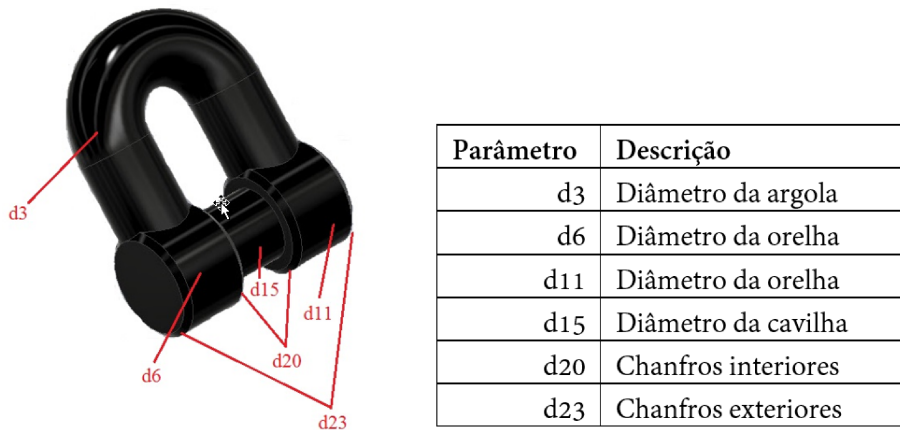


Figura 4.34: Parâmetros utilizados na peça do caso de estudo

Para as simulações da peça nova, foi criado o material PA12 com o comportamento isotrópico, considerando o valor do módulo de elasticidade mais baixo. A criação do material isotrópico foi devido à impossibilidade de usar os valores do material ortotrópico pelo software.

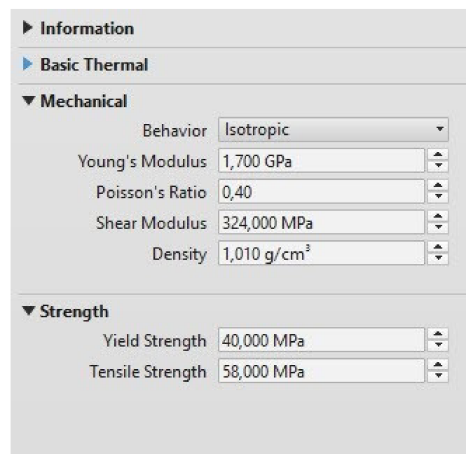


Figura 4.35: Dados do Material PA12

A figura 4.36 mostra a definição da carga de 6000N e os constrangimentos necessários.



Figura 4.36: Carga e constrangimentos

Assim procedeu-se à realização da simulação do objeto como se pode ver na figura 4.37.

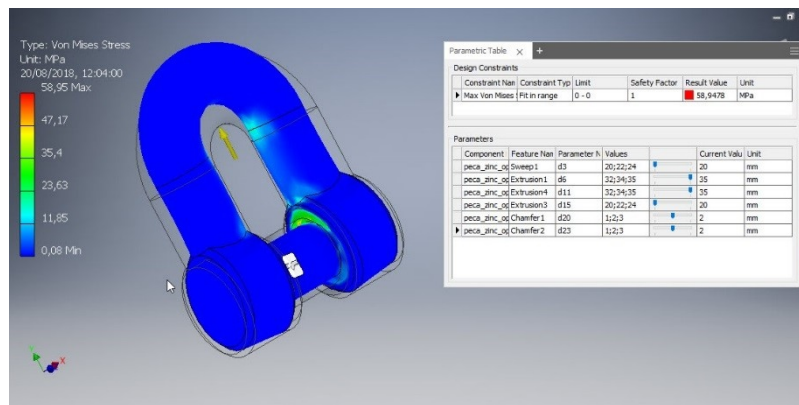


Figura 4.37: Simulação Autodesk 1

Alterando os parâmetros definidos anteriormente é possível obter vários resultados como por exemplo o que está na figura 4.38. Os resultados das restantes simulações encontram-se no anexo B

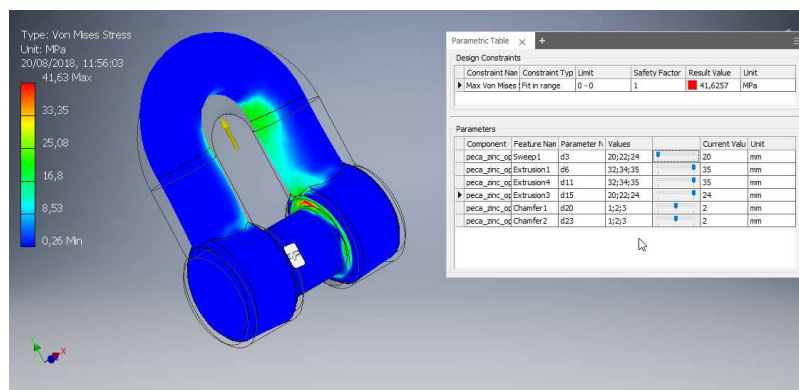


Figura 4.38: Simulação Autodesk 3

Na tabela 4.3 apresentam-se os resultados das simulações com diferentes parâmetros:

Tabela 4.3: Resultados das simulações

Parâmetros de otimização							
Nº	d3 (mm)	d6 (mm)	d11 (mm)	d15 (mm)	d20 (mm)	d23 (mm)	Tensao max (MPa)
1	20	35	35	20	2	2	58,94
2	20	35	35	22	2	2	53,16
3	20	35	35	24	2	2	41,62
4	20	34	34	24	2	2	47,49
5	20	34	34	24	3	3	52,73
6	20	35	35	24	1	1	46,39
7	22	35	35	20	2	2	41,86
8	22	35	35	22	2	2	41,14
9	22	35	35	22	1	1	49,19
10	22	35	35	22	3	3	47,91
11	22	35	35	24	2	2	42,35
12	24	35	35	24	1	1	46,62
13	24	35	35	24	2	2	47,93
14	24	35	35	24	3	3	48,08

Analisando os resultados verificou-se que os melhores resultados foram na simulação 8 e na simulação 3.

Devido a impossibilidade de inserir os dados do material ortotrópico no software, o seguinte passo foi avançar para o software Abaqus com o modelo da simulação 3.

A escolha deste modelo foi o facto de este ter as dimensões mais pequenas.

A otimização no Abaqus começou por inserir os parâmetros do material no software, como se pode ver na figura 4.39.

Elastic

Type:

Use temperature-dependent data

Number of field variables:

Moduli time scale (for viscoelasticity):

No compression

No tension

	E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
1	1700	1800	1700	0.4	0.4	0.4	624.74	607.14	624.74

Figura 4.39: Parâmetros do material no Abaqus

Foram aplicadas as três cargas de 2000N, no total de 6000N, como se pode ver na figura 4.40.

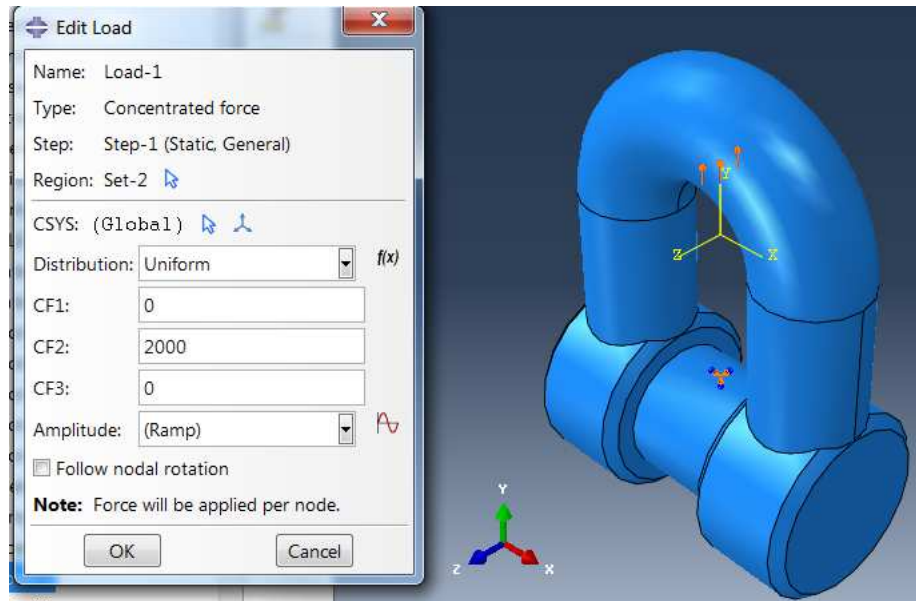


Figura 4.40: Carga no objeto no Abaqus

Na figura 4.41 mostra o resultado da simulação da peça nova com o $d_3=20\text{mm}$ e $d_{15}=24\text{mm}$. As tensões locais nos pontos de aplicação das cargas não estão consideradas. Estas estão apresentadas na figura 4.41.

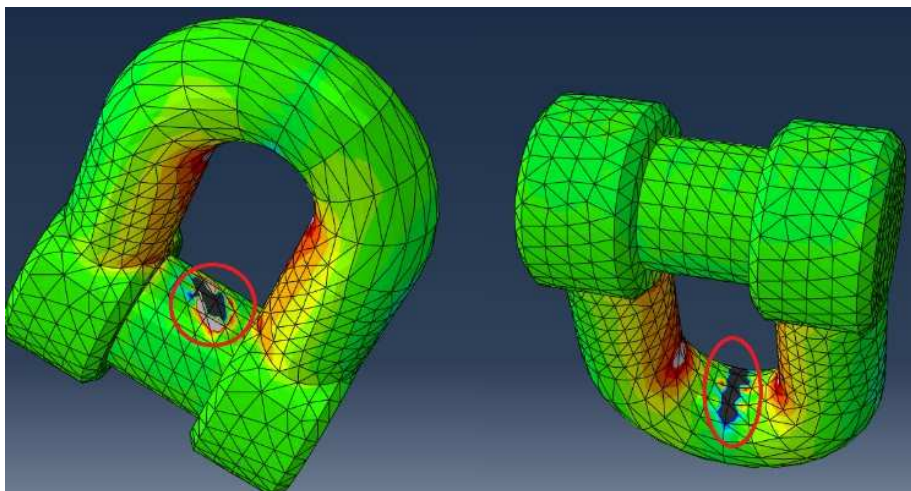


Figura 4.41: Tensões locais não consideradas

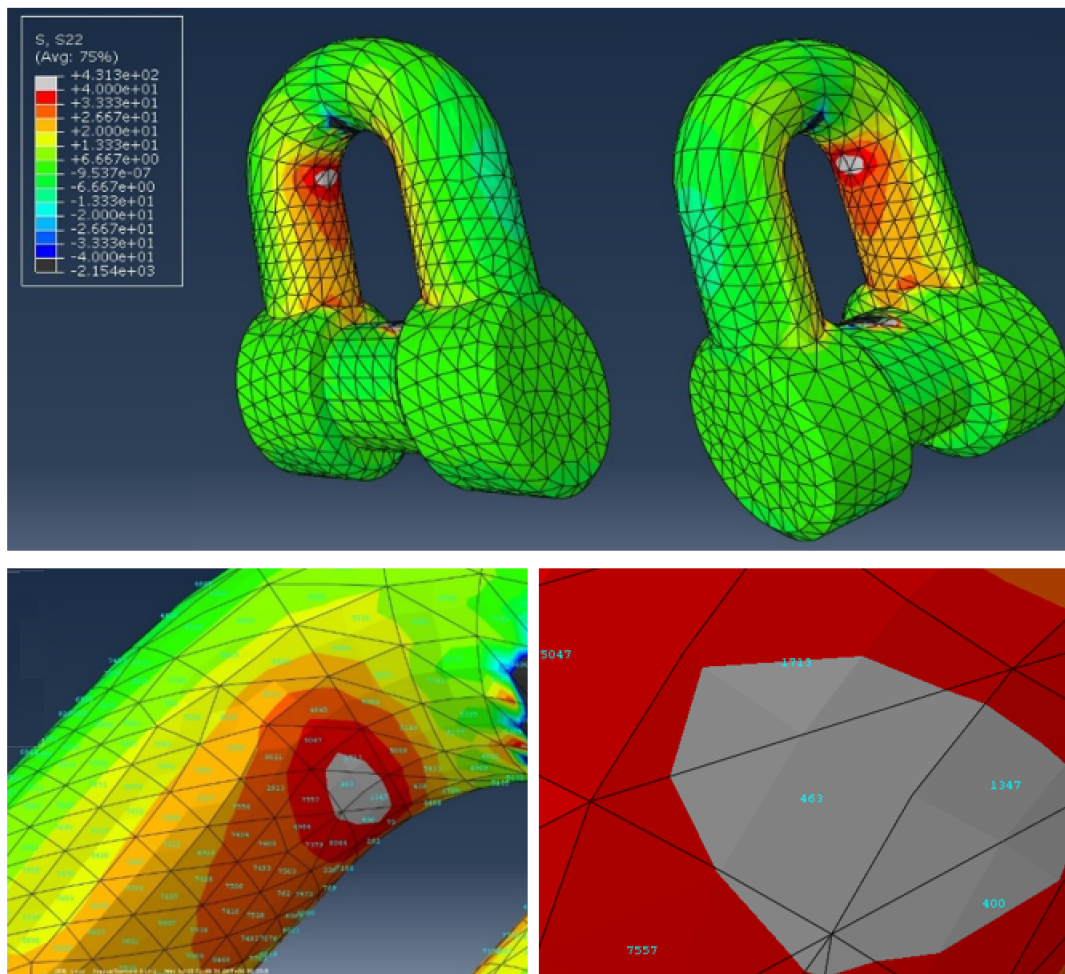


Figura 4.42: Simulação d3=20mm + Pormenores

Nos resultados obtidos, verifica-se que a tensão YY (S22) é maior que 35MPa na zona do raio da argola. O diâmetro da argola será aumentado para 22mm. Os valores dos elementos com maior tensão estão na figura 4.43.

Element Label	S, S11 @Loc 1	S, S22 @Loc 1	S, S33 @Loc 1
400	2.51260	38.0668	4.05265
463	2.97296	37.8692	4.26589
1713	5.26117	36.1235	5.30013
1347	4.25641	39.9603	5.51921
Maximum At Element	26.6635 5853	39.9603 1347	21.5272 1

Figura 4.43: Valores dos elementos com maior tensão d3=20mm

A figura 4.44 mostra o resultado da simulação com o $d_3=22\text{mm}$.

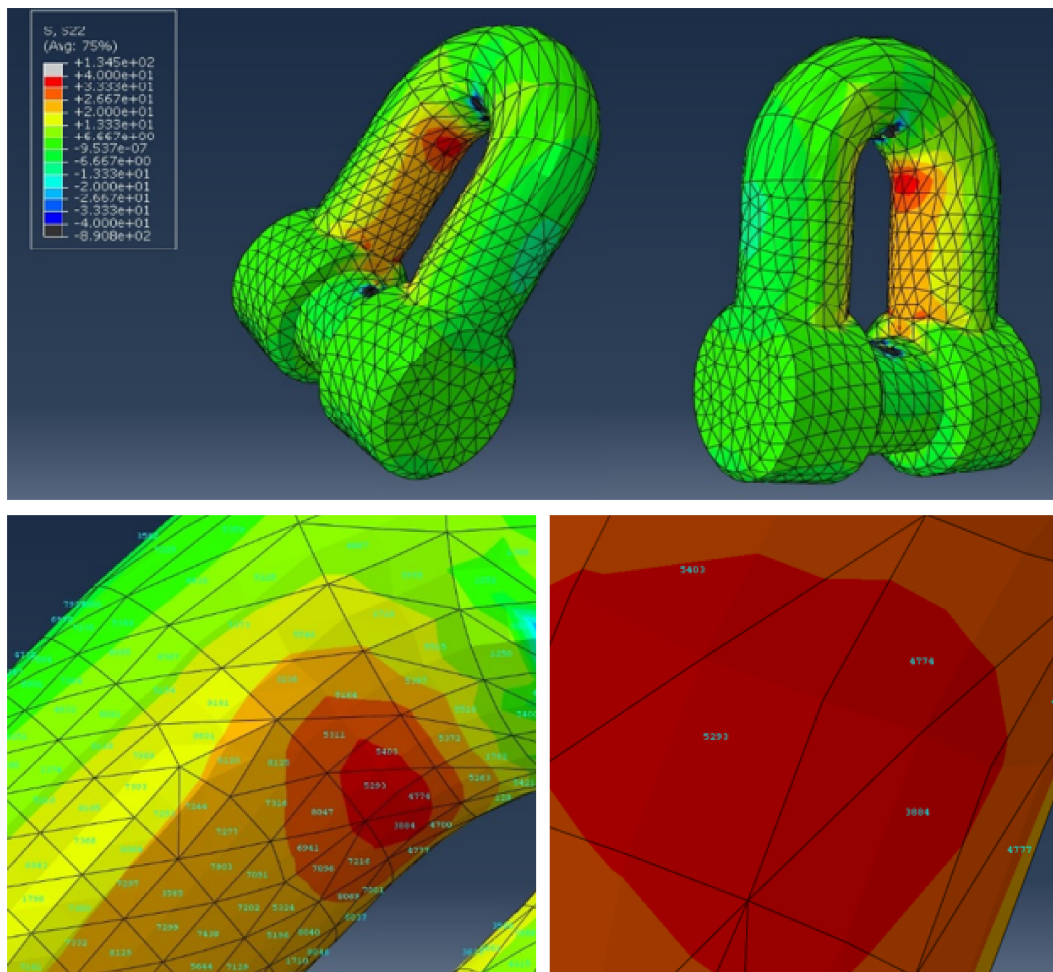


Figura 4.44: Simulação $d_3=22\text{mm}$ + Pormenores

Nos resultados apresentados verifica-se que a zona crítica da simulação anterior está melhor, mas está no limite dos 35MPa. Os resultados estão apresentados na figura 4.45. O diâmetro da argola será aumentado para os 24mm.

Element Label	S.S11 @Loc 1	S.S22 @Loc 1	S.S33 @Loc 1
3884	2.96757	31.8449	4.27440
4774	4.52194	32.2635	5.10054
5403	4.61754	30.9174	5.04885
5293	2.40890	32.9245	4.32482
Maximum At Element	24.0298 6013	32.9245 5293	10.4444 7789

Figura 4.45: Valores dos elementos com maior tensão $d_3=22\text{mm}$

A figura 4.46 mostra o resultado da simulação com o $D3=24\text{mm}$.

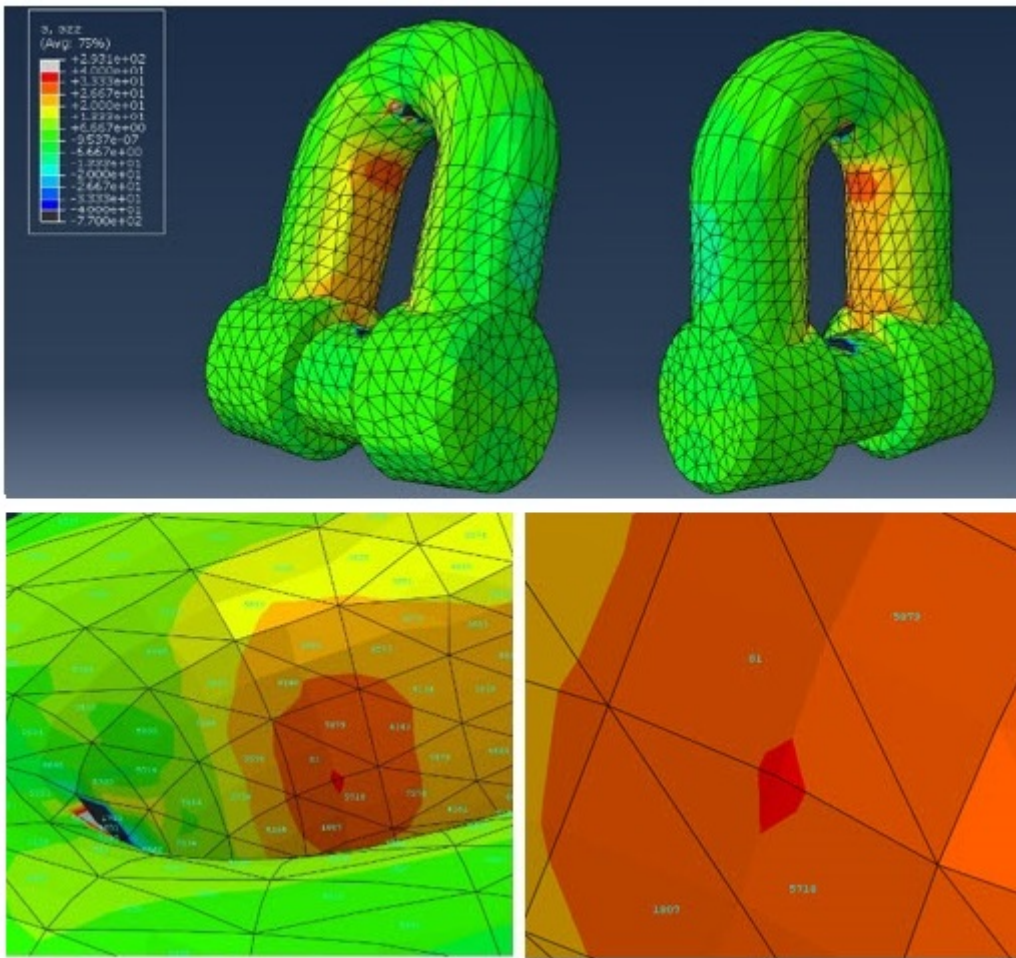


Figura 4.46: Simulação $d3=24\text{mm}$ + Pormenores

Com a alteração do diâmetro, a tensão YY (S22) na zona crítica está entre 28-29 MPa.

Element Label	S.511 @Loc 1	S.522 @Loc 1	S.533 @Loc 1
81	3.42701	28.2398	3.98659
4343	803.716E-03	24.5043	1.43176
5718	1.80381	29.0514	3.51485
5879	2.11398	27.5451	3.42279
Maximum At Element	24.0505 6298	29.0514 5718	6.23992 1736

Figura 4.47: Valores dos elementos com maior tensão $d3=24\text{mm}$

Após estes resultados, foi realizada a última simulação, mas desta vez com os dados das propriedades do PA12 obtidos nos ensaios de tração dos provetes.

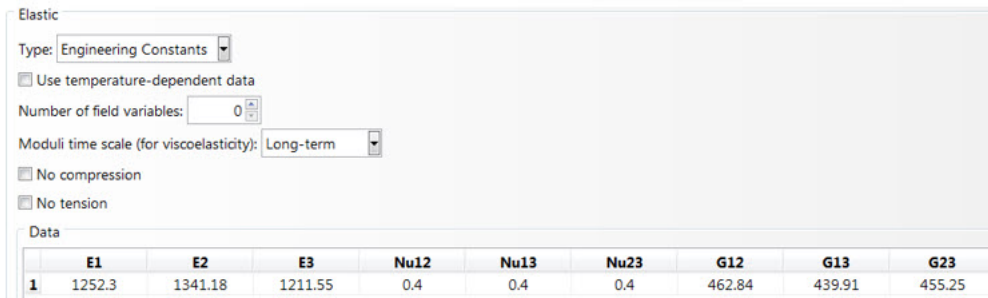


Figura 4.48: Parâmetros do material retirado dos ensaios de tração

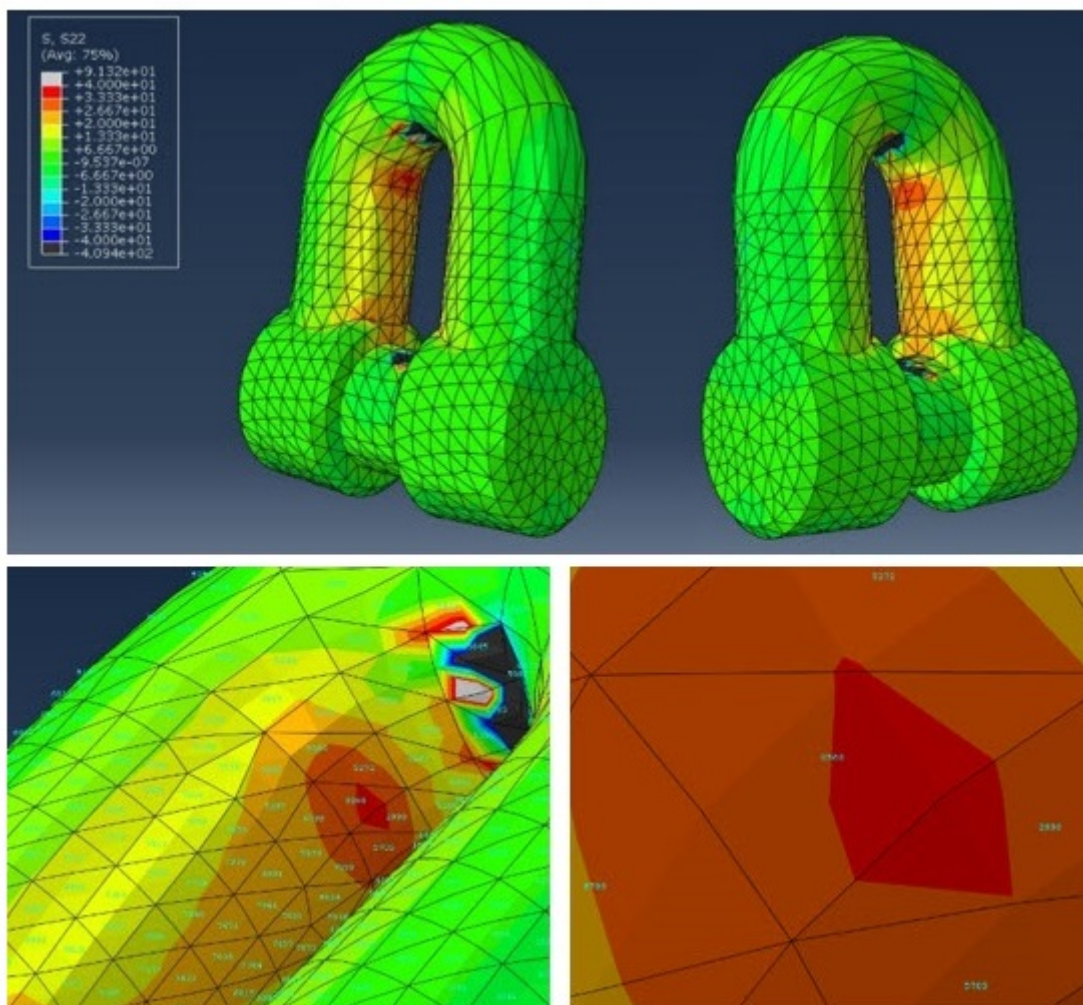


Figura 4.49: Simulação d3=24mm + Pormenores (PA12 ensaio prático)

Nesta simulação verificou-se que a diferença dos módulos de elasticidade e distorção do material não alterou os valores da tensão.

Element Label	S.S11 @Loc 1	S.S22 @Loc 1	S.S33 @Loc 1
2990	6.36161	27.6867	5.55096
5272	5.28946	26.4333	4.99130
5705	2.97600	26.9558	3.87934
8568	3.10609	29.0738	4.27042
Maximum At Element	21.3011 8791	29.0738 8568	6.32998 5830

Figura 4.50: Valores dos elementos com maior tensão d3=24mm (PA12 ensaio prático)

Capítulo 5

Caso de Estudo

5.1 Setup de Ensaio para o Caso de Estudo

Para fazer o ensaio de tração da peça otimizada, os acessórios utilizados nos ensaios anteriores foram substituídos. Esta substituição foi feita devido a diferença dimensional entre a peça inicial e a peça otimizada. A diferença dimensional entre as peças e os acessórios novos estão apresentados nas figuras 5.1 e 5.2 respectivamente

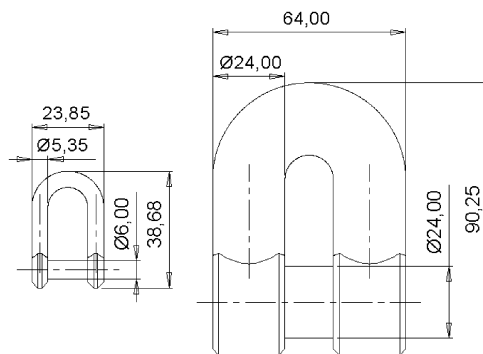


Figura 5.1: Diferença dimensional entre a peça inicial (esquerda) e a peça otimizada (direita)



Figura 5.2: Acessórios novos para o ensaio de tração final

5.2 Ensaio do Caso de Estudo

No ensaio final houve apenas uma peça disponível para o teste.

O ensaio foi realizado com os mesmos parâmetros que foram utilizados nos testes das peças em aço.

Pre-carga – 0.1MPa

Velocidade – 3mm/min



Figura 5.3: Ensaio de tração da peça otimizada

5.3 Tratamento de resultados

O gráfico em baixo mostra o resultado do ensaio de tração da peça otimizada feita em material PA12.

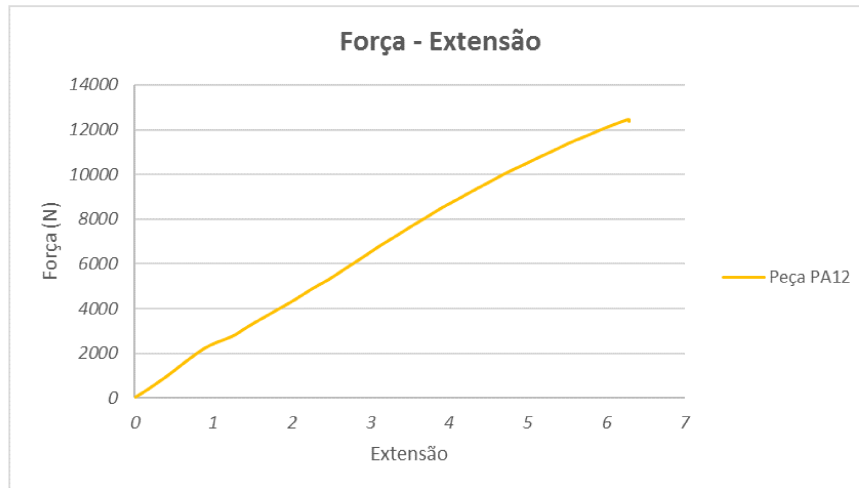


Figura 5.4: Gráfico do ensaio de tração da peça otimizada

Verifica-se a ausência da deformação plástica da peça.

A rutura ocorreu em várias zonas da peça, no final do domínio elástico, aos 12471N.

A força de rutura nas peças de aço varia entre 11000N e 13840N.

A figura 5.5 mostra a a peça otimizada depois do ensaio de tração.



Figura 5.5: Peça otimizada depois do ensaio de tração

Capítulo 6

Discussão de Resultados

No final do ensaio de tração da peça otimizada pode-se fazer uma comparação dos resultados entre a peça em aço e a peça otimizada em PA12.

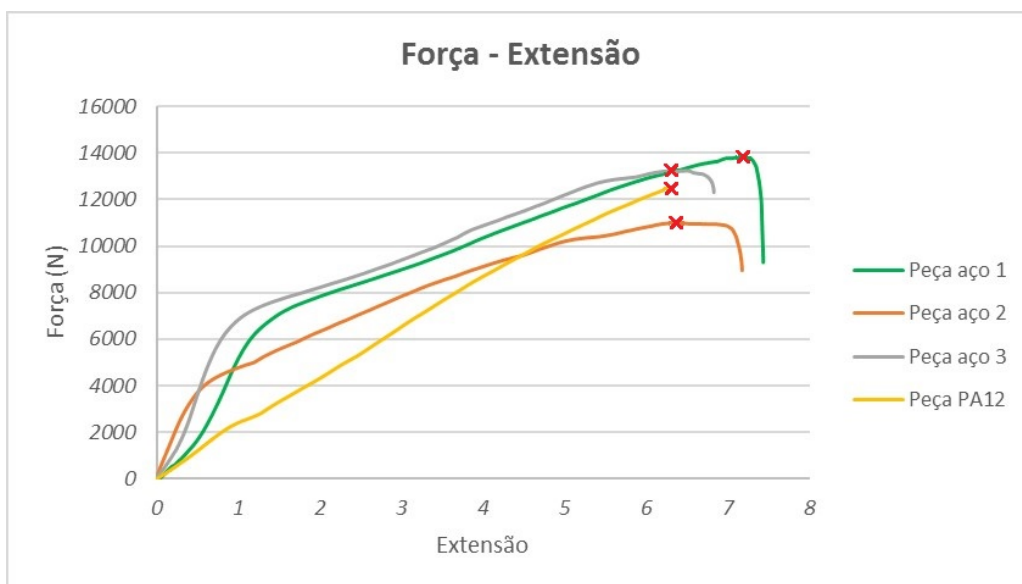


Figura 6.1: Comparação dos resultados entre peças originais com a peça otimizada

Na figura 6.1 verifica-se que a força de rutura nas peças em aço varia entre 11000N e 13840N.

Na peça otimizada em PA12 é 12471N. Contudo, o comportamento do material é bastante diferente. Nas peças em aço 1 e 3 existe uma deformação elástica até aos 6000N (no caso da peça 2 é 3800N), a partir da qual as peças deformavam-se plasticamente até a sua rutura. A peça em PA12 não sofreu qualquer deformação plástica, apenas deformou-se elasticamente até a rutura.

No ensaio dos provetes em PA12 o comportamento do material foi completamente diferente. Nos gráficos da figura 6.2 observa-se claramente o domínio elástico e domínio plástico.

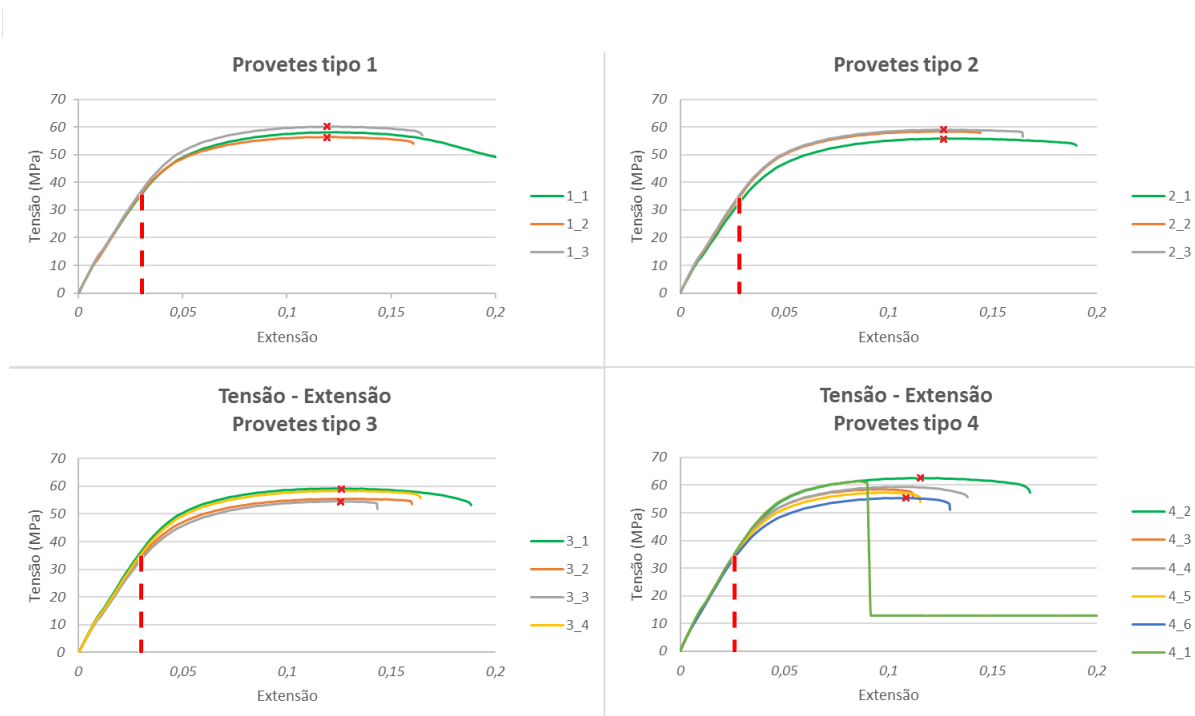


Figura 6.2: Resultados dos ensaios dos provetes

Nos quatro tipos de provetes testados, o valor da tensão de cedência é 35MPa. No entanto, a tensão de rutura varia entre 55-63MPa. A figura 6.3 mostra o fenómeno de estrição nos provetes 1-1 e 3-1.

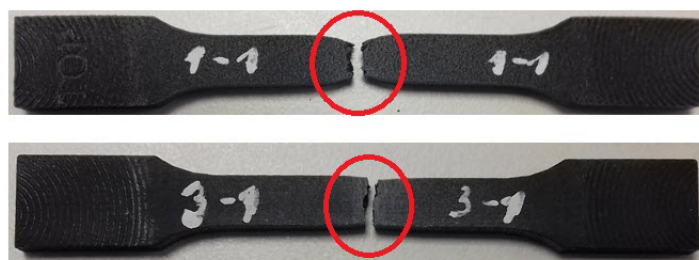


Figura 6.3: Provetes com o fenómeno de estrição

A figura 6.4 mostra a comparação entre a peça otimizada após o ensaio de tração e as zonas de tensão máxima obtidas na simulação numérica. A correspondência é de 80%, visto que uma das zonas de tensão máxima da simulação numérica não corresponde a rutura na peça otimizada. A inexistência do quinto ponto de rutura pode dever-se a eventual desequilíbrio no processo de ensaio de tração. A figura 6.5 mostra que a parte superior do setup garante o alinhamento correto devido a sua curvatura, enquanto a parte inferior pode ter o desvio transversal que influencia os locais das ruturas.

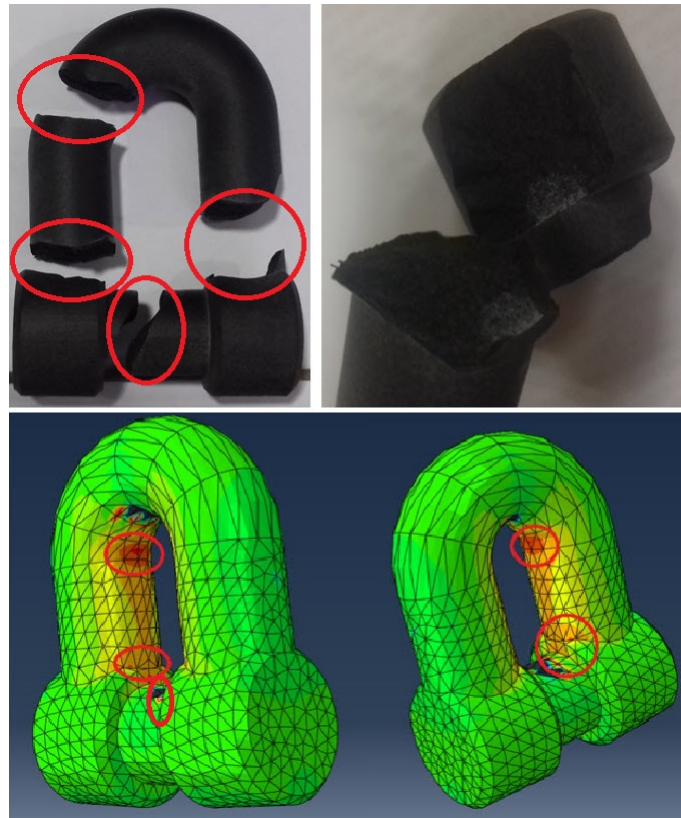


Figura 6.4: Comparação das zonas com maior tensão

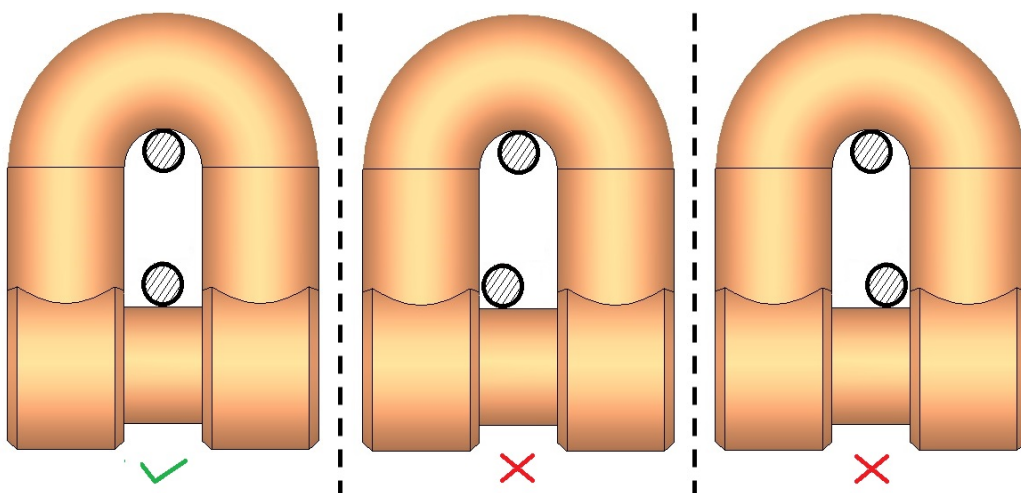


Figura 6.5: Alinhamento do setup do ensaio de tração

Capítulo 7

Conclusões

Neste projeto foi concretizada a possibilidade da substituição de uma peça metálica, feita por um processo de fabrico convencional, por uma peça em material polimérico, feita por processo aditivo.

O processo HP Multijet Fusion deixa um bom acabamento nas peças e a ligação entre as camadas é bastante resistente. No ensaio de tração, dos provetes, em PA12, concluiu-se que o comportamento ortotrópico com os valores do módulo de elasticidade em X e Z são praticamente idênticos (1252MPa e 1211MPa), em y obteve-se o valor de 1340MPa. São excelentes resultados para material do fabrico aditivo, embora são mais baixos em relação aos valores que constam no *datasheet* fornecido pela HP.

No ensaio de tração das peças metálicas obtiveram-se os valores reais das cargas que as peças suportam. Em duas das três peças, a força da rutura chegou aos valores acima dos 13000N, 1325kg. O valor considerado para processo da otimização da carga é de 600kg, a partir da qual as peças começavam a deformar-se plasticamente. É de salientar que o fabricante das peças metálicas indica que a carga máxima admissível é de 100kg.

No processo da otimização da peça, foram utilizados os dados obtidos nos ensaios de tração dos provetes e das peças metálicas, carga máxima que a peça metálica suporta até começar a deformar-se plasticamente, e as propriedades do material novo (PA12).

O critério principal foi manter o aspeto visual da peça original.

Como a troca é do material metálico pelo material polimérico, com as propriedades mecânicas muito diferentes, esperava-se que a peça otimizada fosse muito maior que a peça original.

Na otimização concluiu-se que tendo em conta as solicitações da peça metálica, o diâmetro de secção na peça em PA12 tem de aumentar para os 24mm. O diâmetro da peça metálica é de 6mm.

No ensaio de tração da peça otimizada, a força de rutura atingiu o valor de 12471N. Comparando-o com os valores das forças de rutura das peças em aço (11000N e 13840N),

concluiu-se que a peça otimizada tem capacidade para suportar a mesma carga. Contudo, a peça otimizada não sofre a deformação plástica até a sua ruptura, quando as peças em aço começavam a deformar-se plasticamente a partir dos 6000N.

Este tipo de comportamento do material PA12 não foi esperado porque os provetes do mesmo deformaram elasticamente e plasticamente. Deveria de haver pelo menos mais um teste, em mais duas peças novas, para verificar a existência de alguma diferença no comportamento do material.

Neste trabalho, mostra-se que é possível substituir as peças metálicas com capacidade estrutural, por peças produzidas na HP Multi Jet Fusion. No entanto, é necessário alterar a geometria devido à diferença de propriedades entre os materiais metálicos e poliméricos.

Como trabalhos futuros, podem realizar-se mais ensaios experimentais para otimização da geometria da peça ou mesmo a utilização de abordagem de design generativo.

Bibliografia

- [1] 3Faktur. HP Multi Jet Fusion Technology Overview - 3Faktur. <https://3faktur.com/en/3d-printing-materials-technologies/hp-multi-jet-fusion-technology-overview/#1486035768388-4184bc65-d700>. Online, acessado em 2018-09-08.
- [2] Abaqus CAE. Abaqus CAE - SIMULA™ by Dassault Systèmes®. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/abaquscae/>. Online, acessado em 2018-09-11.
- [3] Ramada Aços. Special steel solutions. http://www.ramada.pt/ficheiros_upload/ramada-aa-os_catalogo170316130332.pdf. Online, acessado em 2018-09-08.
- [4] Additively. Binder Jetting - Additively. <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting#read-advantages>. Online, acessado em 2018-08-28.
- [5] Additively. Laser Sintering - Additively. <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-sintering#read-more>. Online, acessado em 2018-08-28.
- [6] Américo Costa. *Autodesk Inventor - Curso Completo*. FCA, 2ª edição edition, 2008.
- [7] Philippe R. B. Devloo(. A Linguagem da Ciência # 4, maio de 2005. Technical report. Online, acessado em 2018-09-08.
- [8] Formlabs. An Introductory Guide to SLS 3D Printing | Formlabs. <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>. Online, acessado em 2018-08-24.
- [9] EOS GmbH. EOS Industrial 3D printing - Process, method and benefits. https://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested. Online, acessado em 2018-08-24.
- [10] HP. HP 3D High Reusability PA 12 . <http://h20195.www2.hp.com/v2/getpdf.aspx/4AA6-4895EEP.pdf>. Online, acessado em 2018-09-09.

- [11] HP. HP 3D Printers and Printing Solution | HP® Official Site. <http://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers.html>. Online, acedido em 2018-09-08.
- [12] HP. HP 3D High Reusability PA 12 Strong, lowest cost,1 quality parts Picture taken after graphite post-processing. Technical report, 2017.
- [13] Materialise. Multi Jet Fusion | MJF | 3D Printing at Materialise. <https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/multi-jet-fusion>. Online, acedido em 2018-09-06.
- [14] Poliversal. POLIAMIDA. <http://www.poliversal.pt/pt/produtos/os-plasticos/poliamida-119.html>. Online, acedido em 2018-09-09.
- [15] Pedro; Pombinha, Marco ; Leite, and Cenfim. O fabrico aditivo e a impressão 3D. http://www.cenfim.pt/boletins/2017/61/fabrico_aditivo.pdf, 2017.
- [16] Ben Redwood, Filemon Schöffner, and Brian Garret. The 3D Printing Handbook. In *The 3D Printing Handbook*, chapter Powder Bed Fusion (Polymers) - SLS, pages 73–92. 3D HUBS, 2018.
- [17] Ben Redwood, Filemon Schöffner, and Brian Garret. The 3D Printing Handbook. In *The 3D Printing Handbook*, chapter Binder Jetting, pages 111–122. 3D HUBS, 2018.
- [18] William F. Smith. *Principios de ciencia e engenharia de materiais*. McGraw-Hill, 3ª edição edition.
- [19] UNICAMP. Organização da Aula 33. http://www.fem.unicamp.br/em421/semII-1996/aulas_resumo/aula33.htm. Online, acedido em 2018-09-08.

Anexo

.1 Anexo A

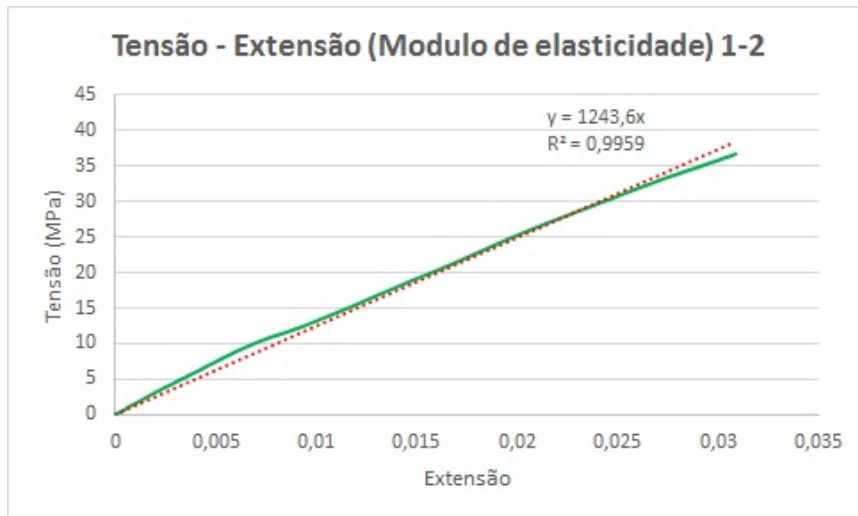


Figura 1: Módulo de Elasticidade do Provete 1-2

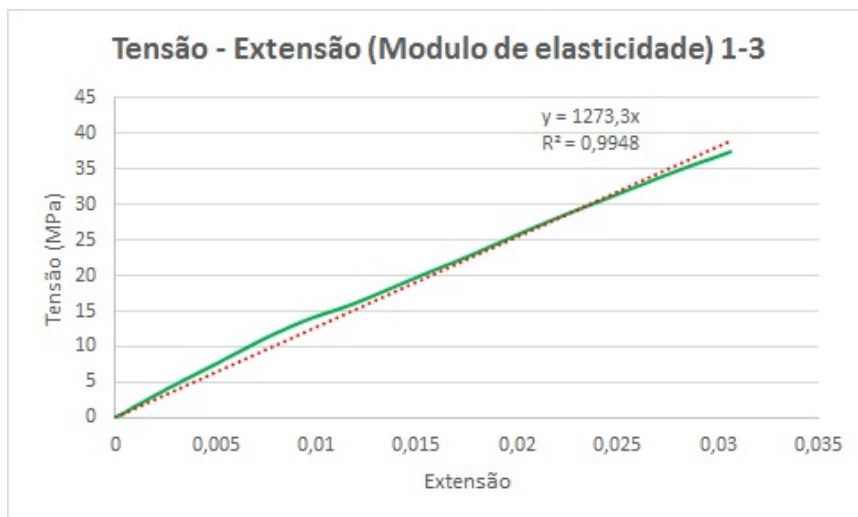


Figura 2: Módulo de Elasticidade do Provete 1-3

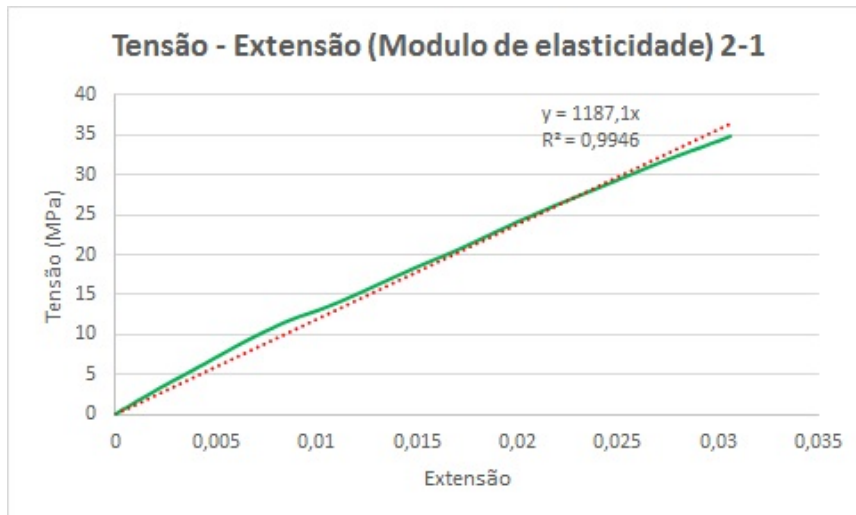


Figura 3: Módulo de Elasticidade do Provete 2-1

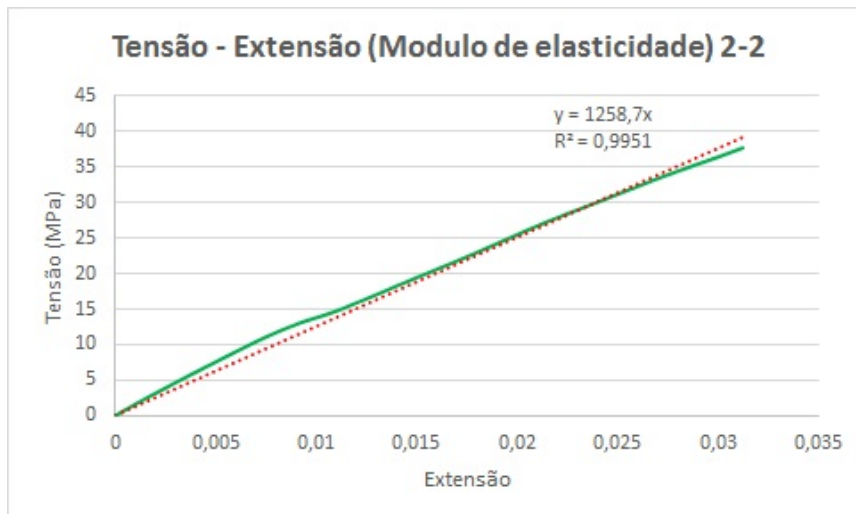


Figura 4: Módulo de Elasticidade do Provete 2-2

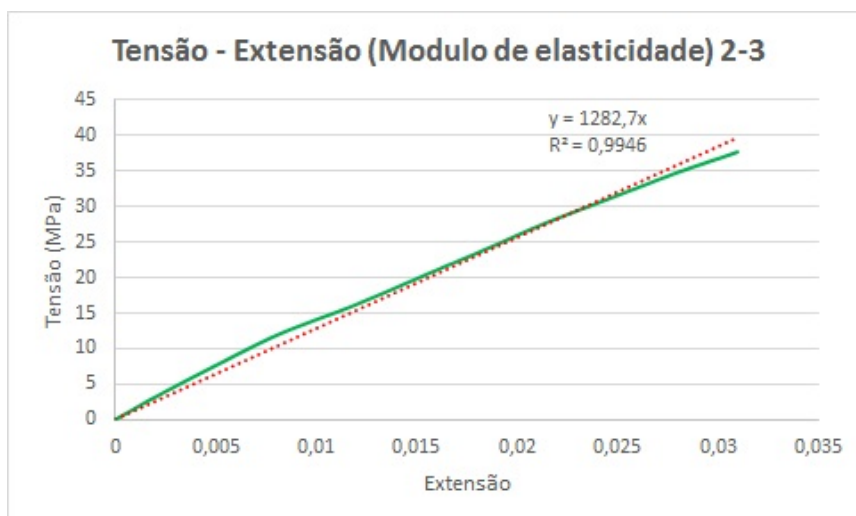


Figura 5: Módulo de Elasticidade do Provete 2-3

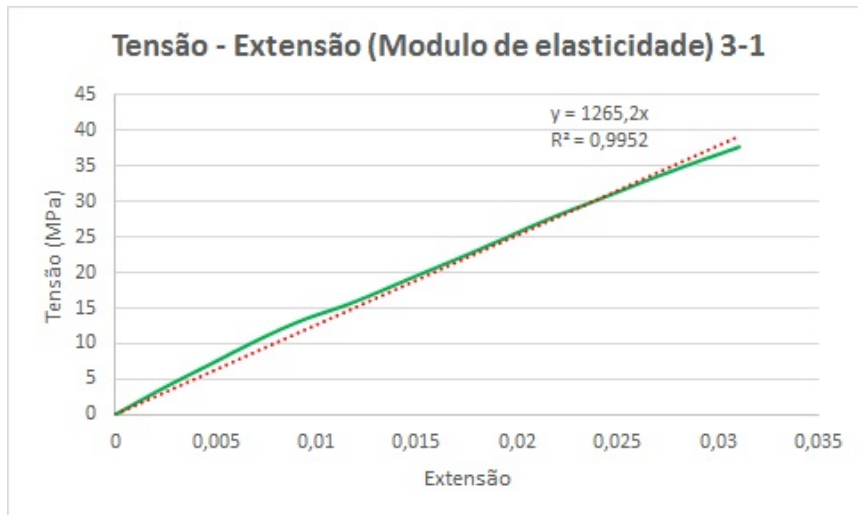


Figura 6: Módulo de Elasticidade do Provete 3-1

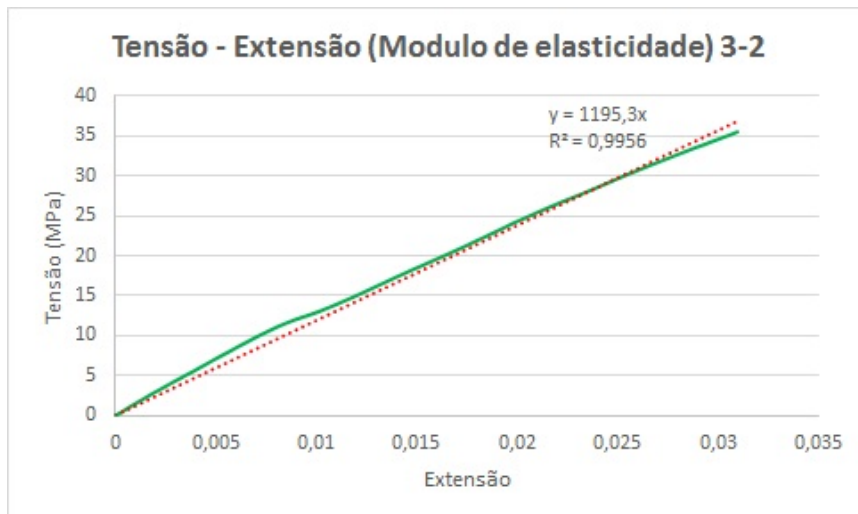


Figura 7: Módulo de Elasticidade do Provete 3-2

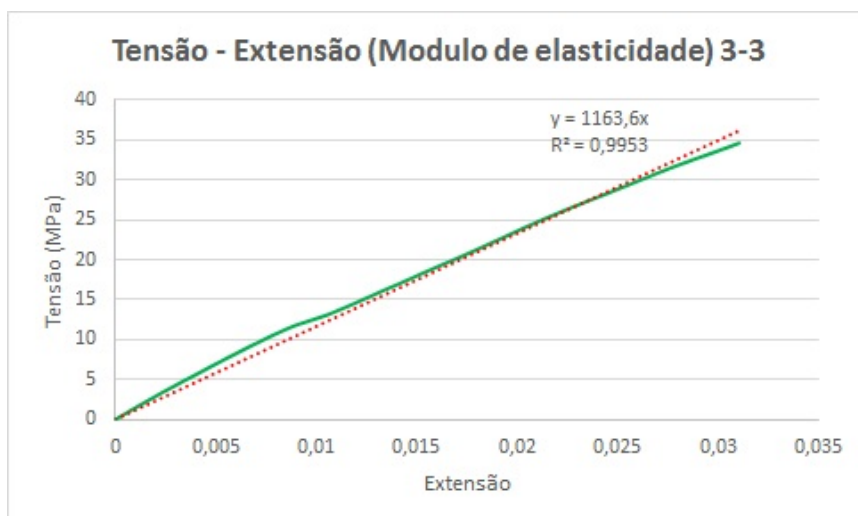


Figura 8: Módulo de Elasticidade do Provete 3-3

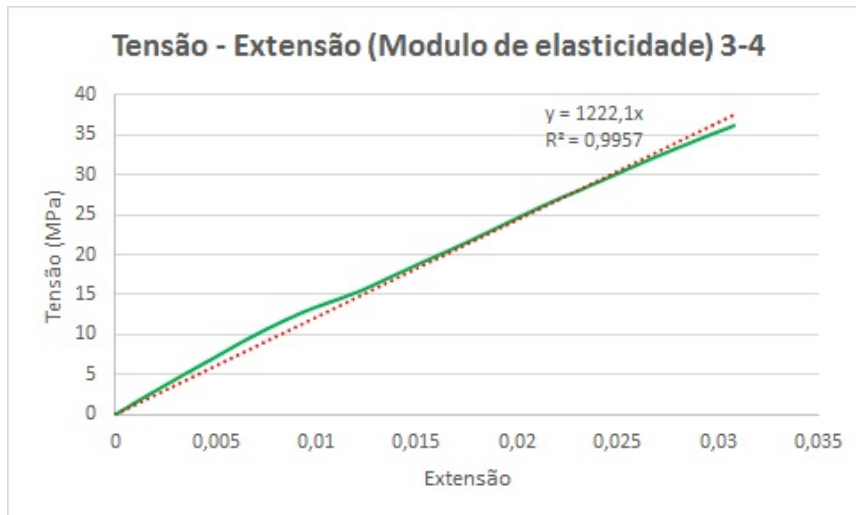


Figura 9: Módulo de Elasticidade do Provete 3-4

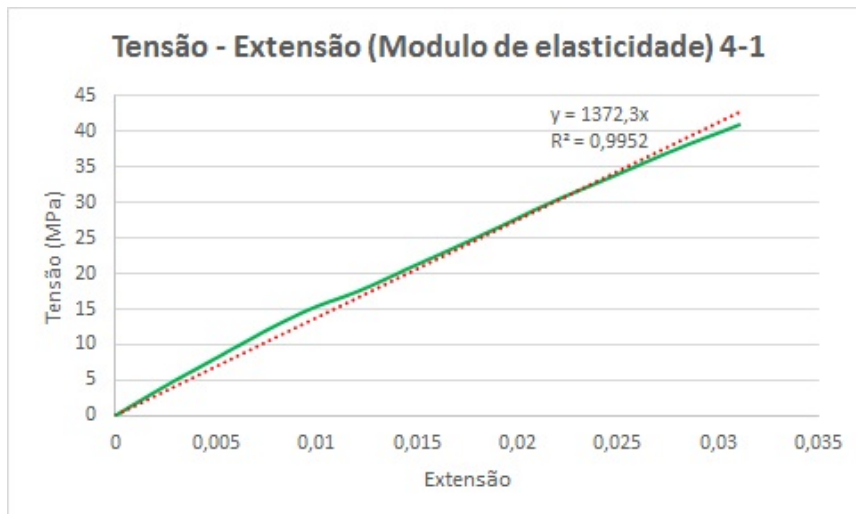


Figura 10: Módulo de Elasticidade do Provete 4-1

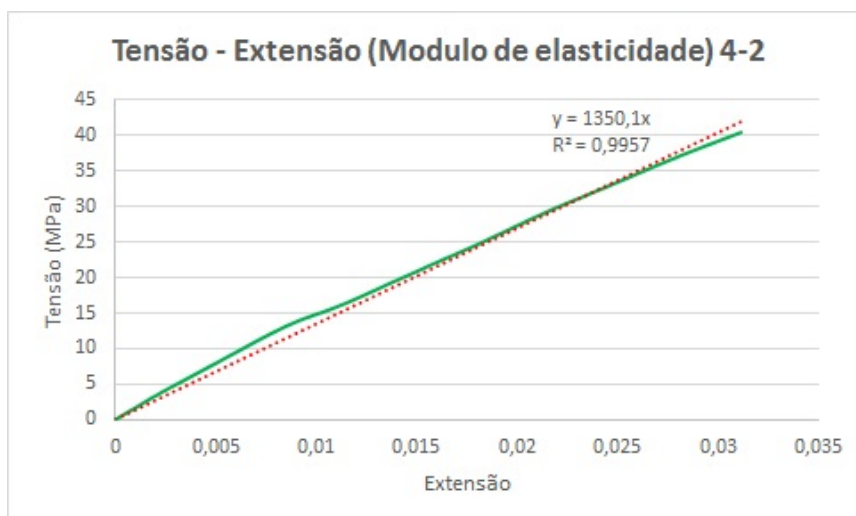


Figura 11: Módulo de Elasticidade do Provete 4-2

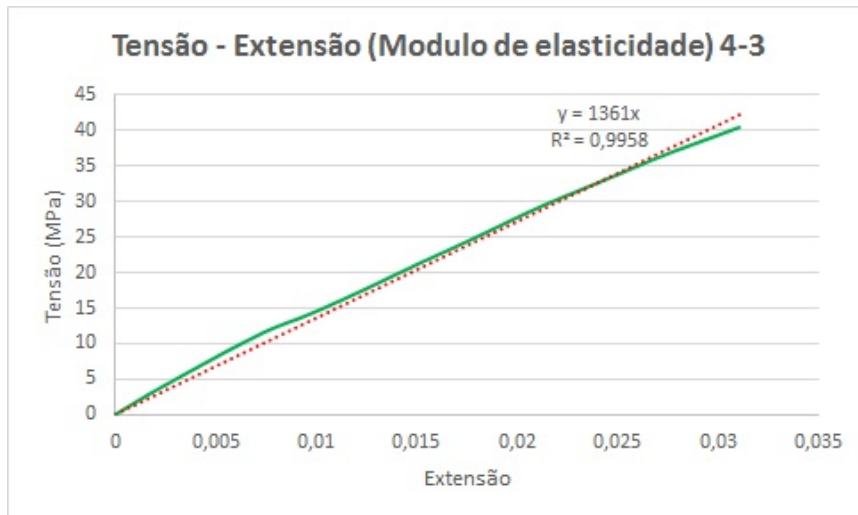


Figura 12: Módulo de Elasticidade do Provete 4-3

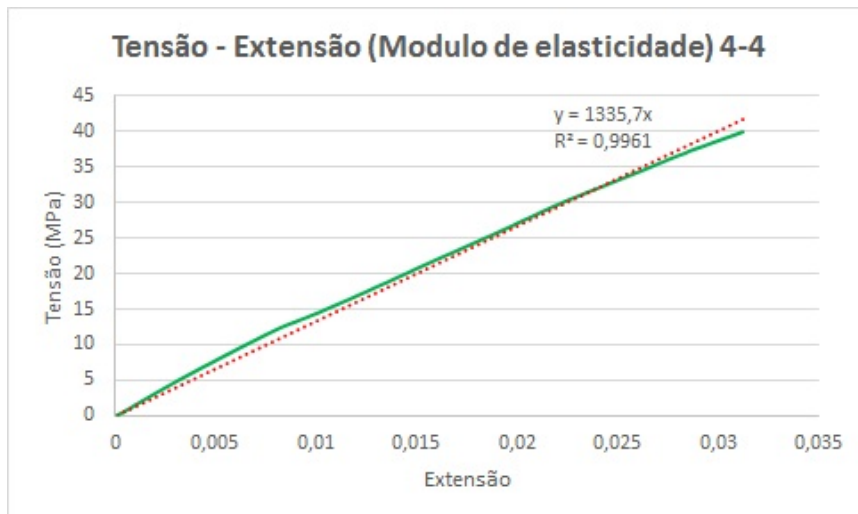


Figura 13: Módulo de Elasticidade do Provete 4-4

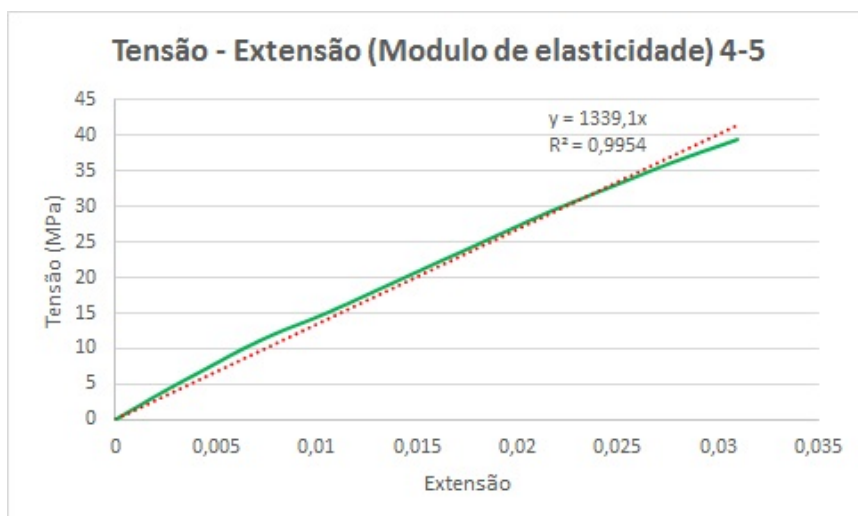


Figura 14: Módulo de Elasticidade do Provete 4-5

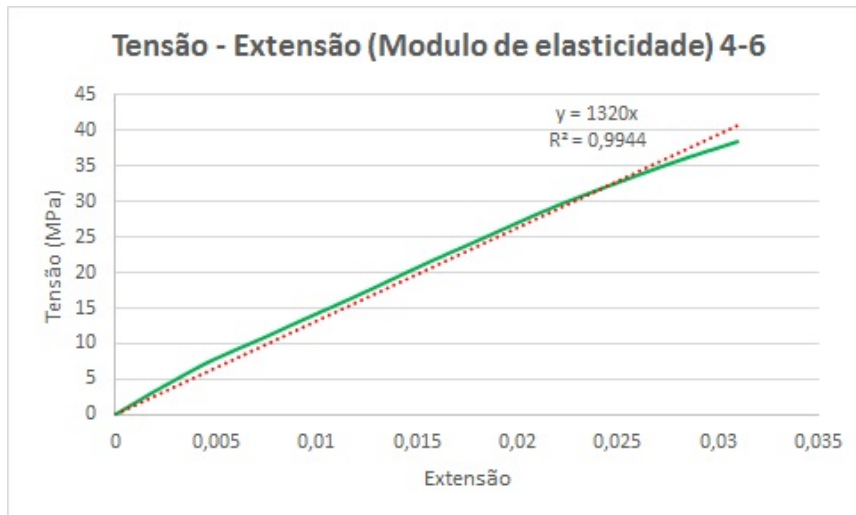


Figura 15: Módulo de Elasticidade do Provete 4-6

.2 Anexo B

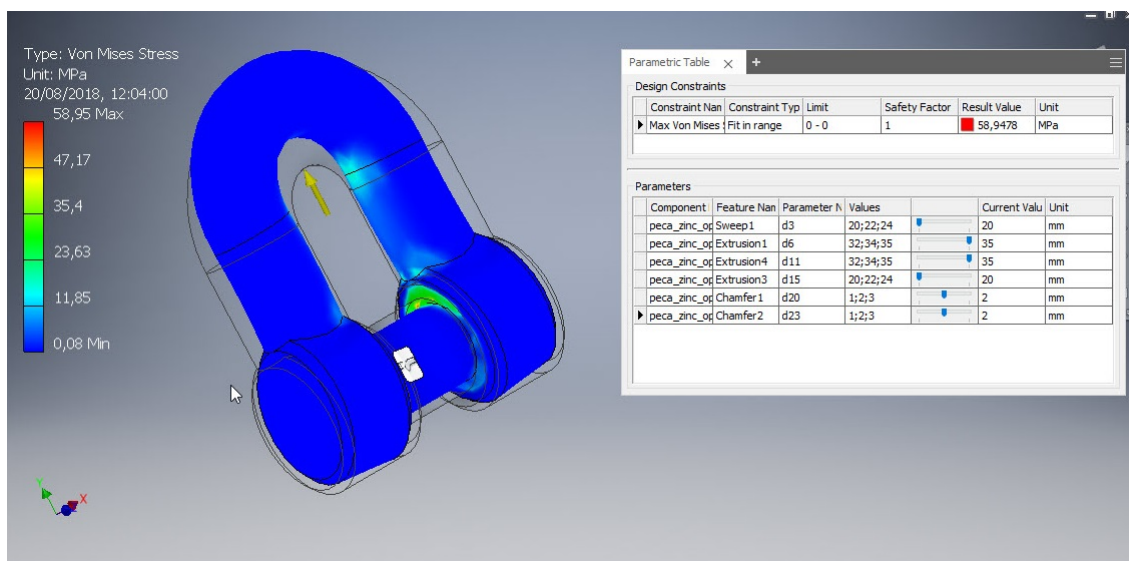


Figura 16: Simulação Autodesk 1

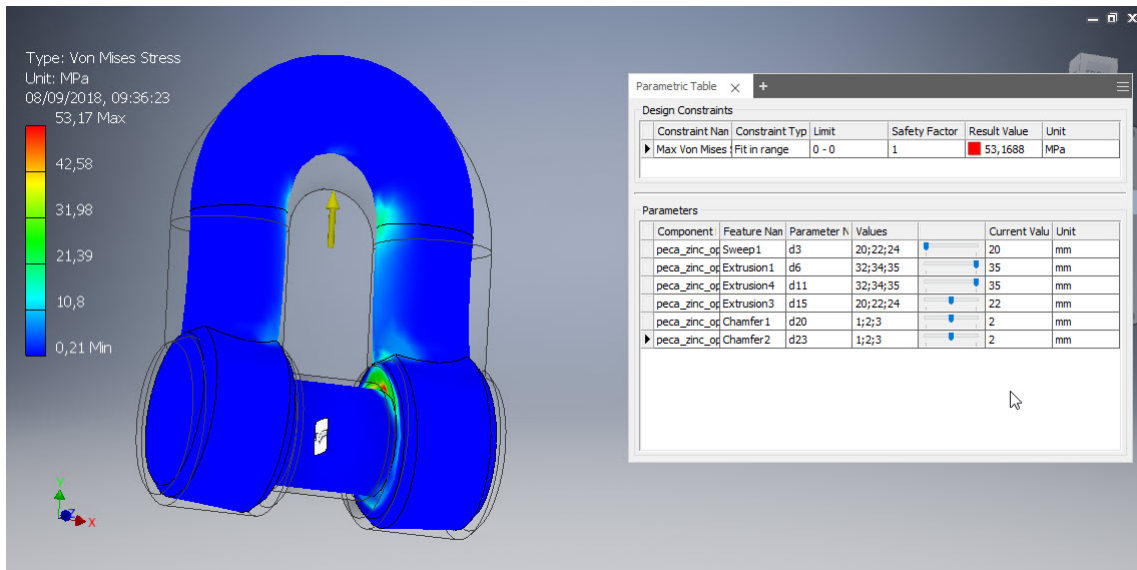


Figura 17: Simulação Autodesk 2

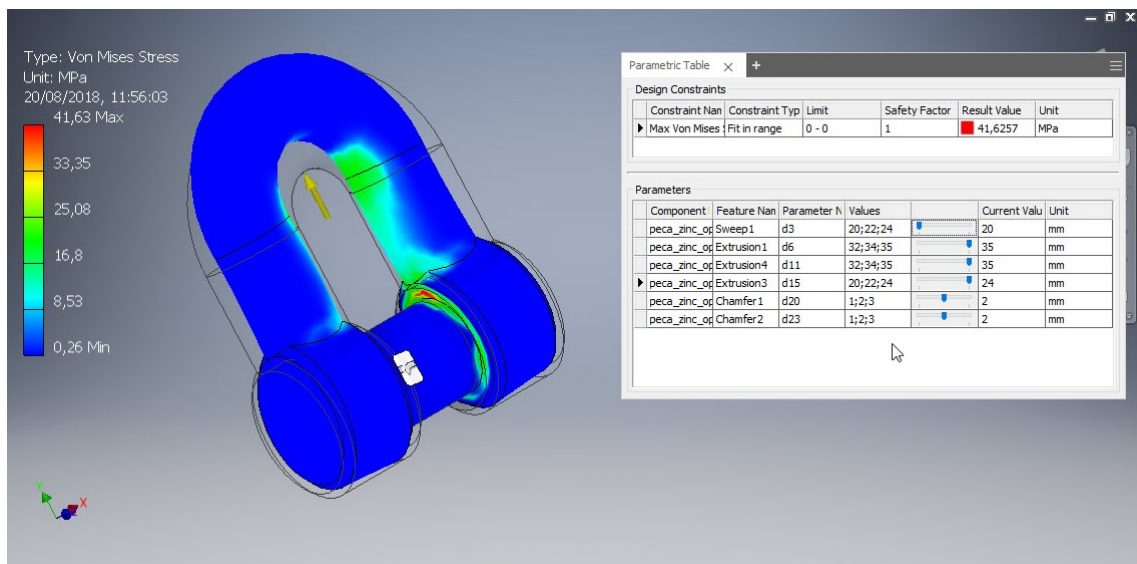


Figura 18: Simulação Autodesk 3

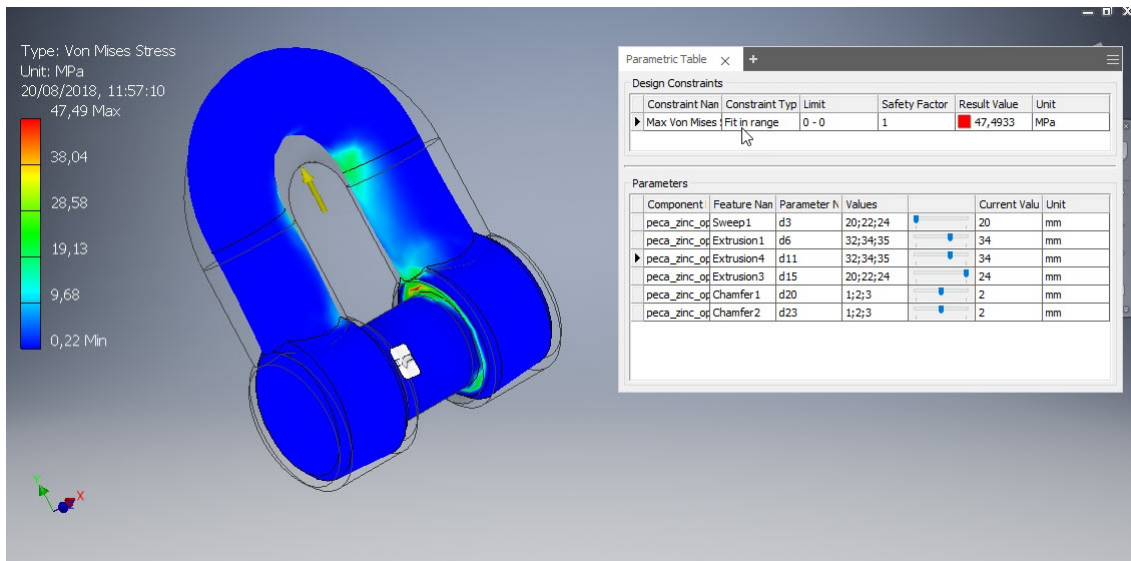


Figura 19: Simulação Autodesk 4

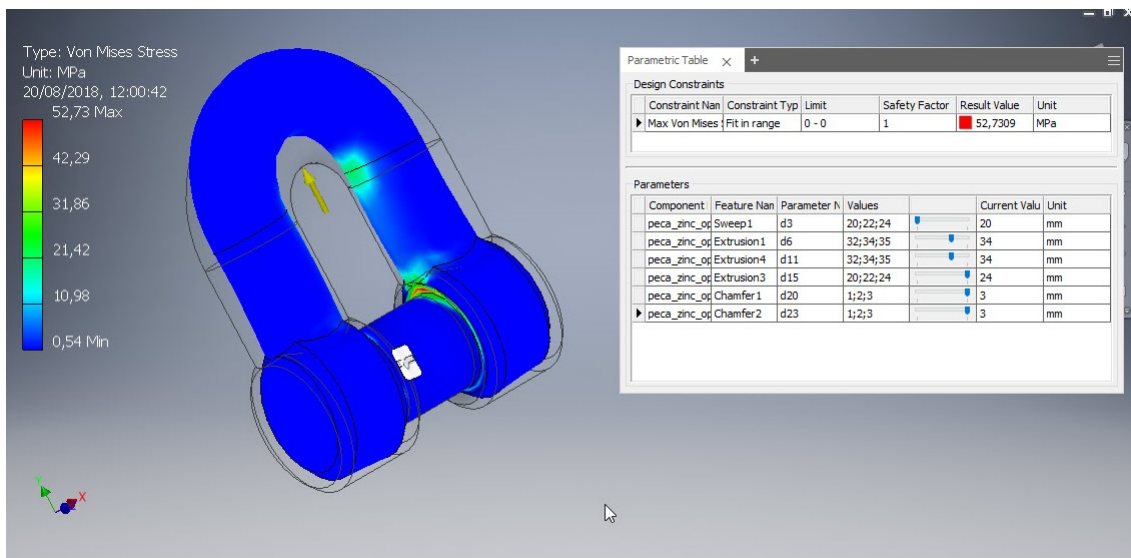


Figura 20: Simulação Autodesk 5

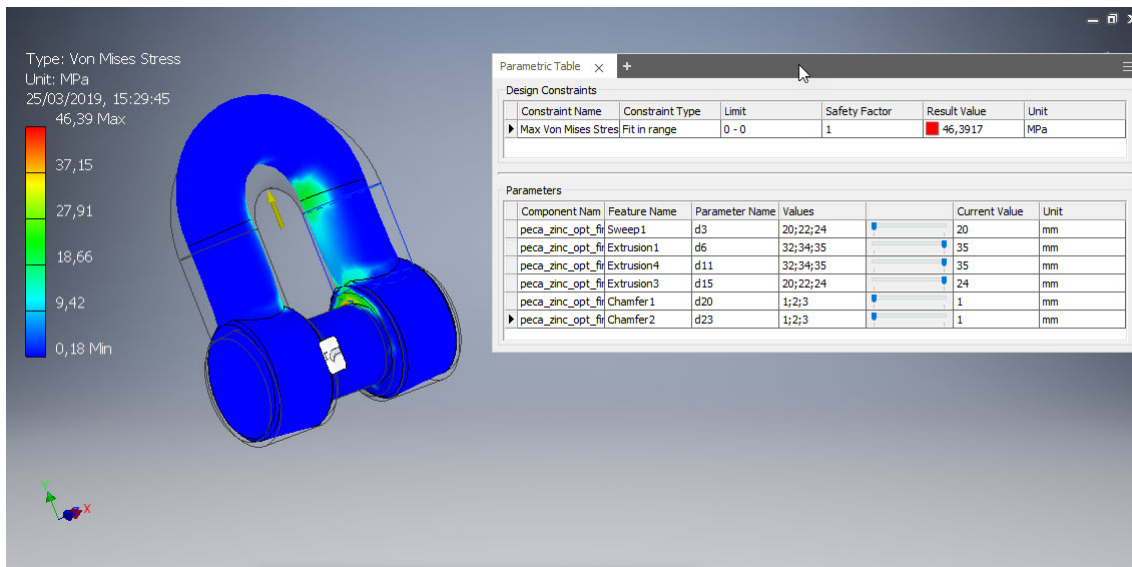


Figura 21: Simulação Autodesk 6

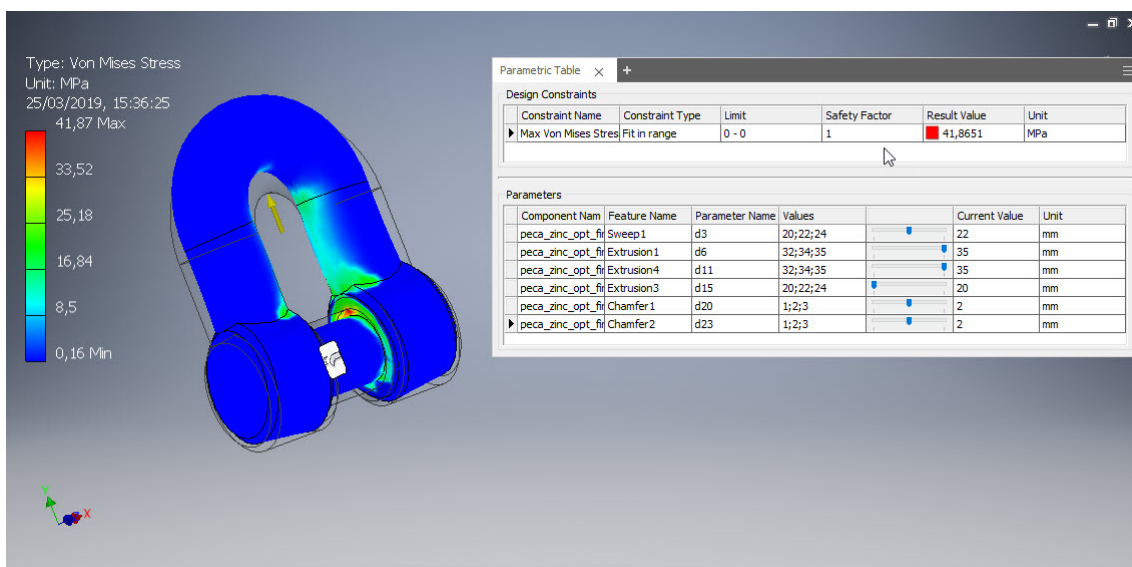


Figura 22: Simulação Autodesk 7

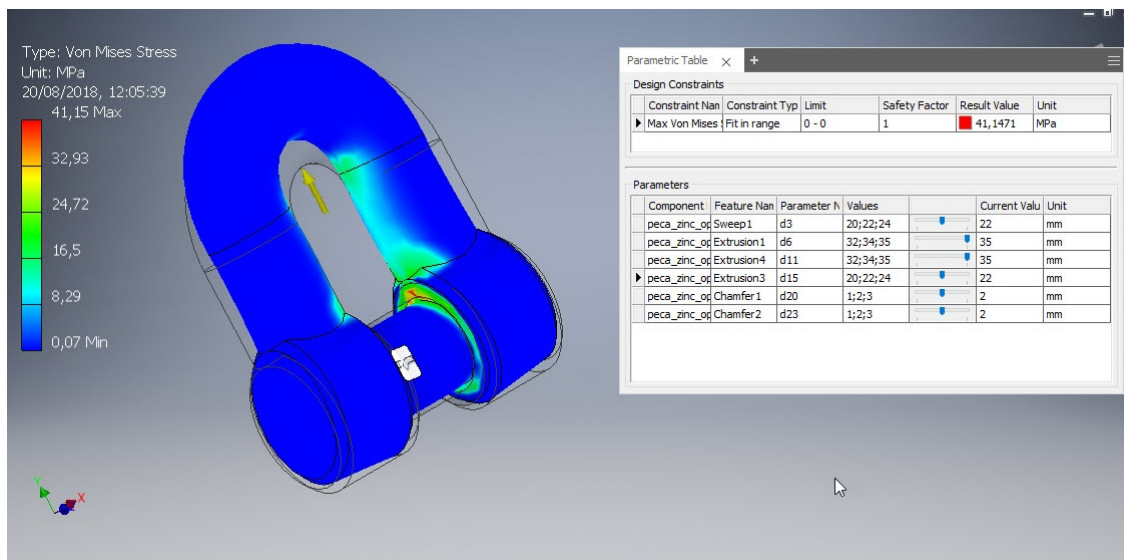


Figura 23: Simulação Autodesk 8

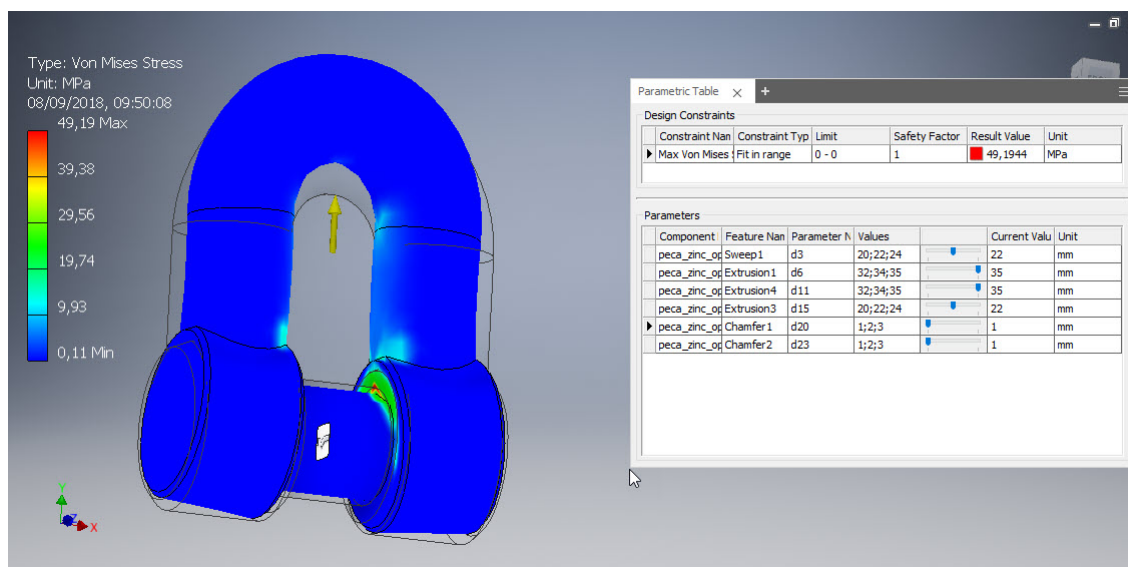


Figura 24: Simulação Autodesk 9

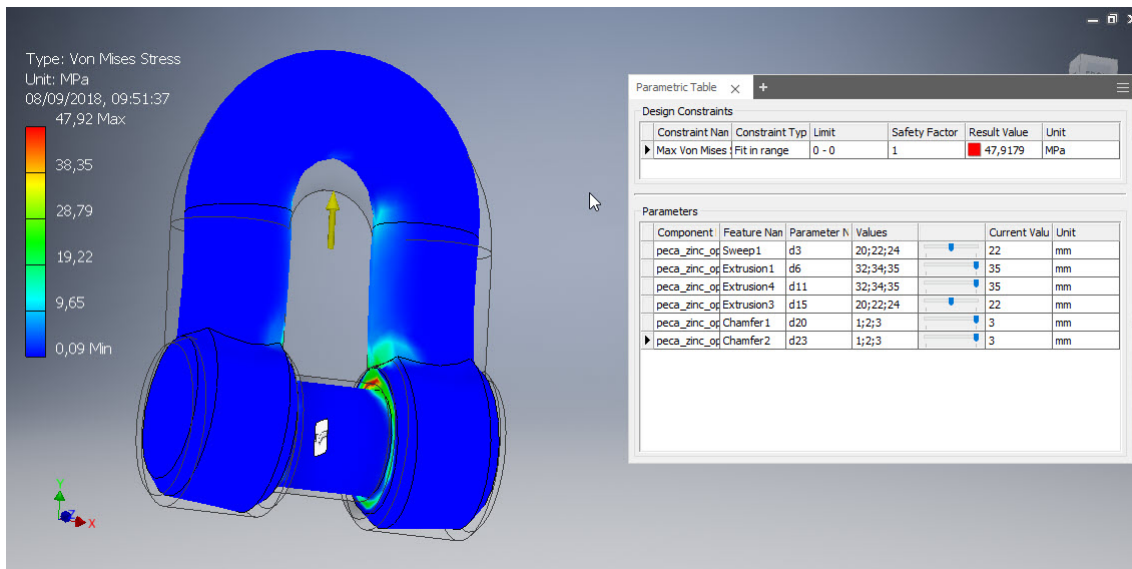


Figura 25: Simulação Autodesk 10

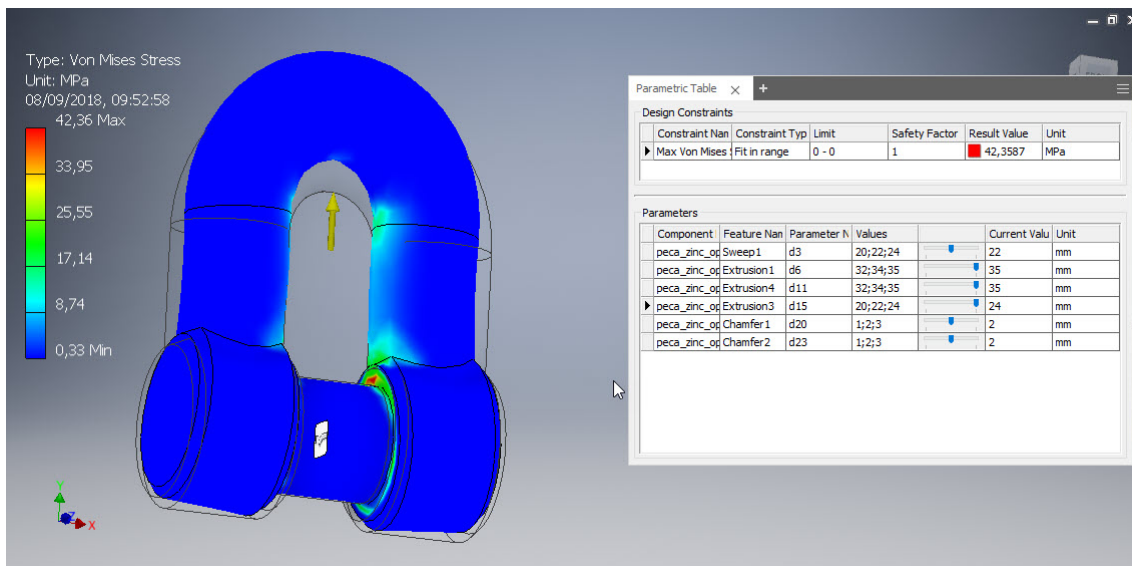


Figura 26: Simulação Autodesk 11

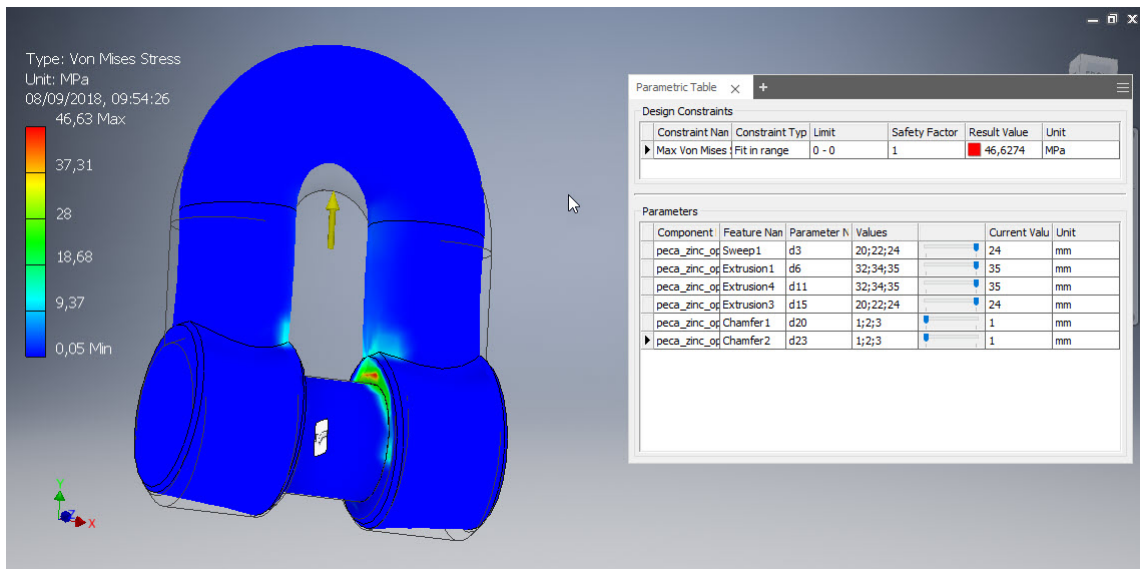


Figura 27: Simulação Autodesk 12

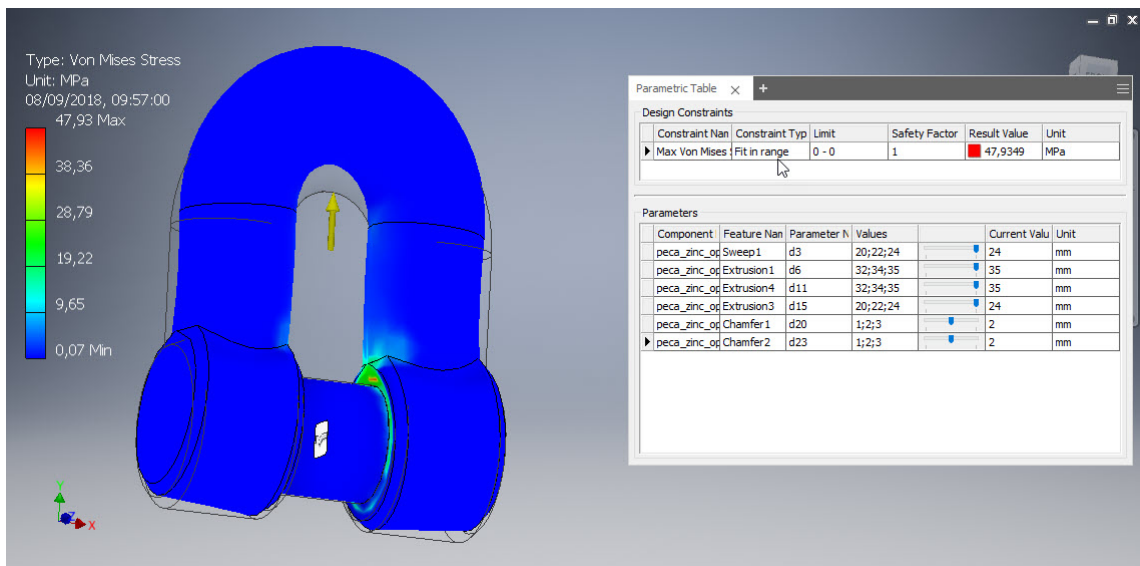


Figura 28: Simulação Autodesk 13

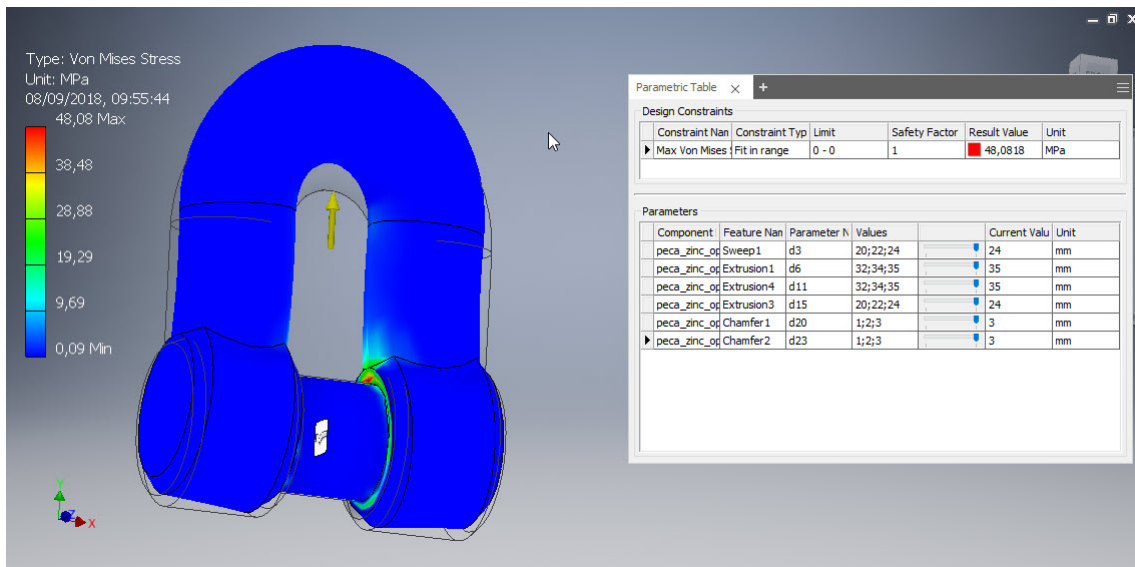


Figura 29: Simulação Autodesk 14