



Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Departamento de Engenharia Mecânica



Estudo e Modelação do Braço de Trolley de um Carro Elétrico Histórico da Carris

CARLOS MIGUEL VINAGRE ROSA COELHO

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor André Rui Dantas Carvalho

Doutor Gonçalo Nuno Antunes Gonçalves

Doutor João Filipe de Almeida Milho

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Vogais: Doutor Ricardo José Fontes Portal

Doutor André Rui Dantas Carvalho

Novembro, 2023



Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Departamento de Engenharia Mecânica

Estudo e Modelação do Braço de Trolley de um Carro Elétrico Histórico da Carris

CARLOS MIGUEL VINAGRE ROSA COELHO

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor André Rui Dantas Carvalho

Doutor Gonçalo Nuno Antunes Gonçalves

Doutor João Filipe de Almeida Milho

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Vogais: Doutor Ricardo José Fontes Portal

Doutor André Rui Dantas Carvalho

Novembro, 2023

Agradecimentos

Gostaria de deixar um especial agradecimento à Rute, por todo o amor, carinho, paciência, incentivo e sacrifício que fez devido ao tempo que seguramente foi “roubado” à família. À Maria e ao Miguel, também pelo sorriso que sempre tinham, mesmo quando o pai não podia brincar com eles, ou pelas horas que passava em frente ao computador, e não lhes podia dar atenção.

Fica também o meu agradecimento aos meus pais, pela motivação e força sempre transmitidas, para que nunca desistisse de alcançar os meus sonhos e objetivos. Um profundo obrigado pelo apoio dado ao longo desta jornada educativa.

Aos meus professores orientadores do ISEL, Professor André Carvalho, Professor Gonçalo Gonçalves e Professor João Milho, agradeço pela confiança e oportunidade de poder realizar o desenvolvimento do tema, e pela sua disponibilidade, paciência e ajuda para me guiarem e motivarem ao longo deste trabalho, principalmente com a dificuldade em encontrar dados ou documentação científica, e com os problemas e obstáculos encontrados com o software *Solidworks* no decorrer do desenvolvimento do trabalho.

Por último, agradeço ainda ao Pedro e ao Sr Matias, ambos da Carris, que nas várias visitas que efetuei às oficinas, mesmo durante o seu horário de trabalho, se disponibilizaram para me ajudar na identificação e medição de todas as peças por forma a que fosse possível desenhar o modelo geométrico do Braço de Trolley em computador, e também ao Engº Paulo Mendonça que me acompanhou na visita efetuada a Santo Amaro, e que gentilmente me cedeu alguns dados sobre os elétricos.

Página intencionalmente deixada em branco

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a execução de um estudo sobre o Braço de Trolley dos carros elétricos da empresa Companhia Carris de Ferro de Lisboa, habitualmente referida apenas como *Carris*. Este elemento faz a ligação mecânica e elétrica entre a catenária e o carro, permitindo a circulação da corrente elétrica. Devido à idade do sistema, as peças do Braço de Trolley já não são fabricadas, e têm de ser reparadas pela própria empresa.

Assim, o presente trabalho consiste em efetuar o levantamento da constituição do Braço de Trolley, identificando cada uma das suas peças constituintes, efetuar medições das mesmas, devido praticamente à inexistência de quaisquer registos escritos, desenhos técnicos ou especificações das peças que o compõem, para elaboração de um modelo geométrico computacional, com vista à realização do estudo principal que visa aplicar as ferramentas atuais de modelação e projeto mecânico (inexistentes na altura do projeto original) para fazer um estudo dos esforços mecânicos, e eventualmente propor alterações a nível de processos de reparação, materiais e da própria conceção, por forma a aumentar a durabilidade e reduzir o número de intervenções de manutenção.

Deste modo, foi realizado um estudo estático utilizando o *software Solidworks*, com vista a identificar os esforços sofridos pelos principais componentes que sofrem desgaste mecânico.

Palavras-Chave: Transporte Público Urbano, Modo Elétrico, Manutenção, Braço de Trolley, Engenharia Assistida por Computador, Método dos Elementos Finitos

Página intencionalmente deixada em branco

Abstract

The present work aims to carry out a study on the Trolley Arm of the electric cars of the company Companhia Carris de Ferro de Lisboa, usually referred to only as Carris. This element makes the mechanical and electrical connection between the catenary and the carriage, allowing the circulation of electric current. Due to the age of the system, the Trolley Arm parts are no longer manufactured, and must be repaired by the company itself.

Thus, the present work consists of carrying out a survey of the constitution of the Trolley Arm, identifying each of its constituent parts, taking measurements of the same, due to the practically non-existence of any written records, technical drawings or specifications of the parts that compose it, to the elaboration of a computational geometric model, in order to carry out the main study that aims to apply the current modelling and mechanical design tools (non-existent at the time of the original project) to study the mechanical efforts, and eventually to propose changes in terms of repair processes, materials and the design itself, in order to increase the durability and reduce the number of maintenance interventions.

So, a static study was carried out using the *Solidworks* software, in order to identify the efforts suffered by the main components that suffer mechanical wear.

Keywords: Urban Public Transport, Electric Mode, Maintenance, Trolley Arm, Computer Aided Engineering, Finite Element Method

Página intencionalmente deixada em branco

Nomenclatura

Assembly – Montagem de um componente num software de projeto a partir de cada uma das partes que o compõem

Carris - Companhia Carris de Ferro de Lisboa

e-Design – Paradigma que consiste numa abordagem integrada de projeto de engenharia que utiliza ferramentas de projeto, engenharia e fabricação assistidas por computador (CAD/CAE/CAM), bem como ferramentas avançadas de tecnologia de prototipagem para apoiar o projeto de um produto, desde o conceito até à fabricação

Ftool – Software de análise estrutural usado para cálculo e simulação de estruturas, como vigas e treliças, facilitando o projeto e a análise

Maple – Software de álgebra computacional utilizado para resolver problemas matemáticos complexos, realizar cálculos simbólicos e numéricos, criar gráficos e explorar conceitos matemáticos

Solidworks – Software de desenho assistido por computador (CAD) 3D usado para modelação e simulação de produtos, amplamente utilizada em engenharia e projeto industrial

Solidworks Motion – Módulo de software integrado de modelações cinemáticas e dinâmicas

Solidworks Simulation – Módulo de software integrado de simulações por elementos finitos

Lista de acrónimos

3D – Três dimensões

CAE – Computer Aided Engineering

CAD – Computer Aided Design

CAM – Computer Aided Manufacturing

FEM – Finite Element Method

ECR – Engineering Change Requests

Lista de símbolos

d - Diâmetro

t - Espessura

\bar{y} - Posição do Centroide no eixo “y”

A - Área da Secção

A_s - Secção Efetiva de Corte

I - 2º Momento de Área

J - Momento Polar de Inércia

E - Módulo de Elasticidade

ν - Coeficiente de Poison

G - Módulo de Corte

ρ - Massa Específica do Material

σ_u - Tensão de Ruptura

σ_e - Tensão de Cedência

x - Eixo x

y - Eixo y

Página intencionalmente deixada em branco

Índice

Conteúdo

1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura.....	3
2. Estado da Arte	5
2.1. Engenharia Assistida por Computador	5
2.2. Transportes Públicos Elétricos.....	9
2.2.1. Elétricos da empresa Carris.....	11
2.2.2. Coletores de Corrente Elétrica	13
3. Modelação do Braço de Trolley.....	21
3.1. Apresentação do Caso de Estudo.....	21
3.2. Modelo Geométrico do Braço de Trolley	27
3.3. Verificação do Modelo	33
4. Estudo dos esforços sofridos pelo Braço de Trolley por elementos finitos.....	41
4.1. 1º Estudo	41
4.1.1. Modelo Geométrico utilizado	41
4.1.2. Material	42
4.1.3. Constrangimentos.....	43
4.1.4. Forças Aplicadas	44
4.1.5. Malha de Elementos Finitos.....	44
4.1.6. Resultados	45
4.2. 2º Estudo	47
4.2.1. Modelo Geométrico utilizado	47
4.2.2. Material	48
4.2.3. Constrangimentos.....	48
4.2.4. Forças Aplicadas	49
4.2.5. Malha de Elementos Finitos.....	49
4.2.6. Resultados	50
4.3. 3º Estudo	52
	X

4.3.1. Modelo Geométrico utilizado	53
4.3.2. Material	54
4.3.3. Constrangimentos.....	54
4.3.4. Forças Aplicadas	55
4.3.5. Malha de Elementos Finitos.....	56
4.3.6. Resultados	56
4.4. 4º Estudo	59
4.4.1. Modelo Geométrico utilizado	60
4.4.2. Material	61
4.4.3. Constrangimentos.....	61
4.4.4. Forças Aplicadas	61
4.4.5. Malha de Elementos Finitos.....	62
4.4.6. Resultados	62
5. Análise e Discussão dos Resultados.....	65
6. Conclusão	69
6.1. Desenvolvimentos Futuros.....	71
Referências Bibliográficas	73
Anexos.....	74
Anexo I – Desenho Técnico da Forquilha do Braço de Trolley de 04/02/1970	75
Anexo II – Desenhos Técnicos das componentes do Braço de Trolley obtido a partir do modelo geométrico	76
Anexo III – Cálculo Analítico de Validação do Modelo	97

Página intencionalmente deixada em branco

Índice de Figuras

Figura 1 - Imagem com vários elétricos no Museu da Carris, onde se podem ver os vários Braços de Trolley [1].	2
Figura 2 - Evolução do custo de desenvolvimento de um produto ao longo do tempo num processo de projeto convencional [2].	6
Figura 3 - a) Comparação da evolução do custo de desenvolvimento de um produto entre o método convencional e o método CAE. b) Comparação sobre o conhecimento de um produto entre o método de desenvolvimento convencional e o método CAE [2].	6
Figura 4 - Exemplos dos elétricos que compõem a frota da Carris.[5]	11
Figura 5 - Exemplos de mecanismos de recolha de corrente elétrica [7].	15
Figura 6 - Imagem da US Patent 331585 de 1885 de Charles Van Depoele do primeiro braço de trolley a obter a energia num sistema por baixo da catenária [9].	16
Figura 7 - Desenho de uma patente dos Estados Unidos (US 663788) do ano de 1900, ilustrando a roldana e o uso de molas no Braço de Trolley [10].	17
Figura 8 - Componentes de um moderno Braço de Trolley [11].	19
Figura 9 – Principais elementos que compõem o braço de trolley.	21
Figura 10 - Pormenor da Roldana no topo do Tubo em contacto com a catenária.	22
Figura 11 - Eixo de rotação fixo ao elemento Base que permite que o carro elétrico efetue as curvas mantendo sempre a Roldana em contacto com a catenária.	22
Figura 12 - Casquilho introduzido no olhal do elemento Suporte das Molas que permite a rotação quando o carro elétrico efetua as curvas.	23
Figura 13 – Exemplos de desgaste de alguns elementos do Braço de Trolley: (a) Casquilho com desgaste assimétrico; (b) veio com desgaste e algumas fraturas na sua estrutura;	24
Figura 14 - Exemplo de uma Forquilha que entrou para manutenção nas oficinas da Carris devido à falha de um dos seus olhais.	24
Figura 15 - Rutura de um dos olhais da forquilha por ação da força exercida por um dos Tirantes.	25
Figura 16 - Roldana para manutenção nas oficinas da Carris.	25
Figura 17 - Tubo em manutenção nas oficinas da Carris.	26
Figura 18 – As várias peças que constituem o Braço de Trolley	27
Figura 19 - Modelo da Base em Solidworks.	28
Figura 20 - Modelo geométrico do Suporte das Molas.	28
Figura 21 - Modelo geométrico das Molas.	29
Figura 22 - Modelo geométrico da peça de fixação/compressão das Molas.	29
Figura 23 - Modelo geométrico da peça de encosto das molas.	29
Figura 24 - Modelo geométrico dos tirantes.	30
Figura 25 - Modelo geométrico das duas peças que compõem a Forquilha.	30
Figura 26 - Modelo geométrico do tubo/varão que suporta a Roldana de contacto com a catenária.	31
Figura 27 - Modelo geométrico do Suporte da Roldana, da Roldana, e dos acessórios de fixação.	31

Figura 28 - Montagem completa do Braço de Trolley utilizando os modelos geométricos modelados no software Solidworks.	32
Figura 29 – Pormenor da montagem do Braço de Trolley utilizando os modelos geométricos modelados no software Solidworks.	32
Figura 30 - Decomposição da força de 110N que é aplicada na ponta elevada do Tubo do Braço de Trolley para validação do modelo no software Ftool.....	34
Figura 31 - Detalhe do software FTool da deformação vertical do tubo e das reações no apoio após a aplicação da carga de 110N na ponta do tubo.	35
Figura 32 - Imagem do carregamento de 110 N aplicado ao Tubo no software Solidworks.....	36
Figura 33 - Resultado da deformada vertical após a execução da simulação no módulo Simulation do software Solidworks.....	37
Figura 34 – Resultado da deformada vertical após a aplicação da carga de 110 N no tubo e considerando mais elementos do Braço de Trolley.	38
Figura 35 - Resultado da tensão equivalente de von Mises após a aplicação da carga de 110 N no tubo e considerando mais elementos do Braço de Trolley.	38
Figura 36 - Elementos viga que ficam restringidos pela forquilha na simulação com o Braço de Trolley completo.	39
Figura 37 - Modelo do Braço simplificado do Trolley utilizado no primeiro estudo. ...	42
Figura 38 - Constrangimentos aplicados no 1º Estudo.....	43
Figura 39 - Imagem com a aplicação da força de 110 N na ponta do tubo que suporta a roldana.	44
Figura 40 - Pormenor da malha utilizada no 1º Estudo do Braço de Trolley.....	45
Figura 41 - Deformada máxima obtida na ponta do tubo igual a -497,8 mm na direção do eixo "z"	45
Figura 42 - Tensão equivalente de von Mises em vários pontos da Forquilha.	46
Figura 43 - Reações obtidas num dos olhais da forquilha que são esforçados pela força aplicada no topo do tubo e onde são ligados os tirantes que sofrem o efeito da força das molas.....	46
Figura 44 - Reações na base da Forquilha que é um ponto de rotação e de ligação ao suporte das molas.	47
Figura 45 - Imagem a destacar o constrangimento nos olhais da Forquilha que impedem o movimento de translação na direção do eixo “x”, que é paralelo à colocação das molas	48
Figura 46 - Ilustração da força da gravidade que foi ativada e localização do centro de massa da estrutura.....	49
Figura 47 - Deformada máxima obtida na ponta do tubo igual a -613,1 mm na direção do eixo "z"	50
Figura 48 - Tensão equivalente de von Mises em vários pontos da Forquilha utilizando a ferramenta "Probe" do Solidworks.	51
Figura 49 - Intensidades das forças de reação nos olhais da forquilha.....	52
Figura 50 - Imagem e características da mola incluída no 3º Estudo.....	53
Figura 51 - Visualização da Roldana e do pino que já foram incluídos neste estudo. ...	54
Figura 52 - Constrangimentos utilizados no 3º estudo.	55
Figura 53 - Forças aplicadas no 3º Estudo.	55

Figura 54 - Deformada resultante obtida na simulação do 3º estudo do Braço de Trolley, de valor igual a -661,5 mm.....	56
Figura 55 - Tensão equivalente de von Mises em vários pontos da Forquilha utilizando a ferramenta "Probe" do Solidworks.	57
Figura 56 - Intensidade das forças que atuam nas articulações do tipo dobradiça da Forquilha e do Suporte das Molas, e reações no apoio da estrutura.....	58
Figura 57 - Forças exercidas pela mola no modelo do 3º Estudo.....	59
Figura 58 - Modelo utilizado no 4º Estudo, mostrando as duas molas conectadas aos pinos e à peça denominada Fixação das Molas.	60
Figura 59 - Constrangimentos utilizados no 4º estudo.	61
Figura 60 – Deformada máxima resultante da simulação do 4º estudo do Braço de Trolley.	62
Figura 61 - Tensão equivalente de von Mises em vários pontos da Forquilha utilizando a ferramenta "Probe" do Solidworks no 4º Estudo.....	63
Figura 62 - Intensidade das forças que atuam nas articulações do tipo dobradiça da Forquilha e do Suporte das Molas, e reações no apoio da estrutura do 4º Estudo.	64
Figura 63 - Imagem de um casquilho desgastado assimetricamente e que é utilizado nos pontos A e B da Forquilha referidos anteriormente.	67
Figura 64 - Imagem de um casquilho desgastado assimetricamente e que é utilizado no ponto E estudado do Suporte das Molas.....	68

Página intencionalmente deixada em branco

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Datas de eletrificação e de criação de monopólios de redes de elétrico de cidade [4].	9
Tabela 2 - Frota de elétricos históricos da Carris [6].	12
Tabela 3 - Características técnicas dos elétricos tipo 700 [6].....	12
Tabela 4 - Propriedades do material "Alloy Steel" usadas no software Ftool.....	34
Tabela 5 - Propriedades da Secção do Tubo usadas no software Ftool.....	34
Tabela 6 - Valores das deformadas e da rotação no estudo efetuado no software Ftool.	35
Tabela 7 - Detalhes da malha aplicada ao Tubo no software Solidworks para efeitos de verificação do modelo.	36
Tabela 8 - Detalhes do elemento viga e do material utilizados no estudo de verificação do modelo no software Solidworks.	36
Tabela 9 - Valor das reações obtido na simulação em Solidworks só com o Tubo por forma a se validar o modelo utilizado.	37
Tabela 10 - Tabela comparativa dos resultados obtidos no estudo de verificação do modelo geométrico do Braço de Trolley.	40
Tabela 11 - Principais propriedades do material "Alloy Steel" do software Solidworks utilizado no estudo.....	42
Tabela 12 - Detalhes da malha utilizada no 1º Estudo do Braço de Trolley.	44
Tabela 13 - Detalhes da malha utilizada no segundo estudo.	49
Tabela 14 - Valores da tensão equivalente de von Mises obtidos em alguns dos nós da Forquilha com a ferramenta "Probe" do Solidworks.....	51
Tabela 15 - Intensidades das forças de reação nos olhais da forquilha.	52
Tabela 16 - Propriedades da malha utilizada no terceiro estudo.	56
Tabela 17 - Valores da tensão equivalente de von Mises do 3º Estudo obtidos em alguns dos nós da Forquilha com a ferramenta "Probe" do Solidworks.....	58
Tabela 18 - Detalhes da malha utilizada no quarto estudo.	62
Tabela 19 - Valores da tensão equivalente de von Mises do 4º Estudo obtidos em alguns dos nós da Forquilha com a ferramenta "Probe" do Solidworks.....	63
Tabela 20 - Valores da deformada máxima do Braço de Trolley na zona da Roldana obtidos nos 4 estudos realizados.....	65
Tabela 21 - Valores obtidos em 3 dos 4 estudos para a tensão equivalente de von Mises.	66
Tabela 22 - Intensidade das forças atuantes em 5 pontos de apoio da Forquilha, como articulações e olhais.....	66

Página intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo introduzir o tema da Dissertação, fazendo um breve enquadramento, seguido dum pequeno parágrafo que explica as motivações que levaram à seleção do tema. Neste capítulo também se apresentam os objetivos que se pretendem atingir e também um pequeno resumo da estrutura do documento.

1.1. Motivação

O Braço de Trolley é um componente que é utilizado há mais de 100 anos por meios de transporte elétricos, como se pode verificar pela figura 1 que mostra o Museu da Carris com várias gerações de elétricos de cidade com Braços de Trolley. Define-se como um dos componentes dos carros elétricos que obtêm a sua energia de locomoção a partir de uma rede suspensa, denominada catenária e que faz a ligação mecânica e elétrica entre a catenária e o carro, permitindo a circulação da corrente elétrica, que irá alimentar o grupo motriz. Devido ao seu reduzido volume e flexibilidade, este elemento ainda é bastante utilizado em muitas cidades do mundo. Em Portugal é utilizado pela empresa Carris, que mantém várias viaturas em circulação que utilizam este elemento em complemento ao pantógrafo. Esta situação ocorre especialmente em percursos que atravessam ruas mais estreitas da cidade de Lisboa, por forma a evitar danos na catenária causados pelo grande volume do pantógrafo e também para permitir o cruzamento numa mesma rua estreita de dois elétricos, sem que ocorra contacto entre os pantógrafos das duas viaturas.

Apesar do Braço de Trolley já ser usado há muito tempo, a maior parte das inovações e desenvolvimentos ocorreram no início do século XIX. Atualmente, a Carris não dispõe de estudos, nem informação técnica sobre o Braço de Trolley, dado que as viaturas que utilizam este elemento são históricas e consideradas peças de museu. Por este motivo, não são suscetíveis de serem modernizadas, ou mesmo de ocorrer inovação ao nível do projeto desta peça. Assim, devido à idade dos carros elétricos e do sistema em si, a empresa já não fabrica estes equipamentos, limitando-se apenas a efetuar a manutenção corretiva quando estes apresentam algum dano, como por exemplo a rutura de um olhal, ou um elevado nível de desgaste dos casquilhos. Assim, por forma a se

aumentar a durabilidade e a reduzir o número de manutenções corretivas, surgiu a necessidade de se realizar um estudo sobre este equipamento.



Figura 1 - Imagem com vários elétricos no Museu da Carris, onde se podem ver os vários Braços de Trolley [1].

1.2. Objetivos

O presente trabalho final de mestrado tem como principal objetivo a execução de um estudo sobre o Braço de Trolley dos carros elétricos históricos da empresa Companhia Carris de Ferro de Lisboa, habitualmente referida apenas como *Carris*.

Como primeira meta: efetuar o levantamento da constituição do Braço de Trolley, identificando cada uma das suas peças constituintes e efetuar medições das dimensões das mesmas, devido praticamente à inexistência de quaisquer registos escritos, desenhos técnicos ou especificações das peças que o compõem. Estes dados serão utilizados para a elaboração de um modelo geométrico computacional no software *Solidworks*, que em primeira instância poderá servir futuramente para que a *Carris* disponha de uma ferramenta para análise e estudo do Braço de Trolley, e também, que passe a dispor de desenhos técnicos atualizados das diversas peças que compõem este elemento.

Depois, em 2ª instância, este trabalho tem também como objetivo a realização de um estudo estático computacional que visa aplicar as ferramentas (como anteriormente referido no software *Solidwoks*) atuais de modelação e projeto mecânico (inexistentes na altura do projeto original), para que o Braço de Trolley possa ser estudado relativamente a alguns dos esforços mecânicos a que está sujeito durante o desempenho da sua função,

e eventualmente, haver a possibilidade de se propor possíveis alterações ao nível de processos de reparação, materiais e da própria conceção, por forma a aumentar a sua durabilidade e reduzir o número de intervenções de manutenção.

1.3. Estrutura

O documento está organizado em 11 capítulos. O primeiro capítulo é constituído por uma introdução ao tema, abordando os motivos e objetivos da sua seleção.

O segundo capítulo introduz a Engenharia Assistida por Computador, conhecida por CAE (*Computer Aided Engineering*), o Método dos Elementos Finitos e as ferramentas computacionais utilizadas em engenharia.

O terceiro capítulo é focado nos transportes públicos elétricos e nos diferentes tipos de coletores de corrente elétrica utilizados para alimentar a unidade motriz.

No quarto capítulo apresenta-se o caso de estudo e também a constituição do Braço de Trolley.

O quinto capítulo é dedicado ao desenvolvimento do modelo geométrico utilizando o software *Solidworks*, partindo da medição das peças que constituem o Braço de Trolley.

No sexto capítulo é efetuado um estudo de verificação do modelo geométrico construído, no qual foi utilizado o módulo *Solidworks Simulation* do software *Solidworks*, o software *FTool* e o cálculo analítico recorrendo ao software *Maple*.

O sétimo capítulo é dedicado à execução de um estudo estático por elementos finitos utilizando o módulo *Solidworks Simulation* do software *Solidworks*, por forma a se obterem alguns dos esforços a que está sujeito o Braço de Trolley.

No oitavo capítulo é feita uma breve análise e discussão dos resultados obtidos neste trabalho.

O nono capítulo resume as conclusões que puderam ser extraídas ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, apresentando também sugestões para trabalhos futuros de aprofundamento relacionados com o tema abordado.

No décimo capítulo é apresentada toda a bibliografia citada, e que serviu de apoio à realização dos estudos presentes neste trabalho.

2. Estado da Arte

2.1. Engenharia Assistida por Computador

No novo paradigma denominado de e-Design, a Engenharia Assistida por Computador, ou em inglês *Computer Aided Engineering* (CAE), desempenha um papel fundamental. Trata-se de um processo que utiliza o computador para dar suporte à engenharia, auxiliando-a no desenvolvimento de projetos, por meio de simulações de análises estáticas, dinâmicas, térmicas, magnéticas, da mecânica dos fluidos, acústicas e de impacto, fazendo do CAE uma ferramenta poderosa para a redução de custos de um projeto e minimizando o tempo de lançamento do produto final [2].

No desenvolvimento convencional de novos produtos, o projeto e a fabricação tendem a ser desarticulados. Muitas vezes, a capacidade de fabricação de um produto não é considerada no projeto. Problemas de fabricação geralmente ocorrem quando o projeto é finalizado e os testes são concluídos. Defeitos de projeto relacionados com a fabricação e com o planeamento geralmente são encontrados demasiado tarde para serem corrigidos. Consequentemente, esta situação gera custos mais elevados na produção de um novo produto. Neste processo altamente estruturado e sequencial, o ciclo de desenvolvimento do produto tende a ser prolongado, o custo é elevado e a qualidade do produto é muitas vezes comprometida para evitar atrasos. Os custos e o número de solicitações de alterações ao nível da engenharia (ECR, do inglês *Engineering Change Requests*) ao longo do ciclo de desenvolvimento de um produto são muitas vezes proporcionais, e estão de acordo com o padrão mostrado na figura 2 [2].

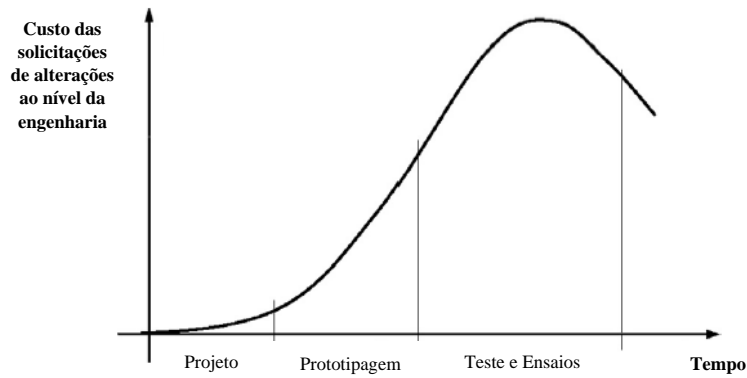


Figura 2 - Evolução do custo de desenvolvimento de um produto ao longo do tempo num processo de projeto convencional [2].

No novo paradigma que utiliza o CAE, é aplicado um conjunto de ferramentas informáticas que dá suporte a uma equipa multifuncional na simulação e projeto mecânico na fase inicial de projeto. Por sua vez, produtos de melhor qualidade podem ser projetados e fabricados com menor custo. Com o maior conhecimento adquirido sobre o produto obtido em simulações, melhores decisões de projeto podem ser tomadas, quebrando o paradoxo do projeto convencional. Com o avançar do desenvolvimento das ferramentas de simulação computacional, mais testes físicos podem ser substituídos por simulações de computador, reduzindo assim custos e encurtando o tempo de desenvolvimento dum produto. Assim, o custo desejável e a distribuição de custos em todo o ciclo de desenvolvimento de produto ocorrem conforme é mostrado na imagem 3 [2].

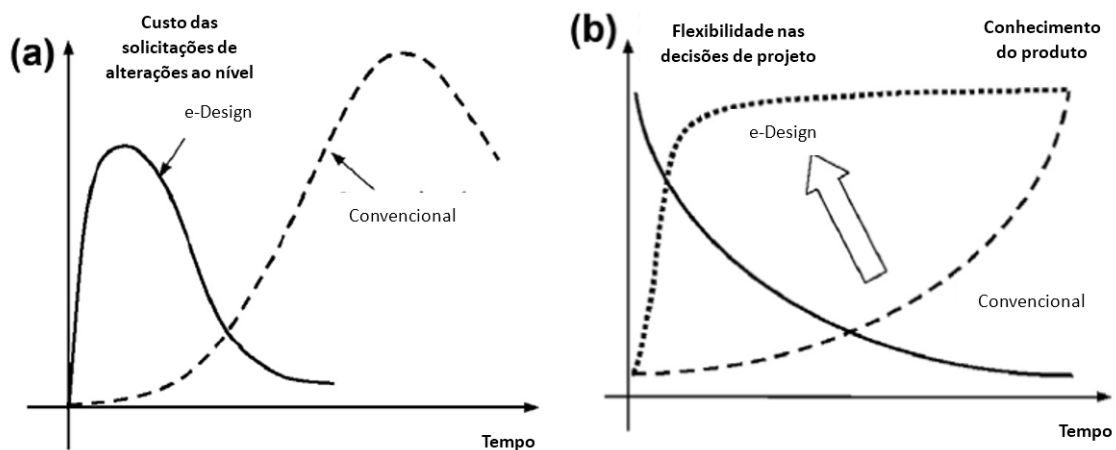


Figura 3 - a) Comparação da evolução do custo de desenvolvimento de um produto entre o método convencional e o método CAE. b) Comparação sobre o conhecimento de um produto entre o método de desenvolvimento convencional e o método CAE [2].

Com as ferramentas de CAD (*Computer Aided Design*) avançadas, é possível integrar uma série de variáveis de projeto numa compilação computacional, as quais permitem não apenas definir as dimensões do produto concebido, como também outras características, como materiais, acabamentos, processos de fabricação e de montagem, e até interações com elementos externos, como forças aplicadas e temperatura. Assim, podem-se criar protótipos virtuais dos produtos, simulando sobre eles as condições de uso e, assim, efetuar estudos prévios do fabrico sobre aspetos tais como: a estabilidade, a resistência e outros comportamentos [2].

Sem a ajuda das ferramentas CAE, muitos engenheiros na fase de projeto sentiam muita dificuldade em gerir a flexibilidade das suas decisões face ao tempo de desenvolvimento dum produto [2].

O CAE, como referido anteriormente é utilizado no desenvolvimento de novos produtos, mas também pode, e é, utilizado para análise e estudo de produtos existentes, que no seu processo de desenvolvimento não tenham tido a oportunidade de dispor deste tipo de metodologia e ferramentas. Deste modo, criando um modelo geométrico (CAD) a partir do produto real, e posteriormente, recorrendo às técnicas CAE, é possível efetuar simulações virtuais do funcionamento do mesmo, para analisar de uma forma mais aprofundada os pontos fortes e fracos deste, e tentar perceber em que aspetos poderá ser melhorado, ou até mesmo alterado, seja em termos de design, materiais ou acabamentos. Assim, será este o processo que será aplicado ao Braço de Trolley em estudo da empresa Carris.

A principal técnica do CAE é o Método dos Elementos Finitos (FEM, do inglês *Finite Element Method*). O FEM considera que um produto de forma irregular pode ser subdividido em elementos finitos de tamanho menor, cuja solução é conhecida [3].

O Método dos Elementos Finitos (FEM) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas. Este método apresenta atualmente um nível de desenvolvimento que permite a sua utilização pela generalidade dos projetistas de estruturas. Enquanto que no passado muitos dos

utilizadores do FEM estavam também envolvidos na respetiva programação em computador, verifica-se hoje em dia que a quase totalidade dos projetistas de estruturas apenas se preocupa com a utilização do correspondente software, e com a interpretação dos resultados obtidos [3].

No entanto, a utilização dos softwares especializados de FEM deverá ser efetuada com cautela, em especial, no que concerne à interpretação dos resultados obtidos, e na sua aceitação. Pois, conforme refere Álvaro Azevedo, um projetista que não conheça as técnicas correspondentes à formulação do FEM será tentado pela simples utilização de um qualquer software de cálculo e, uma vez que não tem acesso aos modelos que estão programados, nem tem bases para a sua compreensão, procederá à utilização do software de acordo com o treino que recebeu, ou com base em sucessivas improvisações [3]. A tentação para aceitar os resultados provenientes do programa é grande, quaisquer que sejam esses resultados, uma vez que considera que o software escolhido tem elevada qualidade. Os potenciais perigos de uma utilização nestas condições são a não perceção de eventuais erros na introdução dos dados, a ausência de correspondência entre o modelo selecionado e a estrutura que está a ser analisada, e o facto de serem desprezadas importantes condicionantes [3].

Para simular através de elementos finitos o comportamento de um objeto, é necessário criar um modelo geométrico do mesmo. A análise por elementos finitos não é restrita apenas a estruturas mecânicas, podendo ser aplicado aos vários problemas de forma arbitrária, cargas e condições de fronteira. Outra vantagem do método é a semelhança física entre a malha de elementos finitos e a estrutura real, facilitando a visualização dos resultados da análise.

No presente trabalho será utilizado o software *Solidworks* para executar a análise estática por elementos finitos ao Braço de Trolley em estudo.

2.2. Transportes Públicos Elétricos

Transporte público define-se como um serviço que transporta passageiros ao longo de um itinerário e frequência predeterminados em troca de uma tarifa [4].

Ao longo da história, os transportes públicos têm desempenhado um papel fundamental na mobilidade das populações das cidades. Desde as carroças puxadas por cavalos até aos modernos sistemas de transporte, testemunhou-se uma evolução significativa na forma como nos transportes coletivos.

A história dos transportes públicos elétricos remonta ao final do século XIX, quando as primeiras linhas de elétricos começaram a surgir em várias cidades do mundo, como se pode ver na tabela 1. O uso da eletricidade como fonte de energia para impulsionar os veículos, trouxe consigo inovações e benefícios sem precedentes [4].

Uma das primeiras formas de transporte público elétrico foi o elétrico de cidade, mundialmente conhecido como *Tram*. Estes veículos, aquando da sua invenção chegaram a ser alimentados por um terceiro carril, só posteriormente é que começaram a ser alimentados por linhas aéreas ou percursos eletrificados, permitindo a sua operação contínua sem a necessidade de paragens frequentes para recarregar ou reabastecer [4].

Tabela 1 - Datas de eletrificação e de criação de monopólios de redes de elétrico de cidade [4].

Cidade	Elétrico de cidade (<i>Tram</i>)	Iniciativa Privada	Iniciativa Pública
Amsterdão	1900	-	1900
Antuérpia	1902	1901	c. 1945
Barcelona	1899	-	1952/53
Belfast	1905	-	1904
Berlim	1890	-	1918
Birmingham	1901	-	c. 1904 t. 1911
Cardiff	1902	-	c. 1902 t. 1903
Copenhaga	1899	1898	c. 1911 t. 1919
Edimburgo	1910/1922	-	1919
Frankfurt	1899	-	1898
Glasgow	1898	-	1894
Leeds	1891	-	1894
Lisboa	1901	1892-1896	1973
Liverpool	1898	-	1897
Londres	1901	-	1933
Madrid	1898	1920	1933
Milão	1893	1897	1917
Porto	1895	1893	1946
Paris	1892	-	1921
Praga	1896	-	c. 1898 t. 1907
São Petersburgo	1907	-	c. 1898
Sheffield	1899	-	1896
Viena	1897	-	1903

Nota: c. começou, t. terminou

O aparecimento dos transportes públicos elétricos marcou uma revolução na mobilidade urbana. Os elétricos tornaram-se uma alternativa eficiente e sustentável aos veículos movidos a vapor ou a cavalos, oferecendo uma forma rápida, limpa e acessível de transporte para as massas [4].

Ao longo do século XX, os transportes públicos elétricos expandiram-se para diferentes modos de transporte, incluindo comboios, metropolitano e autocarros elétricos.

No entanto, com o surgimento dos automóveis particulares e a ascensão da indústria do petróleo, os transportes públicos elétricos começaram a enfrentar desafios. Muitos sistemas de elétricos foram desmantelados e substituídos por autocarros movidos a combustíveis fósseis, enquanto o transporte individual ganhava popularidade.

Recentemente, temos assistido a um ressurgimento dos transportes públicos elétricos. Com a crescente preocupação com as alterações climáticas e a necessidade de reduzir a poluição atmosférica nas cidades, os veículos elétricos têm ganhado destaque novamente.

Atualmente, vemos uma ampla gama de transportes públicos elétricos em operação, desde modernos elétricos de última geração até autocarros e comboios elétricos de alta velocidade. A eletrificação dos transportes públicos não só contribui para a redução das emissões de gases poluentes, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar, mas também para a criação de cidades mais sustentáveis, com menor congestionamento e maior qualidade de vida. Estes veículos, são impulsionados por motores elétricos alimentados por baterias ou por fontes externas de energia elétrica.

Para além das vantagens já enunciadas, os transportes públicos elétricos também são mais silenciosos em comparação com os veículos movidos a combustão. A ausência de ruído do motor proporciona uma experiência de viagem mais confortável para os passageiros e reduz a poluição sonora nas áreas urbanas.

Do ponto de vista económico, os transportes públicos eléctricos também apresentam vantagens significativas. Embora o custo inicial possa ser mais elevado devido à tecnologia e infraestrutura necessárias, a longo prazo estes veículos são mais económicos de operar e manter. A eletricidade utilizada é geralmente mais barata do que os combustíveis fósseis, o que se traduz em economias financeiras para as empresas de transporte e para os utilizadores.

Os transportes públicos eléctricos também desempenham um papel importante na melhoria da acessibilidade e mobilidade nas cidades. Ao oferecer uma opção de transporte eficiente, fiável e sustentável, contribuem para reduzir a dependência de veículos privados, aliviar o congestionamento do tráfego e melhorar a fluidez nas vias.

Por fim, resumidamente, é reconhecido que os transportes públicos eléctricos promovem uma maior qualidade de vida nas áreas urbanas ao reduzir a poluição atmosférica e sonora, melhorar a eficiência energética e aumentar a acessibilidade. Estes sistemas tornam as cidades mais sustentáveis, saudáveis e agradáveis para viver.

2.2.1. Eléctricos da empresa Carris

Atualmente a Carris dispõem de 48 eléctricos ao serviço. Estes dividem-se em eléctricos articulados, históricos e clássicos [5].



Articulados



Históricos



Clássicos

Figura 4 - Exemplos dos eléctricos que compõem a frota da Carris.[5]

Nem todos os elétricos da Carris utilizam o Braço de Trolley, como é o caso dos articulados, que são mais modernos e não têm de circular pelas ruas estreitas da cidade de Lisboa, e como tal, possuem apenas o pantógrafo. No caso dos elétricos históricos e clássicos, o Braço de Trolley é fundamental para garantir que não ocorrem danos na catenária, dado que o pantógrafo não pode se utilizado nestes casos. Nas tabelas 2 e 3 pode-se ver a composição da frota de elétricos históricos e suas características.

Tabela 2 - Frota de elétricos históricos da Carris [6].

NÚMEROS DE FROTA	541 a 585 (Total 45)	
ANO DE FABRICO	1995 e 1996	
DATAS DE ENTRADA AO SERVIÇO	541 - 01/04/95	564 - 30/01/96
	542 - 21/04/95	565 - 16/02/96
	543 - 24/04/95	566 - 20/04/96
	544 - 22/05/95	567 - 17/04/96
	545 - 17/05/95	568 - 17/04/96
	546 - Turismo	569 - 15/04/96
	547 - 30/06/95	570 - Turismo
	548 - 26/06/95	571 - 17/04/96
	549 - 04/07/95	572 - 20/04/96
	550 - 26/07/95	573 - 20/04/96
	551 - 09/08/95	574 - 08/05/96
	552 - 23/08/95	575 - 08/05/96
	553 - 24/09/95	576 - 15/05/96
	554 - 27/10/95	577 - 22/05/96
	555 - 27/10/95	578 - 30/05/96
	556 - 12/12/95	579 - 18/06/96
	557 - 29/11/95	580 - 16/06/96
	558 - 28/11/95	581 - 19/06/96
	559 - 28/11/95	582 - 24/06/96
	560 - 12/12/95	583 - Turismo
561 - 15/12/95	584 - Turismo	
562 - 14/12/95	585 - Turismo	
563 - 03/01/96		

Tabela 3 - Características técnicas dos elétricos tipo 700 [6].

CARACTERÍSTICAS	
CAIXA	
Comprimento total (mm)	8 385
Largura (mm)	2 378
Altura (mm)	3 190
Altura do pavimento ao 1º degrau (mm)	368
Lotação	42 (24 sentados +18 de pé)
Construção da caixa	Madeira
Tara (kg)	±10 800
PORTAS	
Nº x Largura útil (mm)	2 x ± 820
Tipo	Folhas rebatíveis
Comando	Electropneumático
SUSPENSÃO	
Primária	Molas helicoidais
Secundária	Molas de lâminas

Tabela 3 (continuação) - Características técnicas dos elétricos tipo 700 [6].

FRENAGEM		
De Serviço		Pneumática às rodas
De Emergência		Pneumática+electromagnética ao carril
De Perigo		Pneumática+electromagnética ao carril +inversão de motores
De Parque		Manual às rodas
BOGIES MOTORES		
Quantidade		1
Bitola	(mm)	900
Diâm. rodas máx./ mín.	(mm)	851 /768
MOTORES DE TRACÇÃO		METROPOLITAN VICKERS
Tipo		MV 115
Nº de unidades		2
Potência	(kW)	33
ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA		LINHA AÉREA DE CONTACTO
Captação de corrente		Trolley (roldana)
Controlo de velocidade		Controller K33 - Reostático
EQUIPAMENTOS AUXILIARES		
Areeiros		Manual por gravidade
Alimentação circuitos auxiliares		Alternador / Conversor + Baterias
Baterias		Chumbo DC 24V, 66Ah
CONVERSOR ESTÁTICO		EFACEC
Tensão de entrada DC	(V)	600 +20% - 30%
Corrente de saída	(A)	9,5
Tensão saída DC	(V)	24

2.2.2. Coletores de Corrente Elétrica

Os coletores de corrente elétrica desempenham um papel crucial nos sistemas de transporte público eletrificados, como comboios, elétricos, metros e autocarros elétricos. Estes dispositivos são responsáveis por fornecer energia aos veículos em movimento, permitindo-lhes operar de forma eficiente e sustentável.

No passado, os sistemas de transporte público eram frequentemente alimentados por motores a combustão interna. No entanto, com o aumento da consciencialização ambiental e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, a eletrificação dos transportes públicos tornou-se uma prioridade em muitas cidades ao redor do mundo.

Os coletores de corrente elétrica, também conhecidos como pantógrafos ou trolleys, são os dispositivos responsáveis por captar a energia elétrica das linhas aéreas ou dos carris condutores, e transmiti-la aos veículos. Estes consistem em estruturas mecânicas que são montadas no topo dos veículos e entram em contacto com a fonte de energia elétrica enquanto estão em movimento.

Estes coletores de corrente elétrica são projetados para garantir uma conexão fiável e contínua entre o veículo e a fonte de energia, mesmo durante as variações de velocidade e condições adversas. São equipados com mecanismos de mola e sistemas de controlo que permitem a adaptação às variações de altura e posição das linhas aéreas ou carris condutores.

Para além de fornecer energia aos veículos, os coletores de corrente elétrica também desempenham um papel importante na regulação da velocidade e no controlo da travagem dos transportes públicos eletrificados. São projetados para suportar correntes elétricas elevadas e garantir uma distribuição adequada da energia elétrica para os sistemas de tração dos veículos.

Com o avanço da tecnologia, os coletores de corrente elétrica estão a tornar-se mais eficientes, compactos e duráveis. Materiais de alta resistência, como aço inoxidável e ligas de cobre, são frequentemente utilizados na fabricação destes dispositivos para garantir uma longa vida útil e menor necessidade de manutenção.

No contexto de um sistema de transporte público eletrificado, os coletores de corrente elétrica desempenham um papel essencial na viabilização da mobilidade sustentável. Permitem que os veículos operem com energia limpa, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e melhorando a qualidade do ar nas áreas urbanas.

O contínuo estudo e desenvolvimento dos coletores de corrente elétrica é fundamental para otimizar a eficiência e a fiabilidade dos sistemas de transporte público eletrificados, contribuindo para a construção de cidades mais sustentáveis e inteligentes.



1882: O primeiro “trolleybus”
elétrico pela Siemens



Coletor de Arco



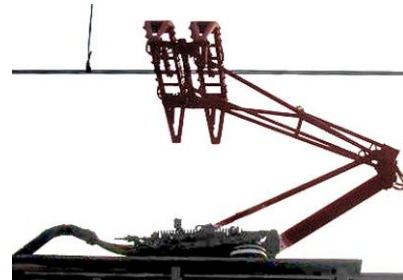
Braço de Trolley com Roda



Pólo Coletor



“Calço” de Contacto



Pantógrafo

Figura 5 - Exemplos de mecanismos de recolha de corrente elétrica [7].

Com o aumento da urbanização e o conseqüente aumento da procura por transportes públicos, os sistemas como o elétrico de cidade têm sido amplamente utilizados em todo o mundo. O braço de trolley é uma peça fundamental nesses sistemas, permitindo a transferência da eletricidade da rede aérea para o veículo. A sua invenção em 1885 é atribuída a Charles Joseph Van Depoele, engenheiro belga que emigrou para os Estados Unidos em 1869 [8].

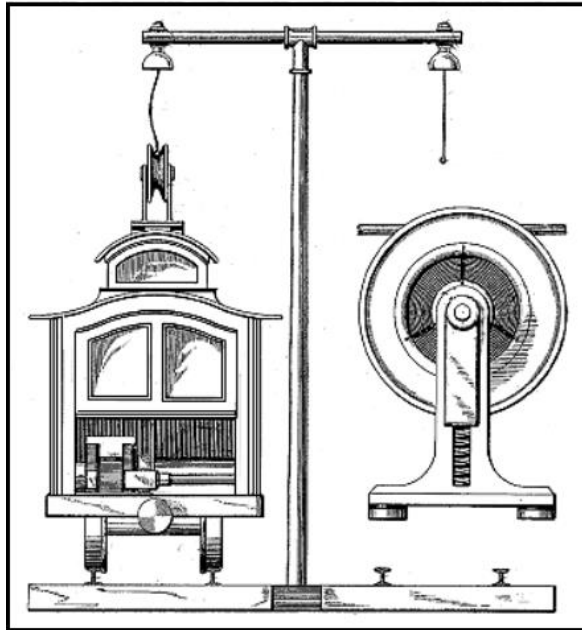


Figura 6 - Imagem da US Patent 331585 de 1885 de Charles Van Depoele do primeiro braço de trolley a obter a energia num sistema por baixo da catenária [9].

Embora o braço de trolley seja um componente crítico, ainda são frequentemente subestimados e recebem menos atenção do que outros sistemas de recolha de eletricidade do sistema de transporte. A fiabilidade, a durabilidade e a manutenção adequada desses braços de trolley são fatores cruciais para o bom funcionamento e eficiência do sistema.

O braço de trolley é um componente fundamental dos elétricos que permite a transmissão de energia elétrica do sistema de alimentação da linha aérea para o motor do veículo. A sua origem remonta aos primeiros sistemas de transporte elétrico, desenvolvidos na segunda metade do século XIX. Na época, o braço de trolley era feito de madeira e revestido com uma folha de cobre, e o seu deslizamento sobre a linha aérea era auxiliado por um sistema de molas.

No. 663,788.

Patented Dec. 11, 1900.

W. SCHROETER & A. KAUTZMANN.
TROLLEY POLE.

(Application filed June 11, 1900.)

(No Model.)

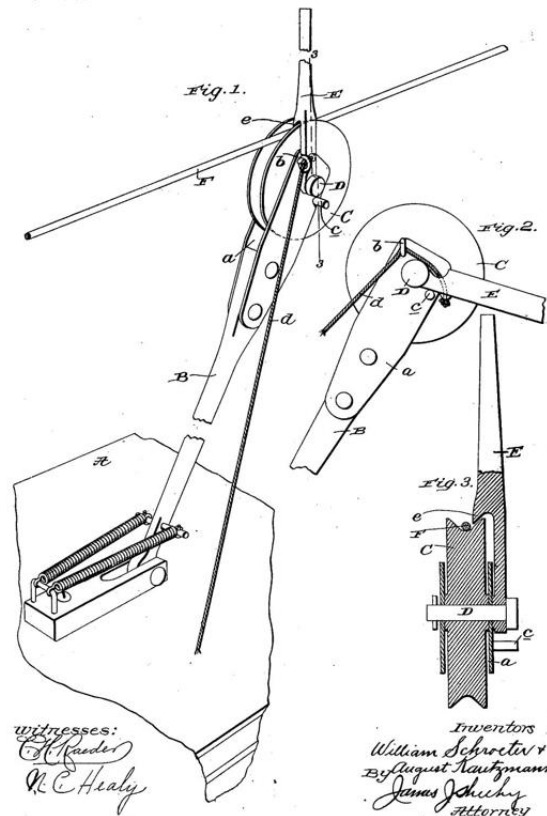


Figura 7 - Desenho de uma patente dos Estados Unidos (US 663788) do ano de 1900, ilustrando a roldana e o uso de molas no Braço de Trolley [10].

Com o avanço da tecnologia, os braços de trolley foram-se desenvolvendo e tornando-se mais eficientes, fiáveis e duráveis. Na década de 1920, foram introduzidos os braços de trolley articulados, que permitiam uma maior flexibilidade na transmissão de energia, e na década de 1950, surgiram os pantógrafos, que possuíam maior área de contacto com a linha aérea e menor desgaste [8].

Atualmente, os modernos braços de trolley são produzidos com materiais como alumínio e ligas de cobre, e são capazes de transmitir potências elevadas com eficiência e segurança [8]. A evolução desse componente ao longo dos anos tem sido essencial para o desenvolvimento do transporte público elétrico e para a redução das emissões de gases poluentes.

A manutenção do braço de trolley de um elétrico é um processo fundamental para garantir a segurança dos passageiros e a eficiência do sistema elétrico. Essa manutenção envolve diversas etapas, desde a inspeção e limpeza do equipamento até à reparação ou substituição de peças danificadas.

A primeira etapa da manutenção é a inspeção visual do braço de trolley. É necessário verificar se as peças estão desgastadas, se há danos na superfície, se os componentes estão soltos ou corroídos. Em seguida, o equipamento é limpo e lubrificado.

Uma outra etapa importante é a verificação do contacto elétrico entre o braço de trolley e a rede aérea. O mau contacto pode causar interrupções no fornecimento de energia e gerar riscos para os passageiros. Por isso, é necessário verificar se os contactos estão limpos e bem fixados.

Além disso, é importante realizar inspeções periódicas para verificar a integridade do sistema elétrico do braço de trolley. Isso inclui a verificação do isolamento elétrico, o teste de resistência dos condutores e a medição da corrente elétrica.

A manutenção preventiva do braço de trolley também envolve a substituição de peças danificadas ou desgastadas. As peças mais comumente substituídas são as molas, os contactos elétricos, as roldanas e as barras coletoras.

Por fim, é importante mencionar que a manutenção do braço de trolley deve ser realizada por profissionais treinados e qualificados. Esses profissionais devem seguir as normas de segurança e as recomendações dos fabricantes para garantir a eficiência do sistema elétrico e a segurança dos passageiros.

Os principais componentes de um braço de trolley moderno de um elétrico, bem como os materiais geralmente utilizados no seu fabrico são [8]:

1. Tubo ou braço de metal: é a principal peça do braço de trolley, geralmente feita de cobre ou alumínio de alta condutividade.
2. Suporte: fixa o braço de metal ao resto do veículo, sendo geralmente feito de aço ou outro metal resistente.

3. Isoladores: mantêm a barra de metal isolada da estrutura do veículo, evitando o risco de choque elétrico. São geralmente feitos de materiais isolantes, como porcelana, borracha ou polímeros.
4. Eixos de rotação: permitem que o tubo de metal se mova livremente sobre os suportes, reduzindo o atrito e prolongando a vida útil do sistema. São geralmente feitos de aço ou outro metal resistente.
5. Molas: mantêm a pressão adequada entre a barra de metal e o cabo de alimentação, garantindo um contacto elétrico confiável. São geralmente feitas de aço ou outro metal resistente.
6. Cabo de alimentação: é responsável por levar a energia elétrica do sistema de alimentação do veículo para o tubo de metal. É geralmente feito de cobre ou alumínio de alta condutividade.

A manutenção do braço de trolley de um elétrico deve incluir inspeções regulares dos componentes, limpeza dos contactos elétricos, substituição de peças desgastadas ou danificadas, lubrificação dos rolamentos, quando existem, e verificação da integridade dos isoladores e proteções. A frequência e o tipo de manutenção podem variar de acordo com a idade e as condições de operação do veículo.

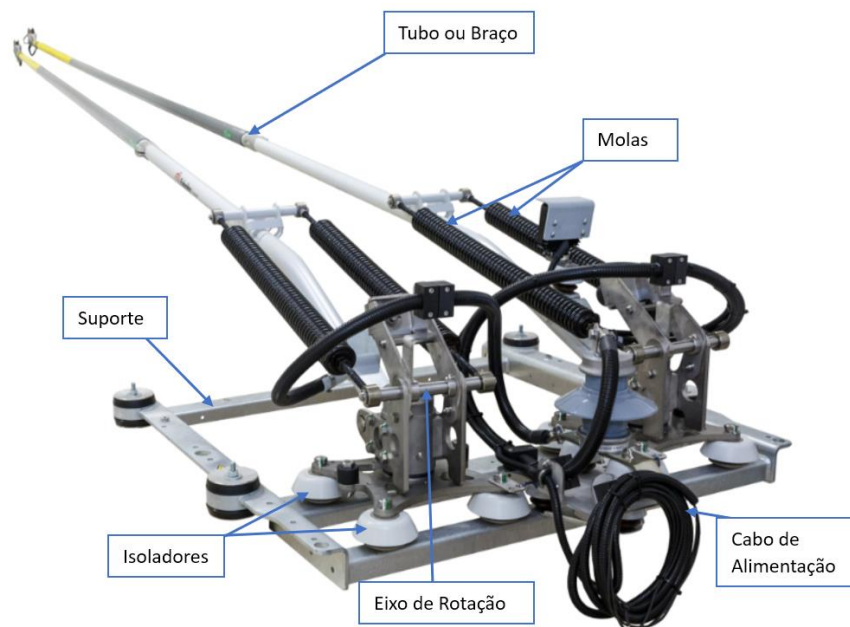


Figura 8 - Componentes de um moderno Braço de Trolley [11]

Página intencionalmente deixada em branco

3. Modelação do Braço de Trolley

3.1. Apresentação do Caso de Estudo

Nesta tese será estudado o Braço de Trolley dos elétricos antigos que circulam nas ruas históricas de Lisboa. Este equipamento tem como elementos principais a Roldana, o Tubo, a Forquilha, o Suporte das Molas, as Molas, a Base e os Tirantes, conforme se pode ver na figura 9 em baixo.

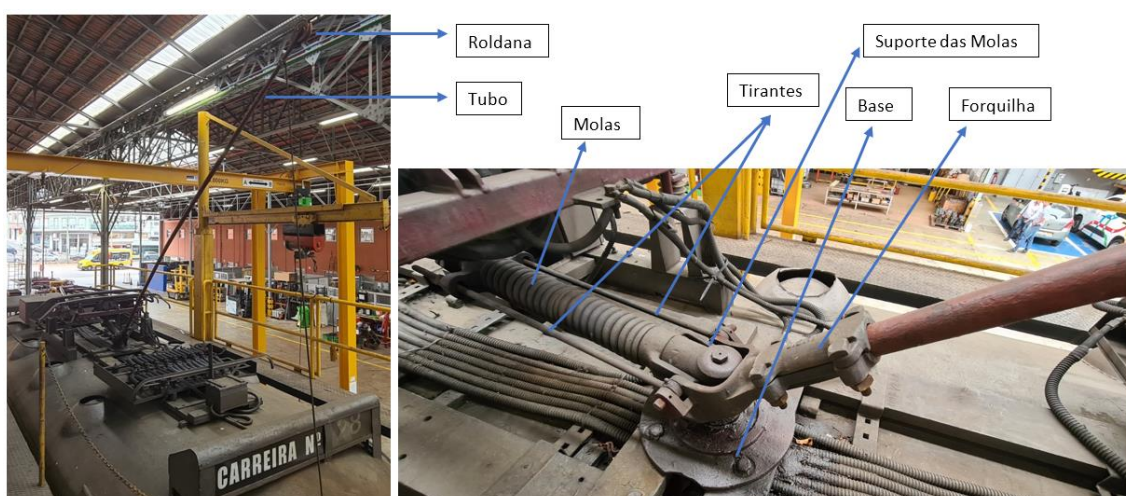


Figura 9 – Principais elementos que compõem o braço de trolley.

O Braço de Trolley tem como função obter a energia elétrica a partir da catenária para alimentar o grupo motriz do carro elétrico. Para tal, a Roldana que se encontra na ponta superior do Tubo, mantém-se em contacto com a catenária e a energia elétrica circula pelo Tubo, pela Forquilha, até chegar à Base, onde posteriormente já será conduzida por um condutor elétrico até ao motor do carro. Para garantir o contacto contínuo da Roldana com a catenária existe um conjunto de duas molas que exercem uma força, que por sua vez é transmitida a um conjunto de dois tirantes que colocam a Forquilha num ângulo próximo dos 45°, e esta última mantém o Tubo e a Roldana elevados até à altura da catenária.



Figura 10 - Pormenor da Roldana no topo do Tubo em contacto com a catenária.

Para que o carro elétrico possa efetuar as curvas existe uma junta de rotação entre o elemento denominado Suporte das Molas e a Base, que está fixa ao topo da viatura. Esta junta é composta por um eixo fixo à Base e por um casquilho colocado num olhal do Suporte das Molas. Nas duas imagens seguintes pode-se observar o eixo de rotação fixo à Base e, também, o casquilho introduzido no olhal do Suporte das Molas.



Figura 11 - Eixo de rotação fixo ao elemento Base que permite que o carro elétrico efetue as curvas mantendo sempre a Roldana em contacto com a catenária.



Figura 12 - Casquilho introduzido no olhal do elemento Suporte das Molas que permite a rotação quando o carro elétrico efetua as curvas.

O Braço de Trolley é ajustado nas oficinas da Carris de Santo Amaro em Lisboa, mediante aperto e ajuste das suas molas, de modo a que a Roldana fique em contacto com a catenária e sofra a ação de uma força descendente de cerca de 11 kgf [12], conforme a Instrução de Trabalho da Carris IT/UNE/061/2009.

Durante a sua operação o Braço de Trolley sofre um elevado desgaste mecânico. Esta situação deve-se às forças que lhe são aplicadas, às vibrações a que está sujeito, sendo estas agravadas também pela passagem de corrente elétrica através dos seus componentes. Em seguida apresentam-se alguns dos principais danos que o Braço de Trolley apresenta quando recolhe para manutenção corretiva nas oficinas da Carris.

O dano mais comum e mais frequente é o desgaste assimétrico apresentado pelos veios e casquilhos das várias juntas de rotação do Braço de Trolley, em especial dos olhais do Suporte das Molas e da Forquilha. Na figura 13 pode-se observar o estado com que os casquilhos e veios dos referidos elementos do Braço de Trolley chegam às oficinas da Carris.



Figura 13 – Exemplos de desgaste de alguns elementos do Braço de Trolley: (a) Casquilho com desgaste assimétrico; (b) veio com desgaste e algumas fraturas na sua estrutura;

Outro dos problemas que ocorre com alguma frequência é a rutura dos olhais da Forquilha que efetuam a ligação mecânica com os Tirantes. Estes últimos transferem a força exercida pelas molas para os referidos olhais, por forma a que a Forquilha mantenha o Tubo e a Roldana elevados, para que ocorra o contacto elétrico com a catenária.



Figura 14 - Exemplo de uma Forquilha que entrou para manutenção nas oficinas da Carris devido à falha de um dos seus olhais.



Figura 15 - Rutura de um dos olhais da forquilha por ação da força exercida por um dos Tirantes.

A Roldana também é um dos elementos que com alguma frequência tem de ser mantido ou substituído, dado que este elemento se mantém sempre em contacto com a catenária. A Roldana é feita à base de uma liga de cobre para garantir uma elevada condutividade elétrica, no entanto, sofre bastante desgaste por contactar com o metal mais duro que constitui a catenária. A acrescentar a este fator, estão as vibrações que esta sofre no desempenho da sua função, alguns impactos com a própria catenária e a passagem de corrente elétrica, que também causa desgaste no material.



Figura 16 - Roldana para manutenção nas oficinas da Carris.

Para finalizar, o Tubo que faz a ligação mecânica da forquilha à Roldana também é um dos elementos que sofre mais danos ao longo da sua operação. Como se pode verificar na figura 17, este sofre mesmo fraturas com remoção de material e também empenos. Esta situação deve-se ao facto de ter de suportar o peso da Roldana e da força que esta continuamente tem de exercer na catenária, na ordem dos 11 kgF [12].



Figura 17 - Tubo em manutenção nas oficinas da Carris.

Os elementos que constituem o Braço de Trolley serão modelados no software *Solidworks* e será feita uma montagem (“Assembly”) de todos os elementos para se obter o Braço de Trolley completo.

3.2. Modelo Geométrico do Braço de Trolley

Para a realização deste estudo foi necessário efetuar a modelação de todas as peças que compõem o Braço de Trolley utilizado pela Carris. No entanto, como não existem quaisquer registos escritos ou especificações das peças que o compõem, existindo apenas um desenho técnico de 1970 da peça denominada Forquilha, que pode ser consultado no anexo I, foi necessário efetuar várias visitas às oficinas da Carris por forma a identificar cada peça que constitui o Braço de Trolley, e para efetuar medições das mesmas, para a realização do modelo geométrico do conjunto. Na figura 18, podem ser vistas todas as peças que constituem o Braço de Trolley, resultado da desmontagem de um equipamento nas oficinas da Carris, por forma a ser intervencionado.

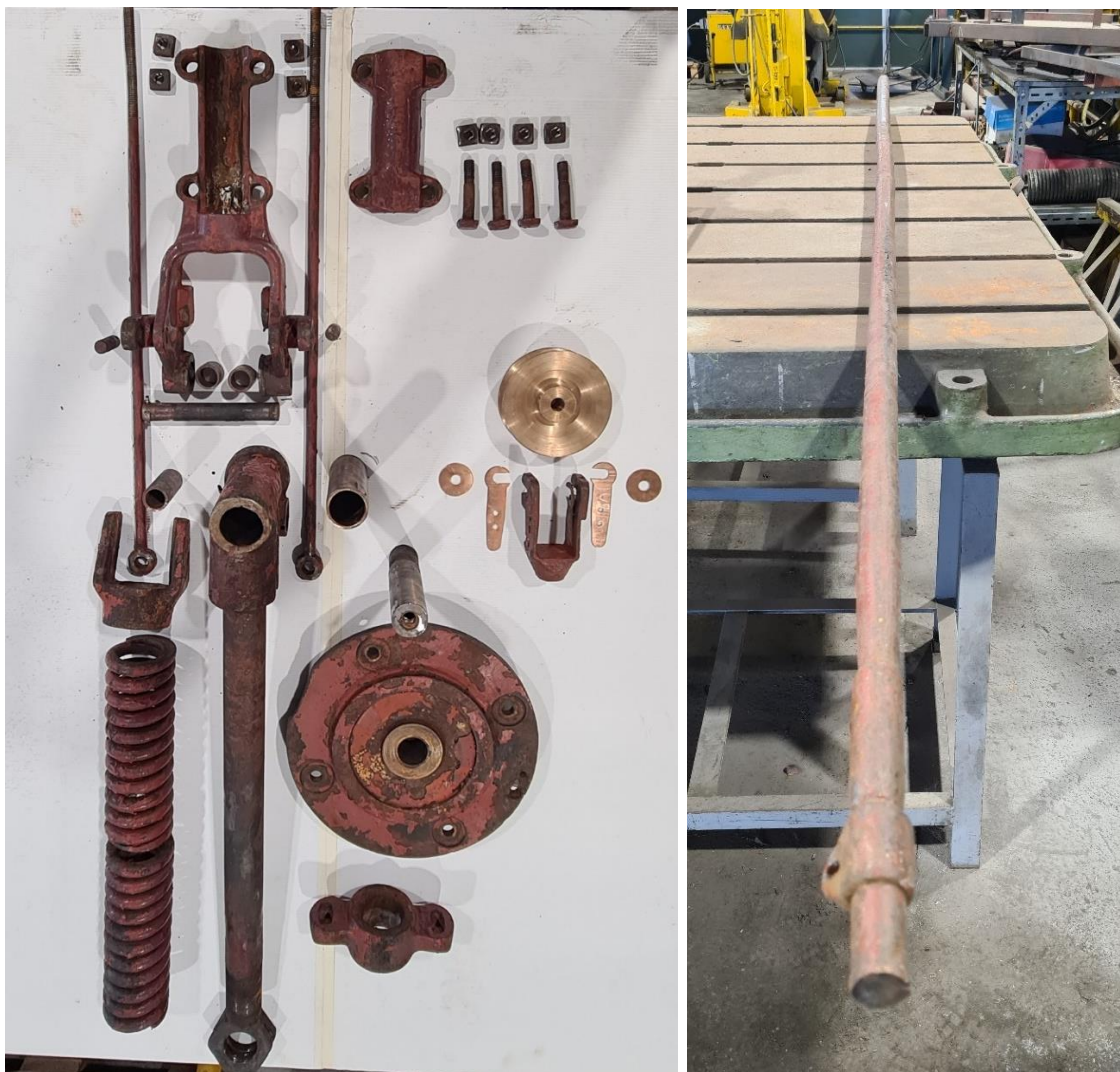


Figura 18 – As várias peças que constituem o Braço de Trolley

Nas figuras seguintes são apresentados os principais componentes que constituem o Braço de Trolley que foram modelados no software *Solidworks*, sendo que cada figura contém ainda uma imagem ao lado da peça real.

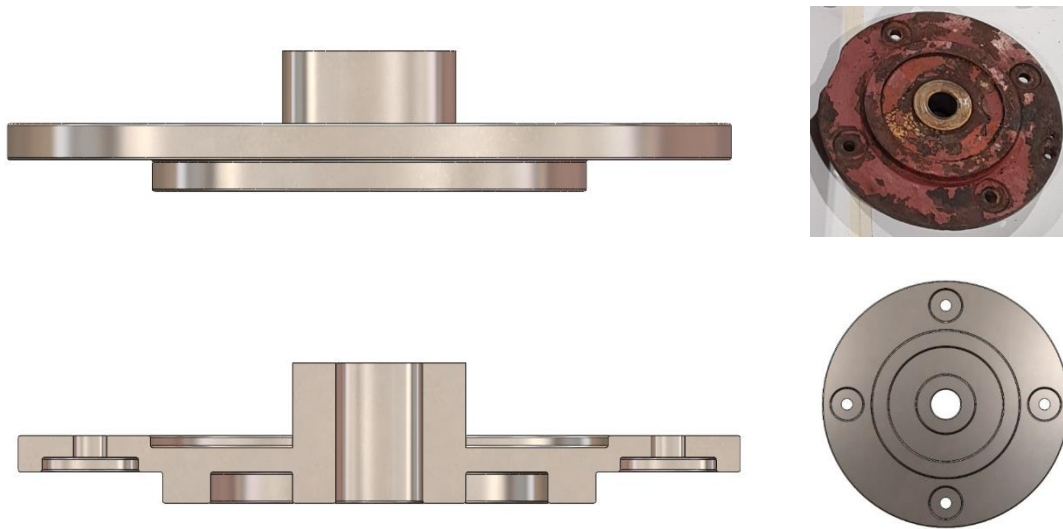


Figura 19 - Modelo da Base em Solidworks.



Figura 20 - Modelo geométrico do Suporte das Molas.



Figura 21 - Modelo geométrico das Molas.

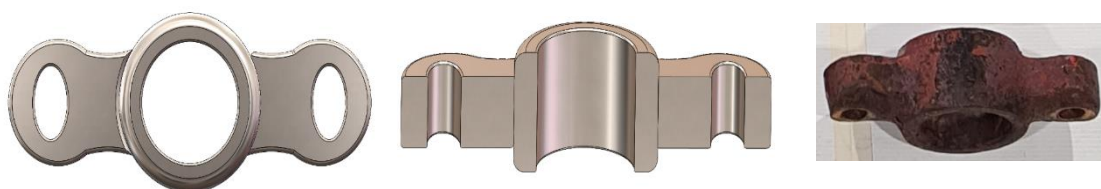


Figura 22 - Modelo geométrico da peça de fixação/compressão das Molas.



Figura 23 - Modelo geométrico da peça de encosto das molas.



Figura 24 - Modelo geométrico dos tirantes.

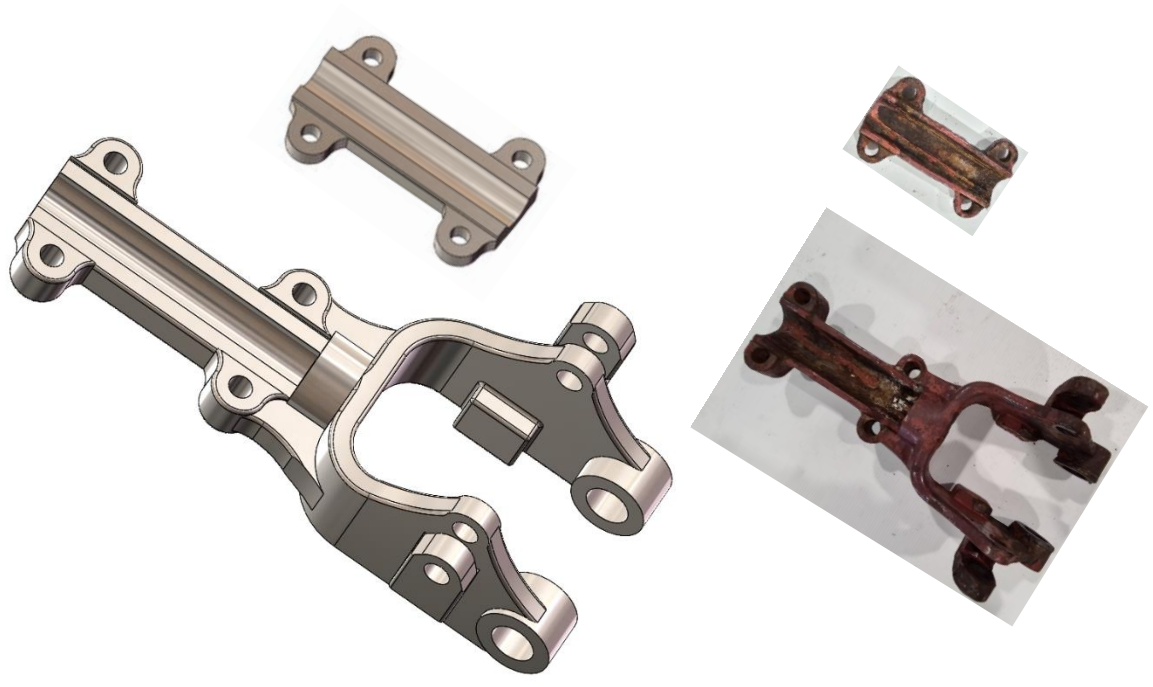


Figura 25 - Modelo geométrico das duas peças que compõem a Forquilha.

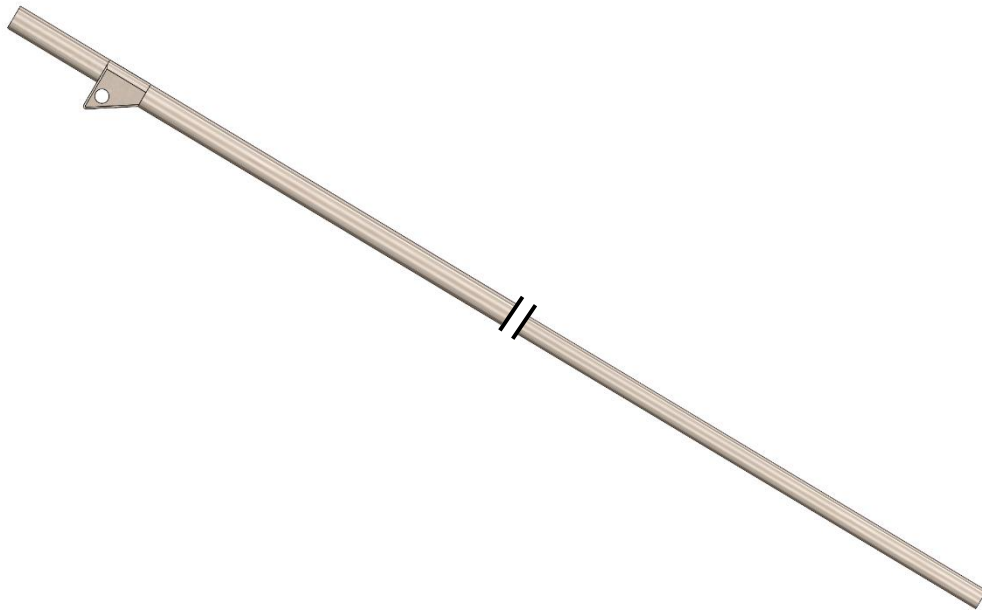


Figura 26 - Modelo geométrico do tubo/varão que suporta a Roldana de contacto com a catenária.



Figura 27 - Modelo geométrico do Suporte da Roldana, da Roldana, e dos acessórios de fixação.

No anexo II poderão ser encontrados os desenhos técnicos dos modelos geométricos construídos a partir das peças reais que constituem o Braço de Trolley.

Nas duas imagens seguintes apresenta-se a montagem (assembly) do Braço de Trolley efetuada no software *Solidworks* utilizando os modelos geométricos obtidos a partir de cada uma das peças reais que o constituem.



Figura 28 - Montagem completa do Braço de Trolley utilizando os modelos geométricos modelados no software *Solidworks*.

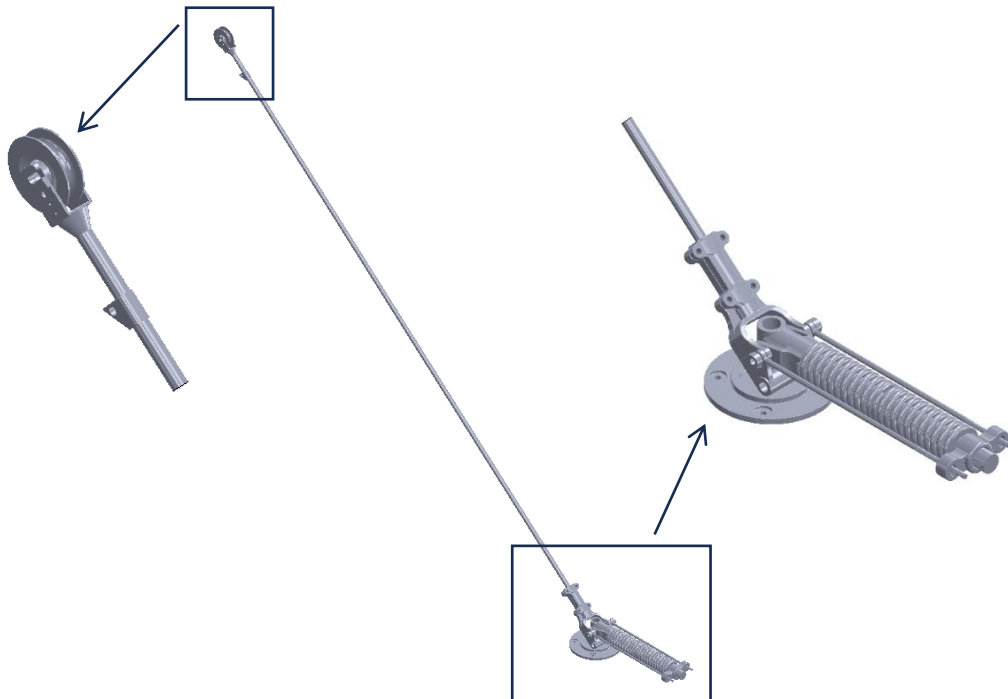


Figura 29 – Pormenor da montagem do Braço de Trolley utilizando os modelos geométricos modelados no software *Solidworks*.

3.3. Verificação do Modelo

Por forma a se verificar o modelo geométrico do Braço de Trolley, foi efetuado um estudo analítico, que foi comparado com os resultados obtidos no software *Solidworks*. Foi ainda realizada uma simulação no software *FTool* de modo a se ter mais um termo comparativo para os resultados obtidos anteriormente.

Assim, para se verificar o modelo considerou-se a aplicação de uma carga vertical na ponta do tubo que suporta a roldana no valor de 11 kgf [12], conforme está descrito na Instrução Técnica da Carris IT/UNE/061/2009. Este valor foi arredondado para 110 N. Foi ainda estipulado a aplicação de um constrangimento total, tanto ao movimento de translação como ao de rotação, no outro extremo do tubo, que seria a localização da base do Braço de Trolley. Em termos analíticos, utilizou-se o 2º Teorema de Castigliano e só foram considerados os esforços Axiais e de Flexão, tendo sido desprezados os esforços de corte e de torção. Nesta verificação também se considerou que a inclinação do tubo do Braço de Trolley estaria a 41°, dado ser este o ângulo que foi verificado que o tubo estaria quando é feito o aperto das molas nas oficinas da Carris com uma carga de 11 kgf na ponta elevada do tubo. Assim, significa que na direção vertical estará aplicada uma força de intensidade 83 N no sentido descendente e na direção horizontal uma força de intensidade 73 N no sentido da ponta elevada do tubo para a base. Em termos de material, e dado não haver dados disponíveis na Carris relativamente aos materiais utilizados no Braço de Trolley, considerou-se que, à exceção da Roldana, todos os outros elementos do Braço de Trolley eram constituídos por aço ligado (*Alloy Steel*). O peso dos componentes não foi tido em conta para a verificação do modelo geométrico pelos vários métodos referidos.

Seguidamente apresenta-se a validação do modelo que foi efetuada no software *FTool*. Na figura 30 pode-se ver que a aplicação de uma carga vertical na ponta do tubo de 110 N foi decomposta nas respetivas cargas horizontal e vertical. Como referido anteriormente, só foram tidos em conta os esforços Axiais e de Flexão. Relativamente à secção, introduziram-se as dimensões do tubo com 27 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, dando resultado a um 2º Momento de Área (I) de $1,235 \times 10^4 \text{ mm}^4$.

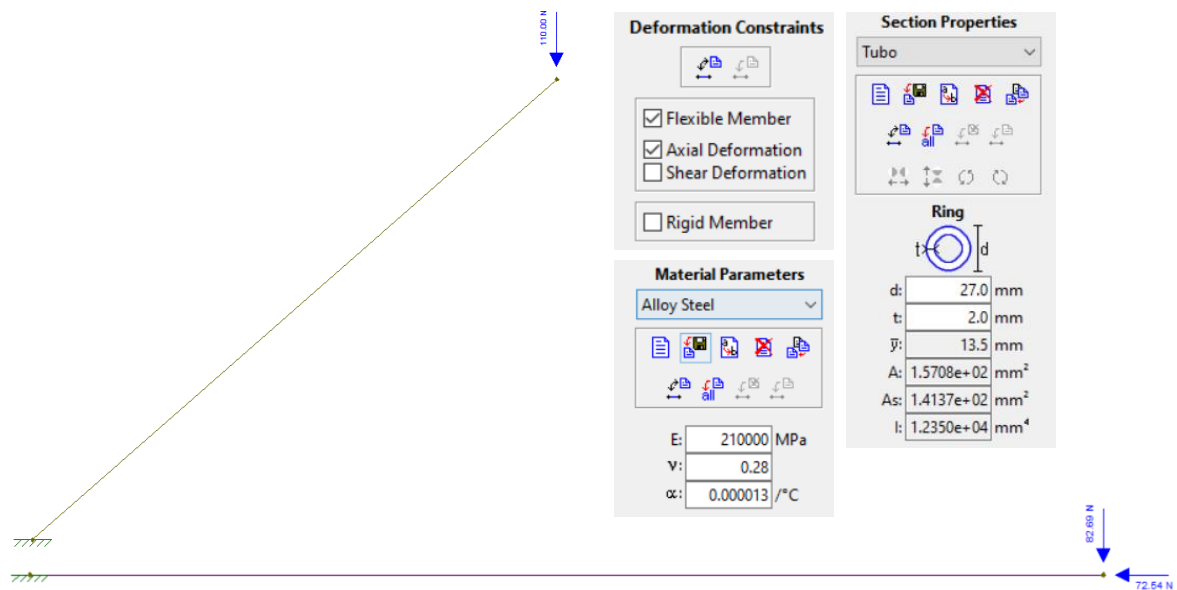


Figura 30 - Decomposição da força de 110N que é aplicada na ponta elevada do Tubo do Braço de Trolley para validação do modelo no software Ftool.

Tabela 4 - Propriedades do material "Alloy Steel" usadas no software Ftool.

Propriedades do Material "Alloy Steel" usado no software Ftool	
Módulo de Elasticidade (E)	$2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poison (ν)	0,28

Tabela 5 - Propriedades da Secção do Tubo usadas no software Ftool.

Propriedades da Secção do Tubo usado no software Ftool	
Diâmetro (d)	27 mm
Espessura (t)	2 mm
Centroide (\bar{y})	13,5 mm
Área da Secção (A)	157 mm^2
Secção Efetiva de Corte (A_s)	$141,4 \text{ mm}^2$
2º Momento de Área (I)	12350 mm^4

Após o cálculo pelo Ftool, obteve-se uma deformada vertical (em y) igual a 538,3 mm. Relativamente às reações na outra ponta do tubo que estava encastrada, obteve-se uma reação horizontal (x) de 72,54 N, vertical (y) de 82,69 N e um momento de 306 N.m.

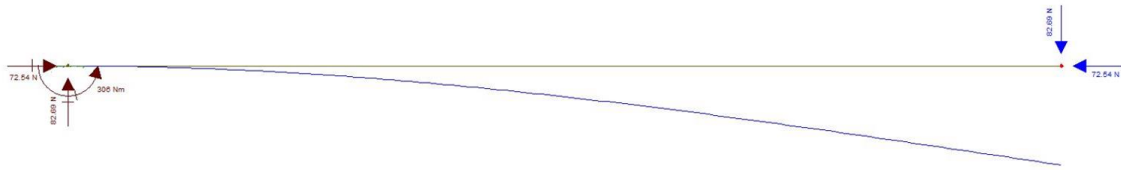


Figura 31 - Detalhe do software FTool da deformação vertical do tubo e das reações no apoio após a aplicação da carga de 110N na ponta do tubo.

Tabela 6 - Valores das deformadas e da rotação no estudo efetuado no software Ftool.

Deformada em “x”	- 0,008 mm
Deformada em “y”	- 538,3 mm
Rotação	- 0,218 rad

Seguidamente, foi criado e calculado o mesmo modelo no software *Solidworks*, onde se isolou apenas o Tubo que suporta a Roldana, que por sua vez contacta com a catenária e se aplicou o carregamento referido anteriormente (110 N) na ponta do Tubo, conforme se pode verificar na figura 32. Neste estudo de verificação no *Solidworks* utilizou-se como elemento de malha o elemento viga para modelar o Tubo, tendo a malha 181 elementos e 183 nós.

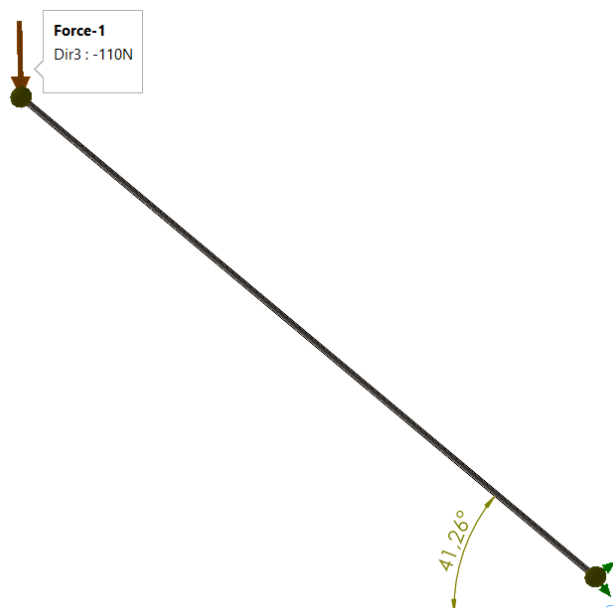


Figura 32 - Imagem do carregamento de 110 N aplicado ao Tubo no software Solidworks.

Tabela 7 - Detalhes da malha aplicada ao Tubo no software Solidworks para efeitos de verificação do modelo.

Detalhes da Malha	
Elementos	181
Nós	183

Tabela 8 - Detalhes do elemento viga e do material utilizados no estudo de verificação do modelo no software Solidworks.

Detalhes do Elemento Viga	
Material	“Alloy Steel”
Modelo	Linear Elástico e Isotrópico
Área da Seção (A)	157,08 mm
2º Momento de Área (I)	12350 mm ⁴
Rigidez Torsional (J)	24701 mm ⁴
Módulo de Elasticidade (E)	2,1x10 ¹¹ N/m ²
Coefficiente de Poison (ν)	0,28
Módulo de Corte (G)	7,9x10 ¹⁰ N/m ²
Massa Específica do Material (ρ)	7700 kg/m ³
Tensão de Rutura (σ _u)	7,238x10 ⁸ N/m ²
Tensão de Cedência (σ _e)	6,204x10 ⁸ N/m ²

Como referido anteriormente, os esforços de corte não foram considerados neste estudo de verificação do modelo no software *Solidworks*.

Com a execução da simulação do estudo no módulo *Simulation* do *Solidworks*, verificou-se que a deformada vertical (y) do tubo era de -538,3 mm, tal como se pode constatar na figura 33. Relativamente às reações no apoio fixo, ou seja, na ponta do tubo que se considerou encastrada, obteve-se uma reação horizontal (x) de 72,547 N, vertical (y) de 82,686 N e um momento de 306 N.m. Estes valores estão em linha com o que se tinha obtido no *Ftool*.

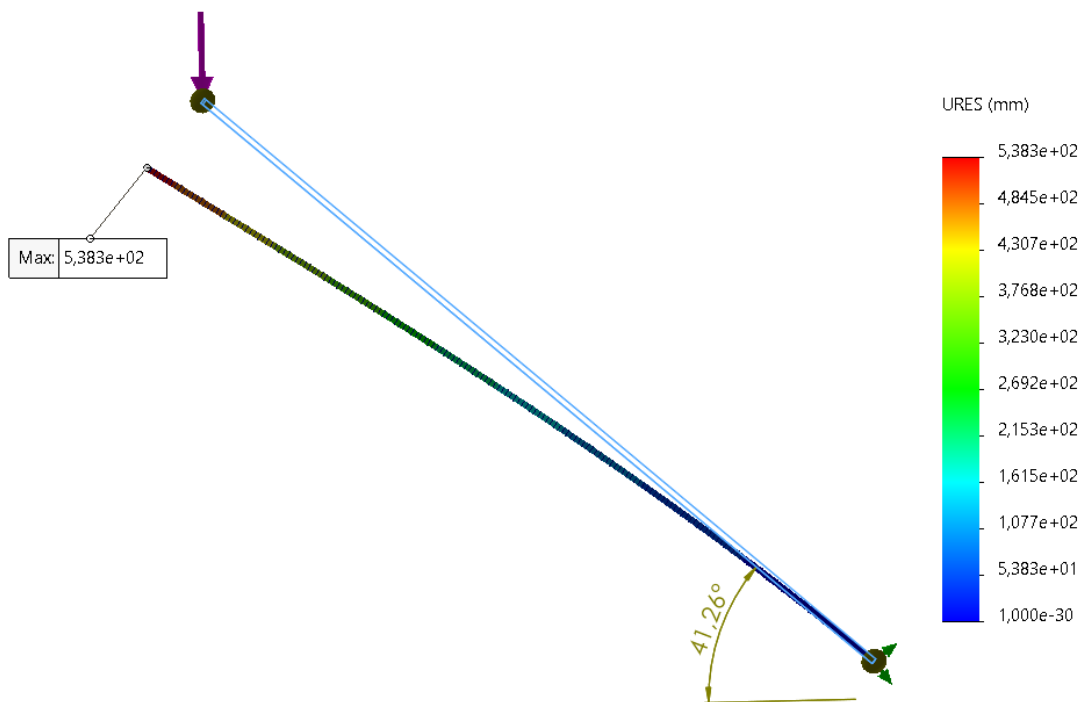


Figura 33 - Resultado da deformada vertical após a execução da simulação no módulo *Simulation* do software *Solidworks*.

Tabela 9 - Valor das reações obtido na simulação em *Soliworks* só com o Tubo por forma a se validar o modelo utilizado.

Reação horizontal (x)	72,6 N
Reação vertical (y)	82,7 N
Momento na Base do Tubo	306 N.m

Seguidamente à simulação executada em *Solidworks* apenas com o tubo do Braço de Trolley, foi efetuada uma simulação incluindo mais alguns elementos da montagem (*Assembly*) do Braço de Trolley, nomeadamente, o suporte das molas e a forquilha. Neste caso, obteve-se uma deformada vertical (y) de -506,2 mm e uma tensão equivalente de von Mises de 140,3 MPa, como pode ser constatado nas duas figuras seguintes.

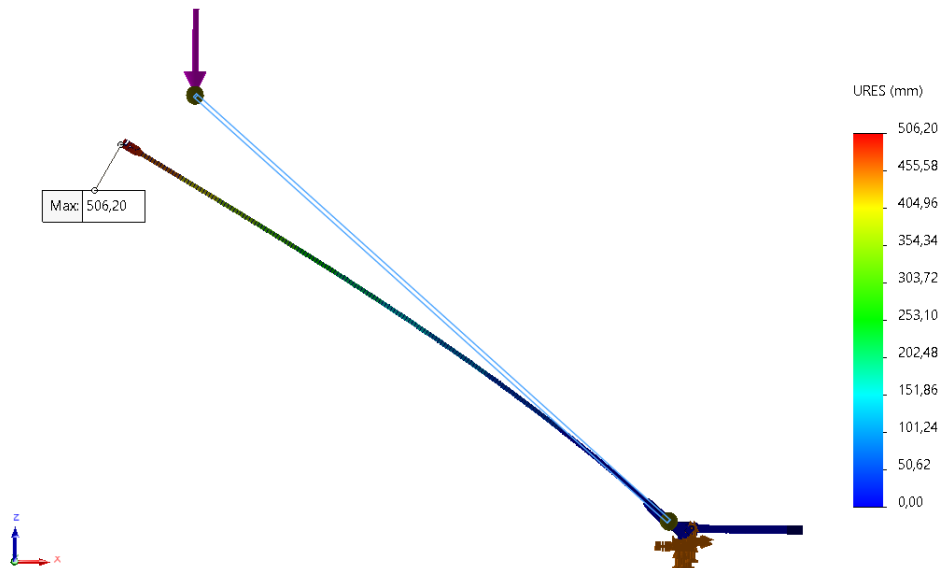


Figura 34 – Resultado da deformada vertical após a aplicação da carga de 110 N no tubo e considerando mais elementos do Braço de Trolley.

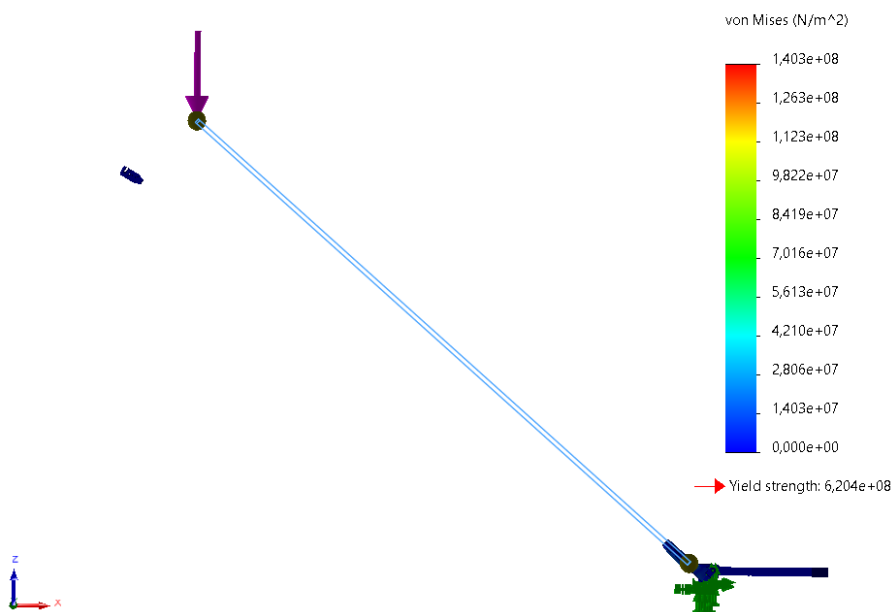


Figura 35 - Resultado da tensão equivalente de von Mises após a aplicação da carga de 110 N no tubo e considerando mais elementos do Braço de Trolley.

O menor valor no resultado da deformada vertical obtido nesta última simulação comparativamente com o valor obtido apenas com o tubo faz todo o sentido, dado que devido à forquilha, uma parte do tubo fica restringida, ou de outro modo, encastrada. Na figura 36, obtida no software *Solidworks*, pode ser visto que há nove elementos viga que ficam restringidos pela forquilha, deste modo, é como se o tubo tivesse um menor comprimento, e assim, a deformada observada para a aplicação de uma mesma carga teria de ser inferior.

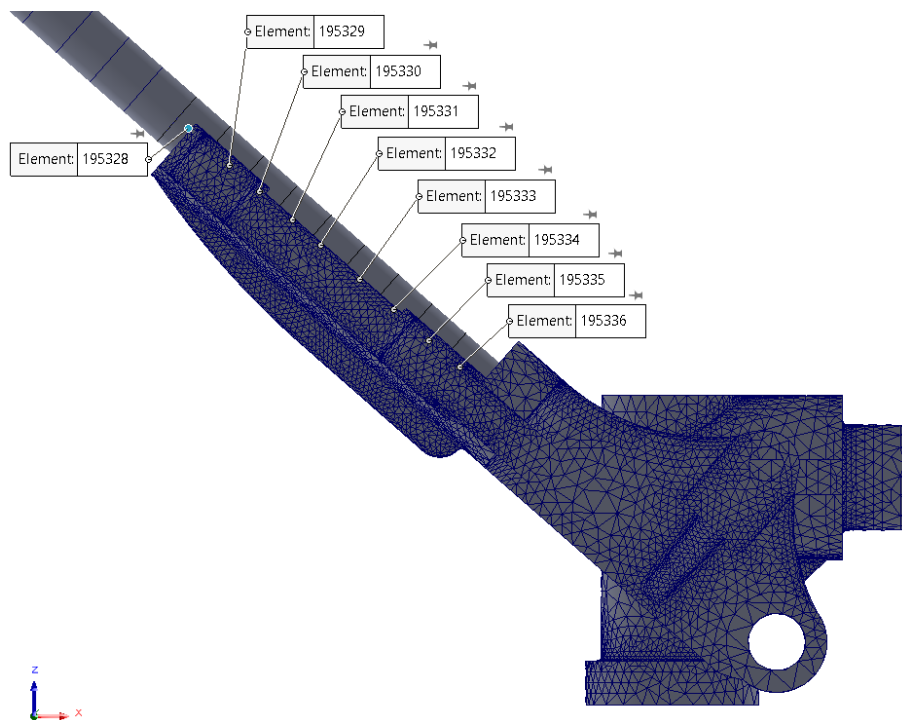


Figura 36 - Elementos viga que ficam restringidos pela forquilha na simulação com o Braço de Trolley completo.

Posteriormente ao estudo de verificação do modelo no *Solidworks*, foi efetuado o cálculo analítico com os mesmos pressupostos, usando o 2º Teorema de Castigliano, e recorrendo ao software *Maple*, que pode ser consultado no anexo III. Assim, na tabela seguinte apresentam-se os resultados comparativos do estudo de verificação do modelo. Com base nos valores obtidos, pode-se concluir que o modelo geométrico utilizado para simular a operação do Braço de Trolley é válido.

Tabela 10 - Tabela comparativa dos resultados obtidos no estudo de verificação do modelo geométrico do Braço de Trolley.

Grandeza	Numérico (SolidWorks)	Software FTool	Analítico (Maple)	% Desvio (Soliworks vs Analítico)
Reação em x	72,55 N	72,54 N	72,54 N	0,014 %
Reação em y	82,65 N	82,69 N	82,69 N	-0,048 %
Momento	305,81 N.m	305,95 N	305,95 N.m	-0,046 %
Deformada em y (Só com o Tubo)	-538,3 mm	-538,3 mm	-538,3 mm	0,0 %
Deformada em y (Tubo, Forquilha e Base)	-506,20 mm	--	--	--

4. Estudo dos esforços sofridos pelo Braço de Trolley por elementos finitos

O estudo dos esforços sofridos pelo Braço de Trolley por elementos finitos foi executado utilizando o software *Solidworks*, e teve por objetivo identificar as forças atuantes em alguns dos elementos ou zonas do equipamento que são mais suscetíveis a sofrer danos ou desgaste no decorrer da sua função. A filosofia deste estudo é iniciar-se com modelos simplificados, onde se utilizam apenas alguns dos elementos, e posteriormente, ir-se adicionando elementos ao conjunto. Este estudo estático utilizará o módulo *Simulation* do *Solidworks*. Na realização deste estudo alguns elementos como parafusos, porcas e anilhas foram removidos por forma a simplificar o modelo.

4.1. 1º Estudo

No primeiro estudo foi utilizado um modelo simplificado do Braço de Trolley, onde só se incluiu o Suporte das Molas, a Forquilha, o Tubo e o Suporte da Roldana. Elementos do Braço de Trolley como a Roldana, a Base, as Molas, a Frente das Molas e os Tirantes não foram incluídos. Este estudo visa quantificar a intensidade da força exercida pelas molas no Braço de Trolley quando é aplicada uma carga de 110 N na ponta do Tubo onde se encontra a Roldana.

4.1.1. Modelo Geométrico utilizado

O modelo geométrico do conjunto utilizado no primeiro estudo só contém o Suporte das Molas, a Forquilha, o Tubo e o Suporte da Roldana. Na figura 37 pode-se ver o modelo utilizado.



Figura 37 - Modelo do Braço simplificado do Trolley utilizado no primeiro estudo.

4.1.2. Material

O material utilizado neste primeiro estudo foi o “Alloy Steel” do software *Solidworks*. Na tabela seguinte podem ser vistas as suas principais propriedades.

Tabela 11 - Principais propriedades do material "Alloy Steel" do software *Solidworks* utilizado no estudo.

Material	“Alloy Steel”
Módulo de Elasticidade (E)	210 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,28
Módulo de Corte (G)	79 GPa
Massa Específica do Material (ρ)	7700 kg/m ³
Tensão de Ruptura (σ_u)	723,8 MPa
Tensão de Cedência (σ_e)	620,4 MPa

4.1.3. Constrangimentos

Neste estudo foram utilizados 3 constrangimentos. Um que restringia o movimento de translação na direção vertical (eixo “z”), foi colocado na superfície da base do Suporte das Molas, outro do tipo dobradiça (“*hinge*” em inglês) que apenas permite a rotação em torno do eixo “y”, foi colocado nas superfícies interiores da Forquilha e do Suporte das Molas, onde no Braço de Trolley real estão colocados casquilhos e um veio. Por fim, foi ainda colocado um outro constrangimento que impede o movimento de translação na direção do eixo “x”, que é paralelo à colocação das molas, num dos quatro olhais da forquilha que na realidade sofrem os esforços causados pelos tirantes no seguimento da força exercida pelas molas em compressão. Nas figuras seguintes podem ser observados os referidos constrangimentos colocados no modelo geométrico utilizado.

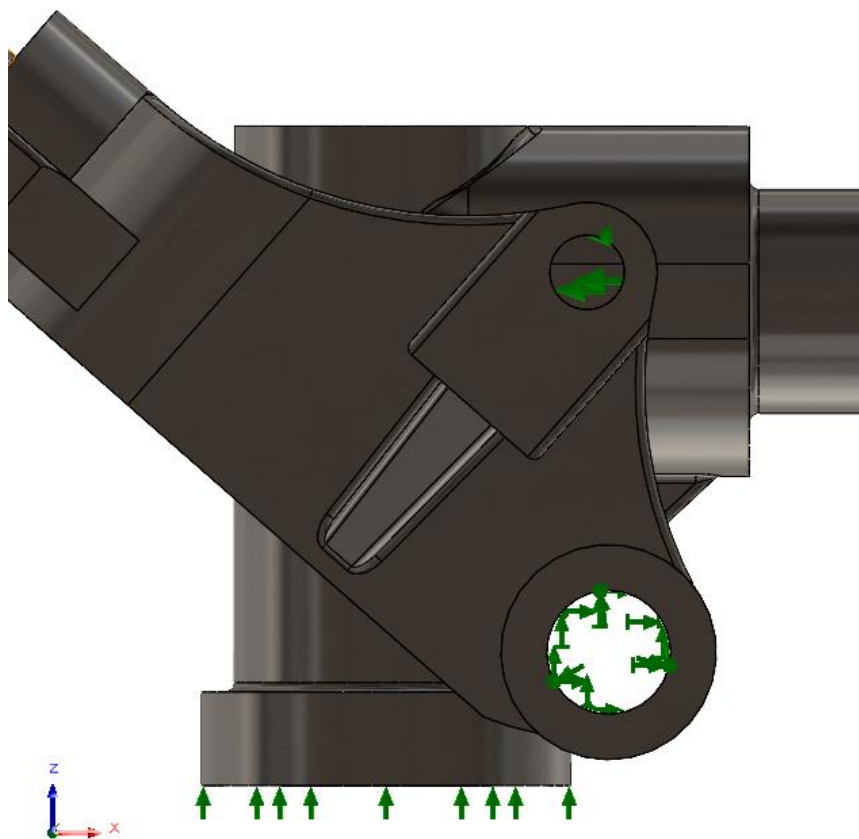


Figura 38 - Constrangimentos aplicados no 1º Estudo.

4.1.4. Forças Aplicadas

Relativamente às forças aplicadas, neste primeiro estudo apenas foi aplicada uma força descendente na ponta do tubo que suporta a roldana. A gravidade não foi considerada.

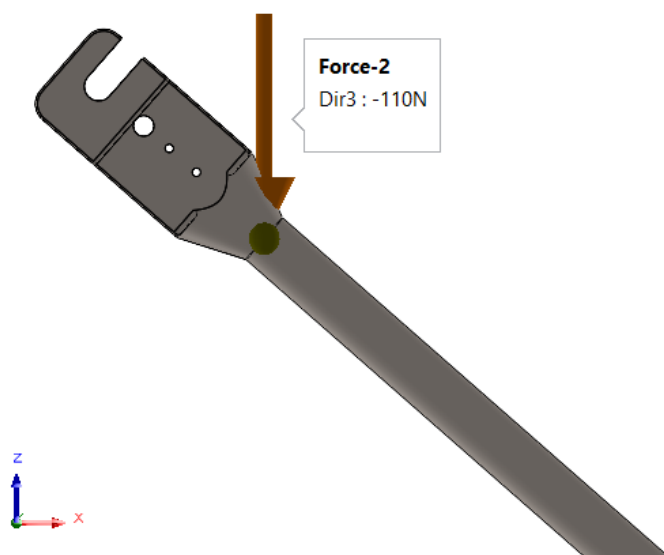


Figura 39 - Imagem com a aplicação da força de 110 N na ponta do tubo que suporta a roldana.

4.1.5. Malha de Elementos Finitos

Seguidamente apresentam-se as principais características da malha utilizada.

Tabela 12 - Detalhes da malha utilizada no 1º Estudo do Braço de Trolley.

Tipo de malha	Elementos sólidos, exceto no tubo, onde se utilizou o elemento viga.
Modelo da malha	Malha baseada na curvatura
Qualidade da malha	Alta
Pontos Jacobianos	16 Pontos
Tamanho máximo do elemento	20,5 mm
Tamanho mínimo do elemento	4,1 mm
Número total de nós	215803
Número total de elementos.	131657

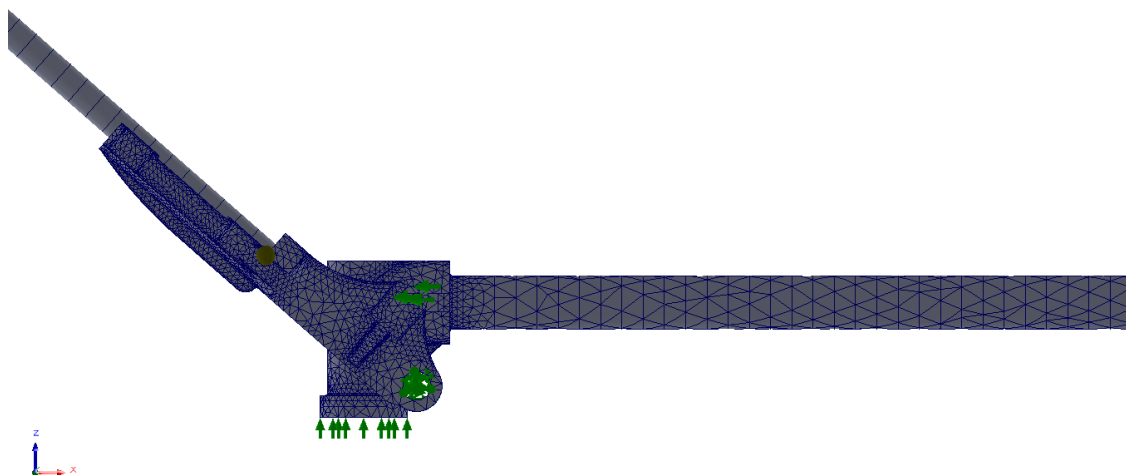


Figura 40 - Pormenor da malha utilizada no 1º Estudo do Braço de Trolley.

4.1.6. Resultados

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos relativamente à deformada, à tensão equivalente de von Mises e também quanto às reações originadas nos constrangimentos usados no presente estudo. As imagens seguintes ilustram os resultados obtidos nos vários pontos.

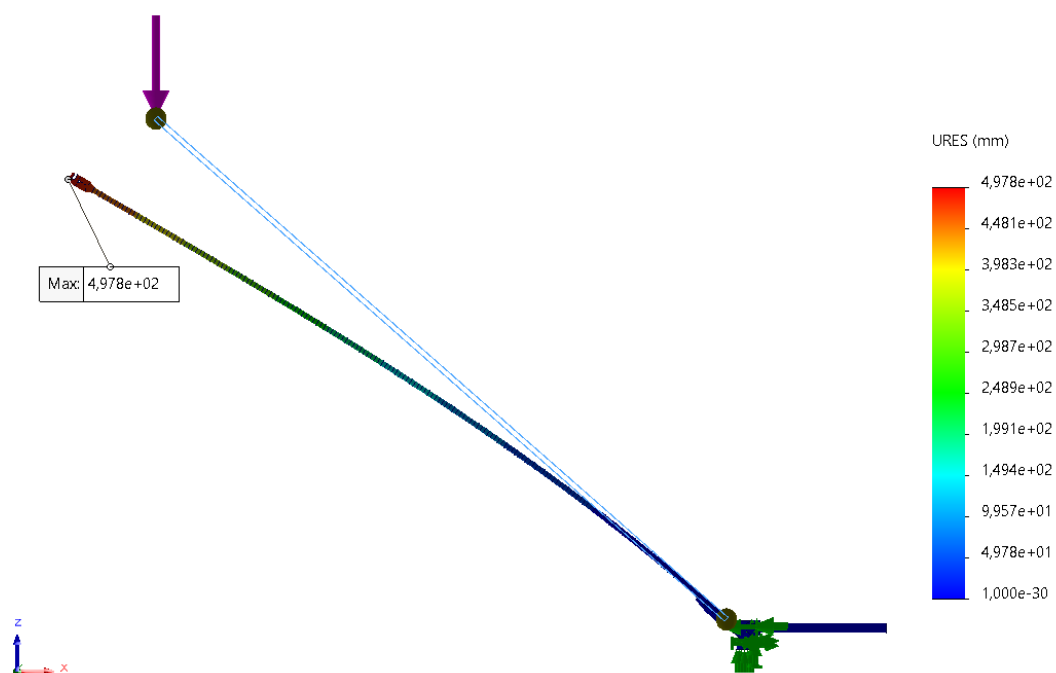


Figura 41 - Deformada máxima obtida na ponta do tubo igual a -497,8 mm na direção do eixo "z"

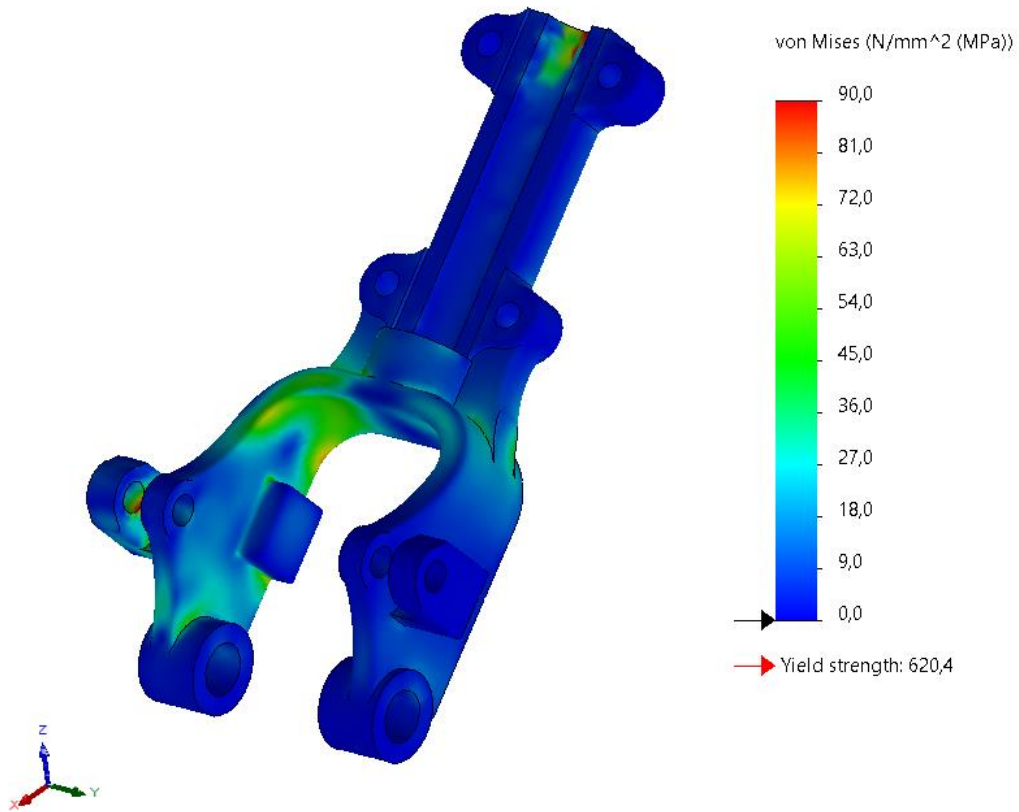


Figura 42 - Tensão equivalente de von Mises em vários pontos da Forquilha.

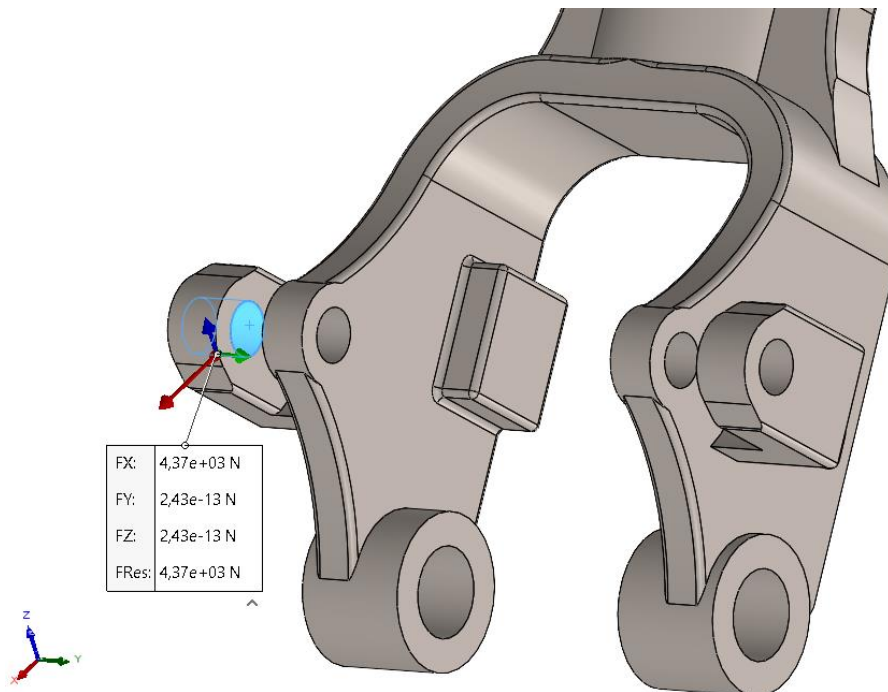


Figura 43 - Reações obtidas num dos olhais da forquilha que são esforçados pela força aplicada no topo do tubo e onde são ligados os tirantes que sofrem o efeito da força das molas.

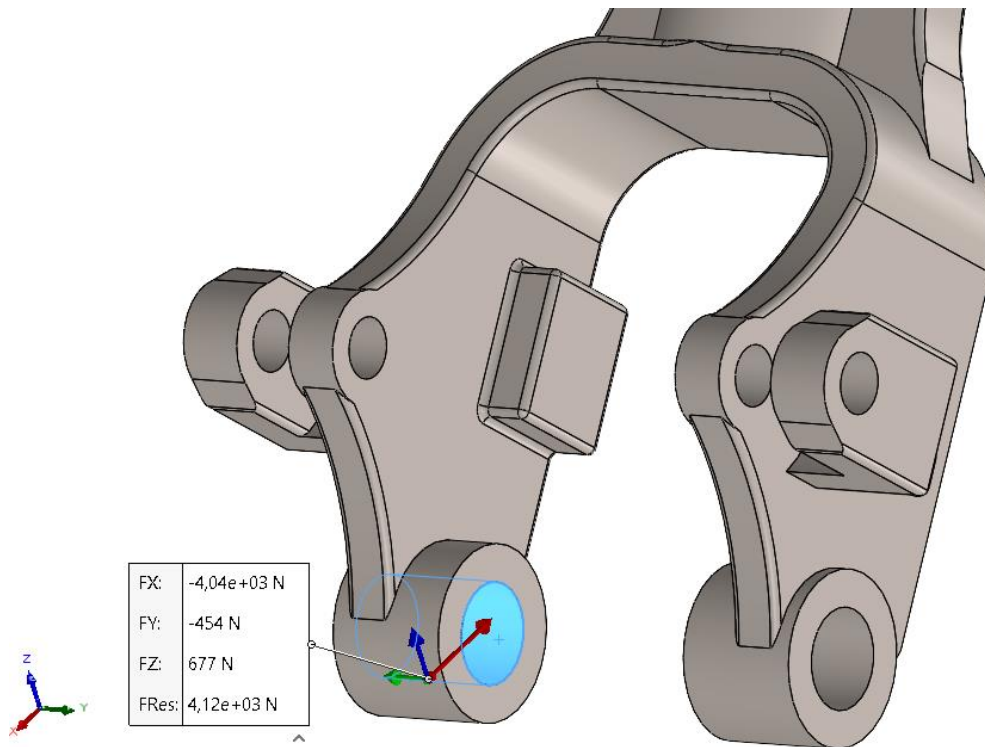


Figura 44 - Reações na base da Forquilha que é um ponto de rotação e de ligação ao suporte das molas.

4.2. 2º Estudo

No segundo estudo, comparativamente com o anterior, foram mantidos os mesmos elementos do Braço de Trolley, foi introduzido o efeito da força da gravidade e foram colocados dois constrangimentos nos olhais de ligação aos Tirantes. À semelhança com o anterior, este estudo tem o objetivo de obter a força exercida pelas molas no Braço de Trolley quando é aplicada uma carga de 110 N na ponta do Tubo onde se encontra a Roldana.

4.2.1. Modelo Geométrico utilizado

O modelo geométrico do Braço de Trolley utilizado neste estudo foi exatamente o mesmo do anterior, onde só se incluiu o Suporte das Molas, a Forquilha, o Tubo e o Suporte da Roldana. Pode ser visto na figura 37.

4.2.2. Material

O material utilizado neste segundo estudo manteve-se (“*Alloy Steel*” do software *Solidworks*). As suas principais propriedades podem ser consultadas na tabela 11.

4.2.3. Constrangimentos

Neste estudo mantiveram-se os 3 constrangimentos utilizados no estudo anterior, no entanto, o constrangimento usado no estudo anterior que impede o movimento de translação na direção do eixo “x”, que é paralelo à colocação das Molas, foi também colocado num dos olhais do outro lado da Forquilha, como se pode verificar na figura 45.

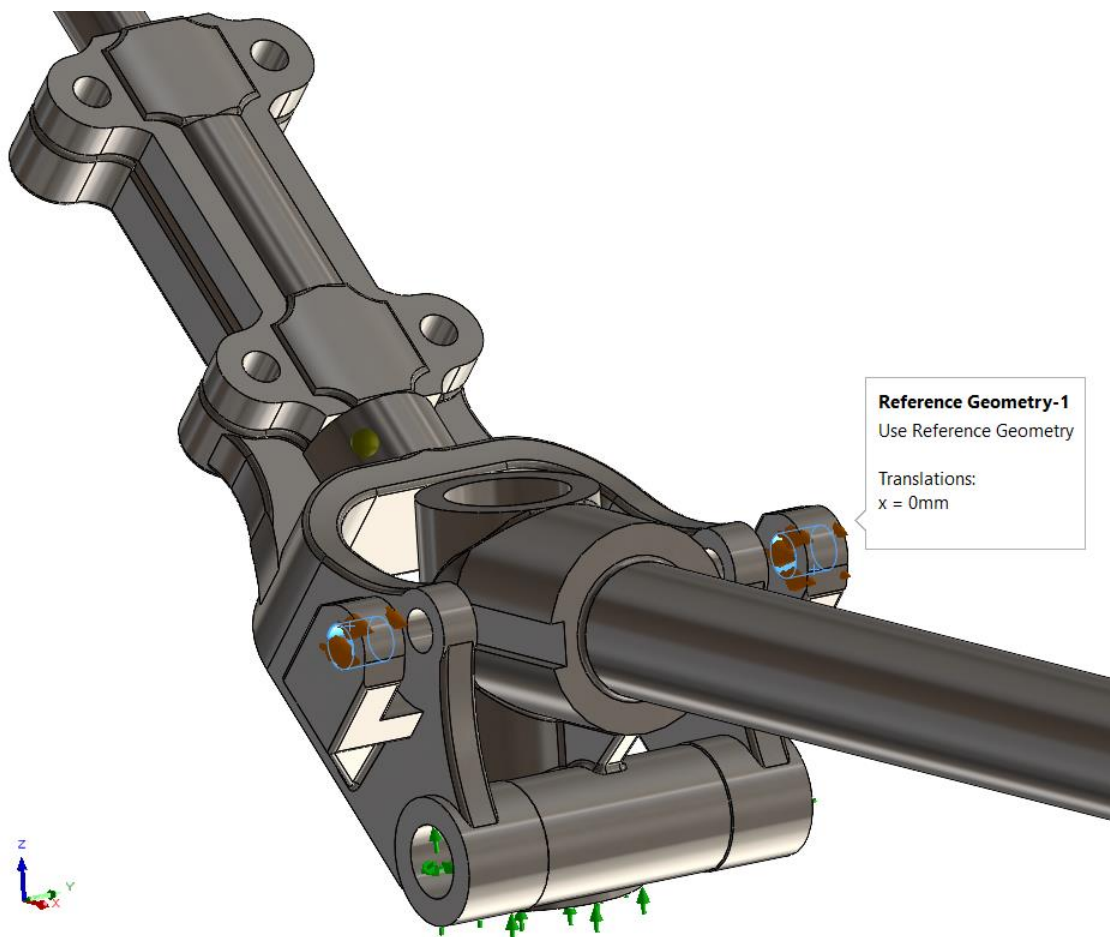


Figura 45 - Imagem a destacar o constrangimento nos olhais da Forquilha que impedem o movimento de translação na direção do eixo “x”, que é paralelo à colocação das molas

4.2.4. Forças Aplicadas

Relativamente às forças aplicadas, neste estudo foi aplicada uma força descendente na ponta do tubo que suporta a roldana e foi ativada a gravidade.



Figura 46 - Ilustração da força da gravidade que foi ativada e localização do centro de massa da estrutura.

4.2.5. Malha de Elementos Finitos

Na tabela seguinte apresentam-se os detalhes da malha utilizada neste segundo estudo.

Tabela 13 - Detalhes da malha utilizada no segundo estudo.

Tipo de malha	Elementos sólidos, exceto no tubo, onde se utilizou o elemento viga.
Modelo da malha	Malha baseada na curvatura
Qualidade da malha	Alta
Pontos Jacobianos	16 Pontos
Tamanho máximo do elemento	20,5 mm
Tamanho mínimo do elemento	4,1 mm
Número total de nós	157015
Número total de elementos.	93970

4.2.6. Resultados

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos relativamente à deformada, à tensão equivalente de von Mises e também quanto às reações originadas nos constrangimentos usados no presente estudo. As imagens seguintes ilustram os resultados obtidos nos vários pontos.

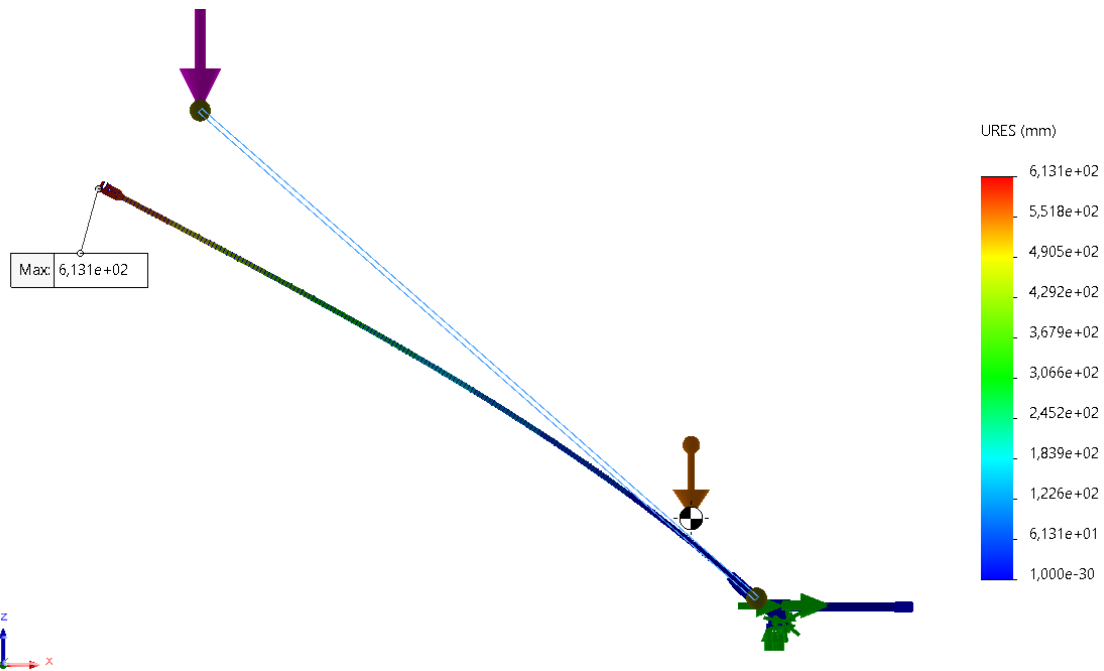


Figura 47 - Deformada máxima obtida na ponta do tubo igual a -613,1 mm na direção do eixo "z"

Pode-se verificar, como já era esperado, um aumento na deformada vertical (eixo “z”) relativamente ao estudo anterior de 497,8 mm para 613,1 mm, dado que o efeito da gravidade foi ativado e o peso dos componentes, em especial do Tubo, provocam uma maior deformação na ponta deste.

Seguidamente apresentam-se os pontos de maior tensão equivalente de von Mises. Verifica-se que é na Forquilha do Braço de Trolley que se atingem os maiores valores da tensão equivalente de von Mises. Mesmo em alguns locais onde há concentração de tensões, não é ultrapassado o valor da tensão de cedência do material escolhido. No entanto, não considerando esses locais de acumulação de tensões, através da ferramenta

“Probe” do software *Solidworks*, identificaram-se alguns dos locais mais esforçados da Forquilha. Na figura 48 e tabela 14 podem-se ver alguns desses valores de tensão.

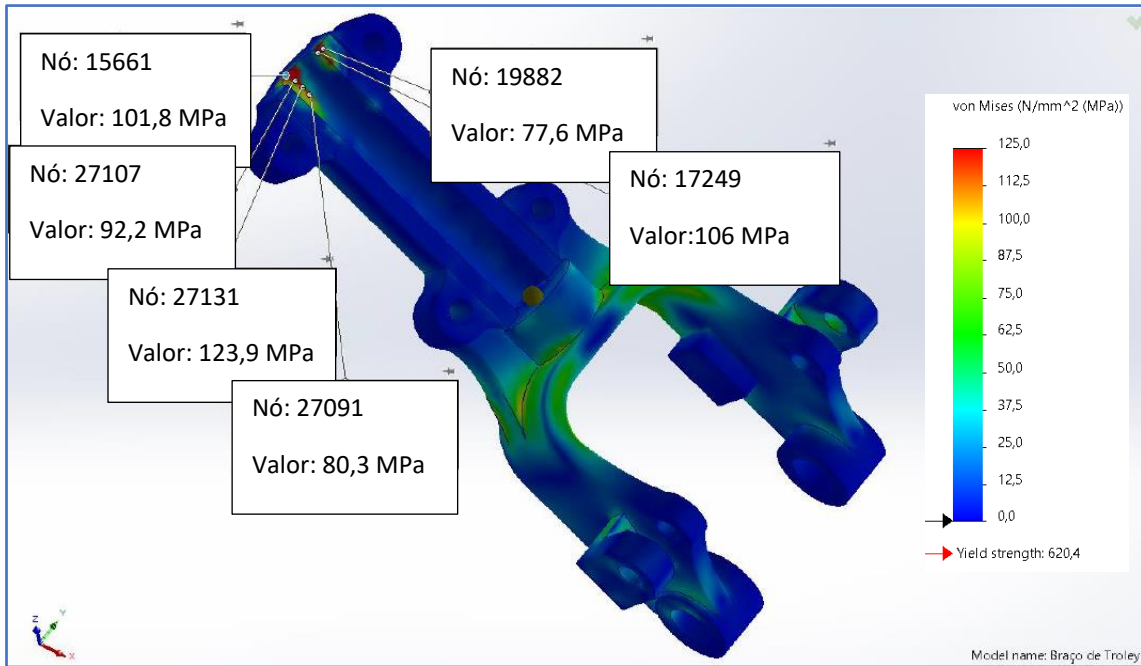


Figura 48 - Tensão equivalente de von Mises em vários pontos da Forquilha utilizando a ferramenta "Probe" do *Solidworks*.

Tabela 14 - Valores da tensão equivalente de von Mises obtidos em alguns dos nós da Forquilha com a ferramenta "Probe" do *Solidworks*.

Nº do Nó	Tensão de von Mises (MPa)
19882	77,6
27091	80,3
27107	92,2
15661	101,8
17249	106
27131	123,9

Em seguida, analisaram-se os valores das forças obtidos nos dois olhais da Forquilha onde foi aplicado o constrangimento que impede o movimento de translação na direção do eixo “x”, que é paralelo à colocação das molas. Estes valores serão considerados para um novo estudo onde se utilizará uma mola com o valor de pré-carga igual à soma das forças obtidas nos dois olhais referidos da Forquilha.

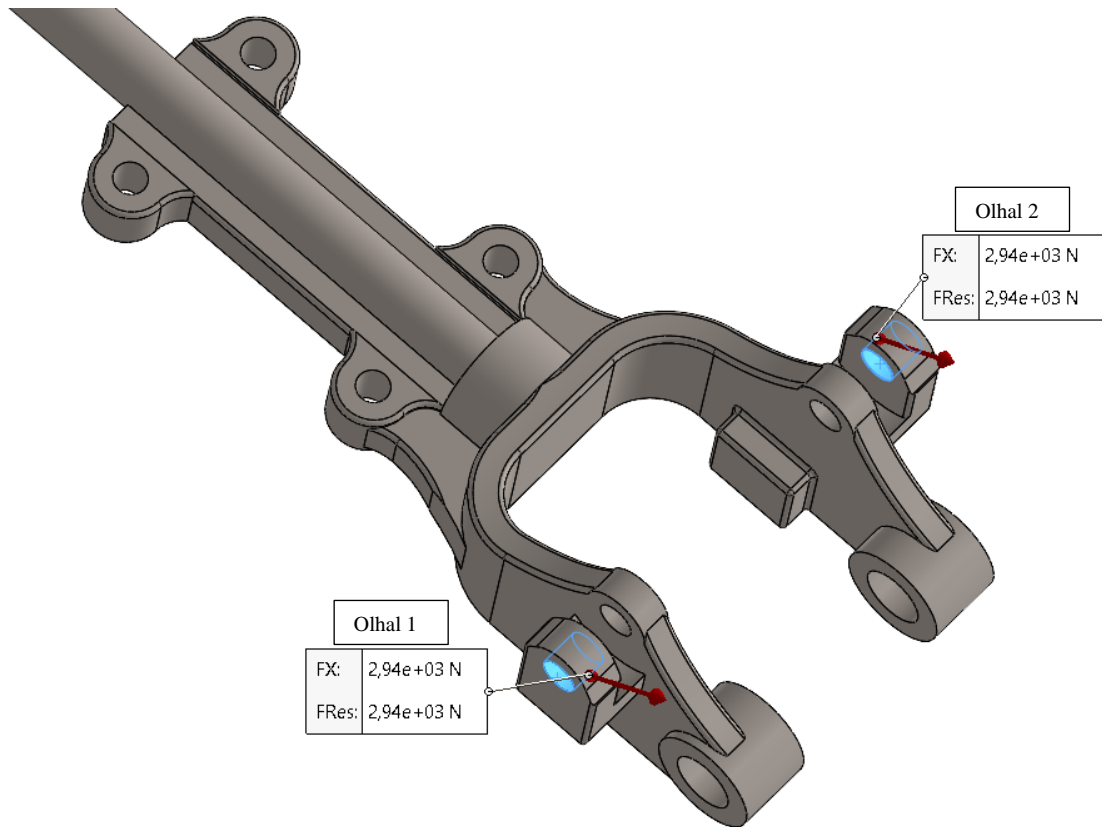


Figura 49 - Intensidades das forças de reação nos olhais da forquilha.

Tabela 15 - Intensidades das forças de reação nos olhais da forquilha.

Nº do Olhal	Reação eixo x [N]	Resultante [N]
1	2,94E+03	2,94E+03
2	2,94E+03	2,94E+03

4.3. 3º Estudo

Neste estudo, relativamente ao anterior, acrescentou-se a Roldana, que ficará fixa no topo do Tubo. Por outro lado, o objetivo é utilizar uma mola na simulação com uma pré-tensão de valor igual ao somatório das forças obtidas nos dois olhais do estudo anterior. Mais uma vez será aplicada uma carga de 110 N na ponta do tubo onde se encontra a Roldana e manter-se-á ativada a força da gravidade.

4.3.1. Modelo Geométrico utilizado

O modelo geométrico do Braço de Trolley utilizado neste estudo baseou-se no mesmo do estudo anterior, mas acrescentou-se a Roldana, que foi fixa ao topo do Tubo com um pino, e colocou-se uma mola com uma rigidez de 2×10^6 N/m e com uma pré-tensão de 5886 N, que foi o valor obtido no somatório das forças atuantes nos dois olhais no estudo anterior, por forma a simular os efeitos das molas usadas no modelo real, ou seja, manter o Braço de Trolley elevado, mesmo quando lhe é aplicada uma força descendente de cerca de 110 N pela catenária. Estes elementos e as suas propriedades podem ser vistos nas figuras seguintes.

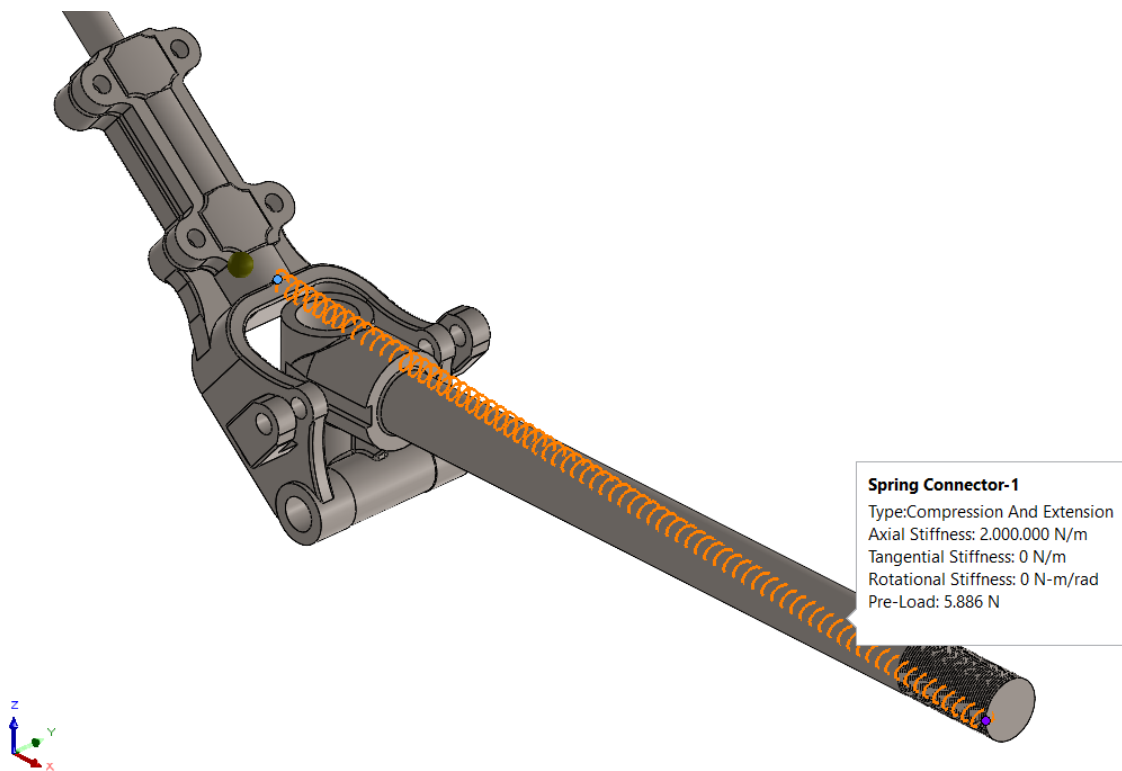


Figura 50 - Imagem e características da mola incluída no 3º Estudo.

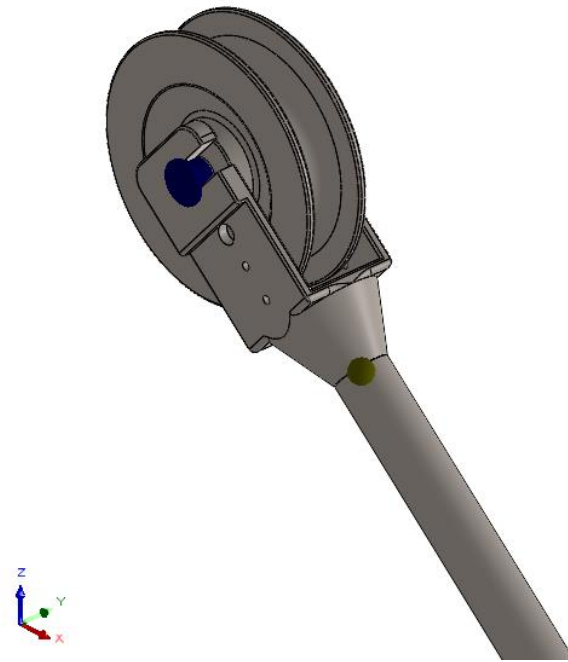


Figura 51 - Visualização da Roldana e do pino que já foram incluídos neste estudo.

4.3.2. Material

O material utilizado neste segundo estudo manteve-se (“Alloy Steel” do software *Solidworks*). As suas principais propriedades podem ser consultadas na tabela 11.

4.3.3. Constrangimentos

Neste estudo foram utilizados apenas 2 constrangimentos. Um que restringe o movimento de translação e que foi colocado na superfície da base do suporte das molas, e outro do tipo dobradiça (“hinge” em inglês) que apenas permite a rotação em torno do eixo “y” foi colocado nas superfícies interiores da Forquilha e do Suporte das Molas onde no Braço de Trolley real estão colocados casquilhos e um veio. O constrangimento que impedia o movimento de translação na direção do eixo “x” que tinha sido usado no estudo anterior em dois olhais da Forquilha, foi substituído pela mola referida no ponto anterior. Na figura 52 podem ser observados os constrangimentos utilizados neste estudo.

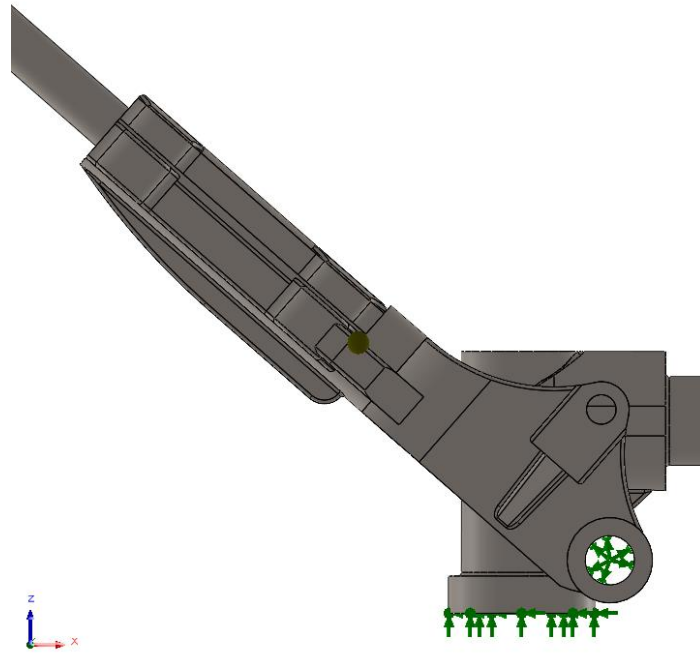


Figura 52 - Constrangimentos utilizados no 3º estudo.

4.3.4. Forças Aplicadas

Neste estudo foi aplicada a força vertical descendente de 110 N no topo do Tubo e também a força da gravidade.

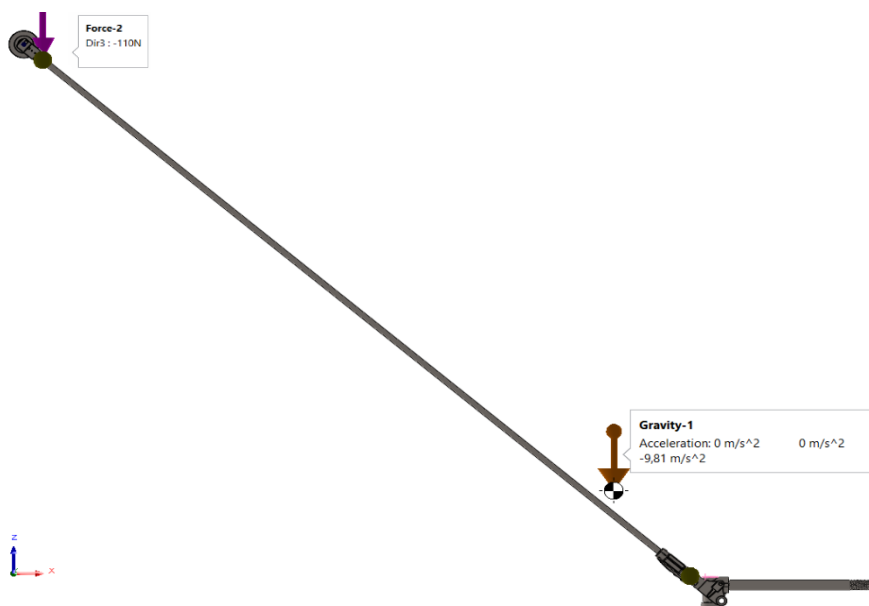


Figura 53 - Forças aplicadas no 3º Estudo.

4.3.5. Malha de Elementos Finitos

Seguidamente apresentam-se os detalhes da malha utilizada neste terceiro estudo.

Tabela 16 - Propriedades da malha utilizada no terceiro estudo.

Tipo de malha	Elementos sólidos, exceto no tubo, onde se utilizou o elemento viga.
Modelo da malha	Malha baseada na curvatura
Qualidade da malha	Alta "High en inglês"
Pontos Jacobianos	16 Pontos
Tamanho máximo do elemento	20,5 mm
Tamanho mínimo do elemento	4,1 mm
Número total de nós	208024
Número total de elementos.	125770

4.3.6. Resultados

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos relativamente à deformada, à tensão equivalente de von Mises e também quanto às reações originadas nos constrangimentos usados no presente estudo. As imagens seguintes ilustram os resultados obtidos nos vários pontos.

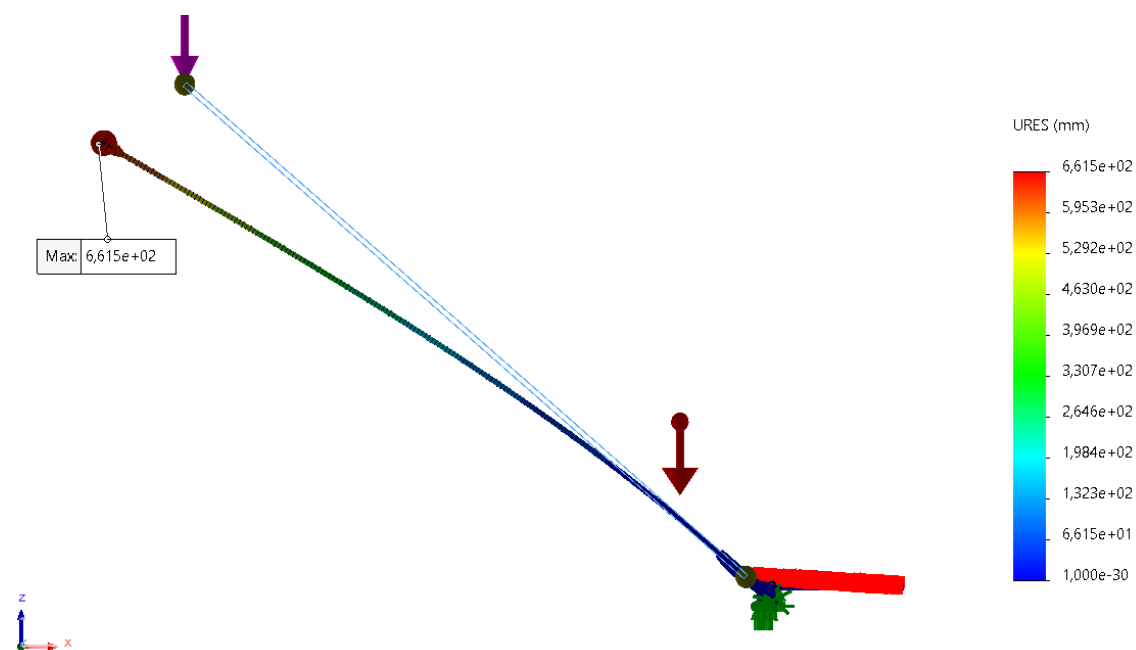


Figura 54 - Deformada resultante obtida na simulação do 3º estudo do Braço de Trolley, de valor igual a -661,5 mm.

Constata-se que houve um aumento da deformada vertical (eixo “z”) de 613,1 mm para 661,5 mm. Este resultado justifica-se pela inclusão da Roldana na simulação do terceiro estudo.

Apresentam-se agora os pontos de maior tensão equivalente de von Mises. Mais uma vez, verifica-se que é na Forquilha do Braço de Trolley que se atingem os maiores valores da tensão equivalente de von Mises. Nos locais onde há concentração de tensões, como é o caso do ponto de fixação da mola, não é ultrapassado o valor da tensão de cedência do material escolhido. De qualquer forma, limitou-se a escala da tensão equivalente de von Mises para remover os pontos de concentração de tensões e, tal como no estudo anterior, utilizou-se a ferramenta “Probe” do software *Solidworks* para identificar as tensões em alguns dos locais da Forquilha. Na figura 55 e tabela 17 podem ser consultados alguns desses valores de tensão.

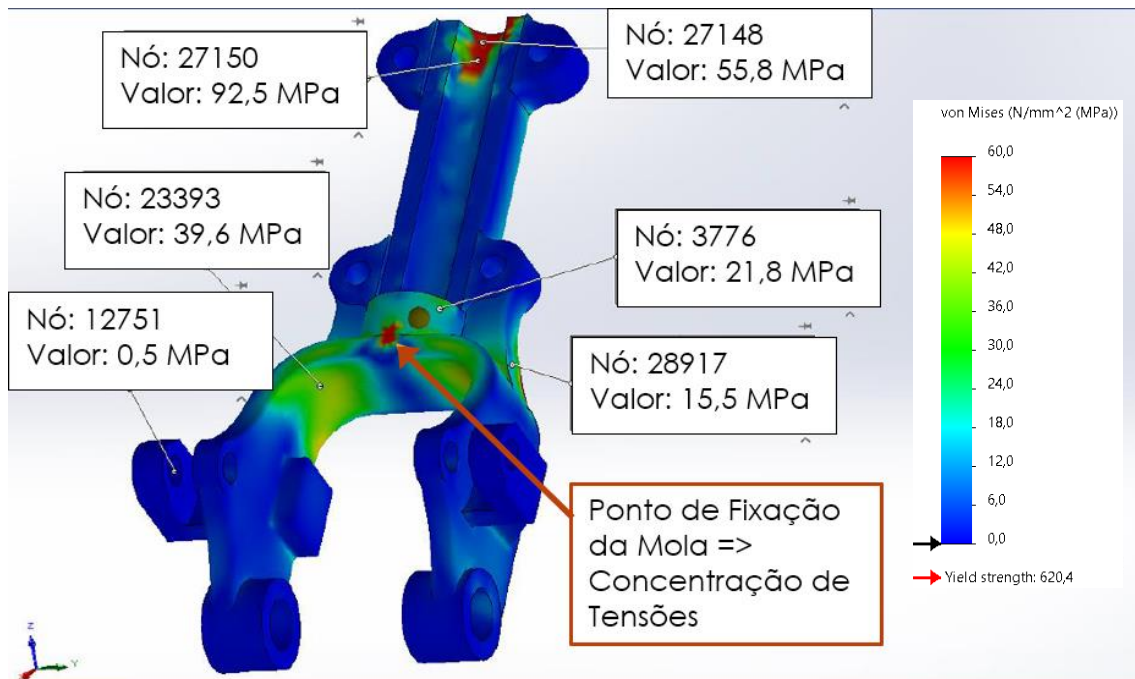


Figura 55 - Tensão equivalente de von Mises em vários pontos da Forquilha utilizando a ferramenta "Probe" do Solidworks.

Tabela 17 - Valores da tensão equivalente de von Mises do 3º Estudo obtidos em alguns dos nós da Forquilha com a ferramenta "Probe" do Solidworks.

Nº do Nó	Tensão de von Mises (MPa)
12751	0,05
28917	15,5
3776	21,8
23393	39,6
27148	55,8
27150	92,5

Em seguida, apresentam-se os valores das intensidades das forças que atuam nas articulações do tipo dobradiça da Forquilha e do Suporte das Molas, e também as reações no apoio da estrutura, representado pela superfície de cor azul da figura 56, e que no modelo real assenta sobre o componente denominado Base.

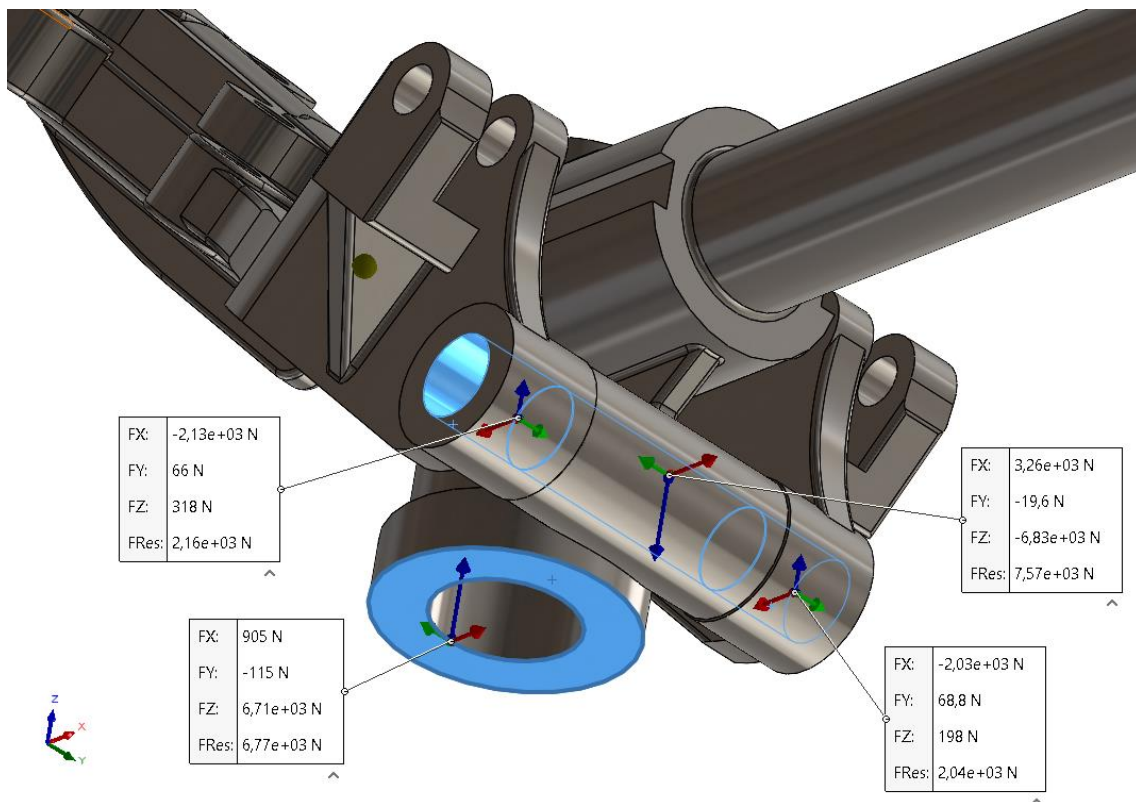


Figura 56 - Intensidade das forças que atuam nas articulações do tipo dobradiça da Forquilha e do Suporte das Molas, e reações no apoio da estrutura.

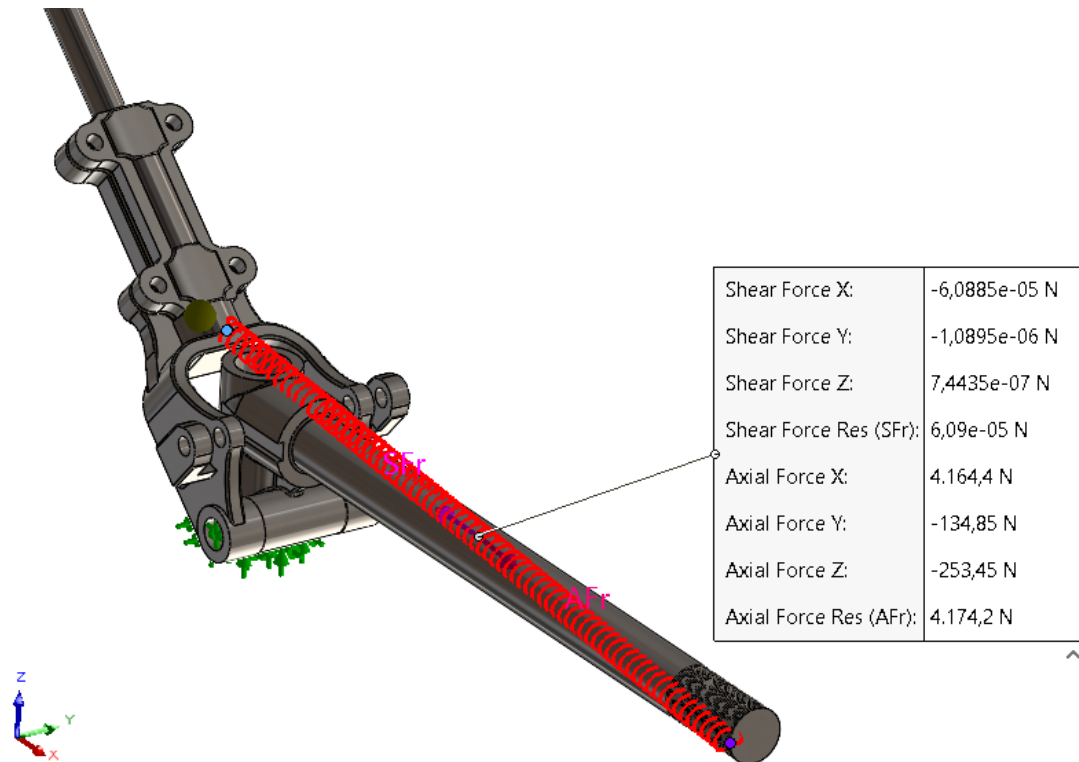


Figura 57 - Forças exercidas pela mola no modelo do 3º Estudo.

4.4. 4º Estudo

Neste quarto estudo, acrescenta-se ao modelo do estudo anterior 2 pinos para colocar nos olhais da Forquilha onde no modelo real são fixados os Tirantes. Para além disso, colocam-se 2 molas com uma rigidez de 2×10^6 N/m em vez de uma, que se fixarão nos pinos referidos anteriormente. A pré-tensão no valor de 5886 N será dividida igualmente pelas 2 molas. Como nos estudos anteriores, será aplicada uma carga de 110 N na ponta do tubo onde se encontra a Roldana, simulando a força que a catenária exerce, e manter-se-á ativada a força da gravidade.

4.4.1. Modelo Geométrico utilizado

O modelo geométrico do Braço de Trolley utilizado é igual ao do estudo anterior, mas em vez de uma mola, colocam-se 2 molas para simular a força e o efeito que os Tirantes exercem na Forquilha devido à força exercida pelas Molas no modelo real, e colocam-se 2 pinos na Forquilha que servirão de ponto de fixação para as Molas. Acrescenta-se ainda a peça denominada Fixação das Molas, que será o outro ponto de fixação das duas Molas.

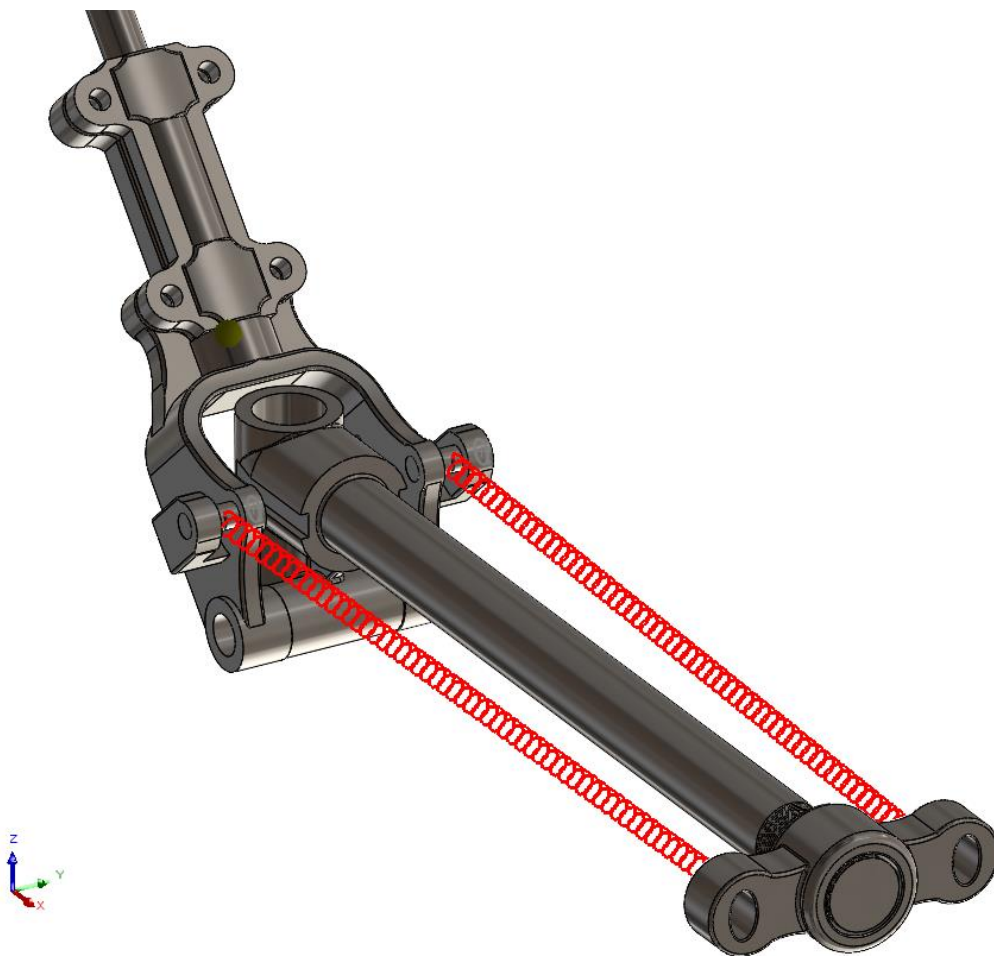


Figura 58 - Modelo utilizado no 4º Estudo, mostrando as duas molas conectadas aos pinos e à peça denominada Fixação das Molas.

4.4.2. Material

O material utilizado neste segundo estudo manteve-se (“Alloy Steel” do software *Solidworks*). As suas principais propriedades podem ser consultadas na tabela 11.

4.4.3. Constrangimentos

Foram utilizados os 2 constrangimentos do estudo anterior, e acrescentou-se um constrangimento de encaixe na peça denominada Fixação das Molas que servirá de ponto de fixação das duas molas utilizadas neste estudo, e também um constrangimento ao movimento de translação radial da face cilíndrica no interior da peça denominada Suporte das Molas. A figura 59 apresenta os constrangimentos utilizados.

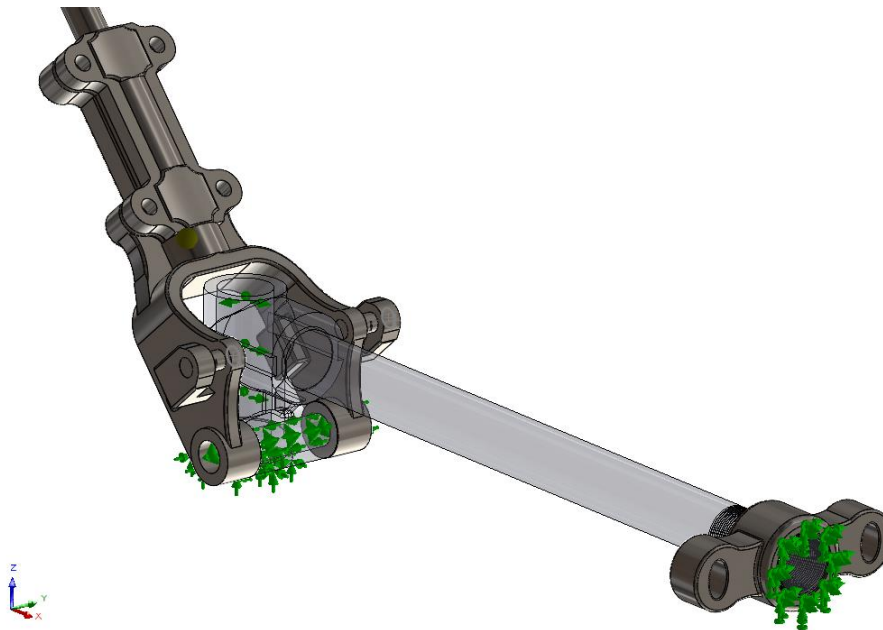


Figura 59 - Constrangimentos utilizados no 4º estudo.

4.4.4. Forças Aplicadas

Neste estudo, tal como no anterior, foi aplicada a força vertical descendente de 110 N no topo do Tubo e também a força da gravidade.

4.4.5. Malha de Elementos Finitos

Na tabela seguinte apresentam-se os detalhes da malha utilizada no quarto estudo.

Tabela 18 - Detalhes da malha utilizada no quarto estudo.

Tipo de malha	Elementos sólidos, exceto no tubo, onde se utilizou o elemento viga.
Modelo da malha	Malha baseada na curvatura
Qualidade da malha	Alta
Pontos Jacobianos	16 Pontos
Tamanho máximo do elemento	20,5 mm
Tamanho mínimo do elemento	4,1 mm
Número total de nós	208024
Número total de elementos.	125770

4.4.6. Resultados

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos relativamente à deformada, à tensão equivalente de von Mises e também quanto às reações originadas nos constrangimentos usados no presente estudo. As imagens seguintes ilustram os resultados obtidos nos vários pontos.

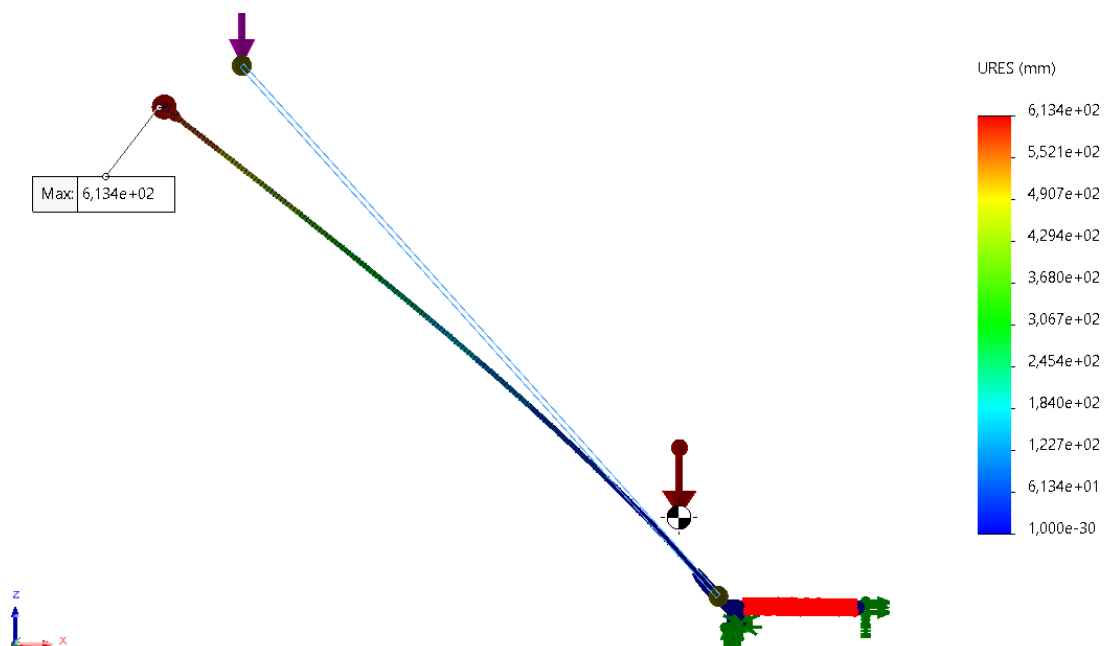


Figura 60 – Deformada máxima resultante da simulação do 4º estudo do Braço de Trolley.

Neste caso verifica-se que devido ao efeito das duas molas que simulam o efeito dos tirantes do modelo real, a deformada vertical (eixo “z”) reduziu-se para um valor de 613,4 mm

Em seguida analisam-se os pontos que apresentam uma maior tensão equivalente de von Mises na Forquilha, mas excluindo os pontos de concentração de tensões, tais como os pontos de fixação das molas.

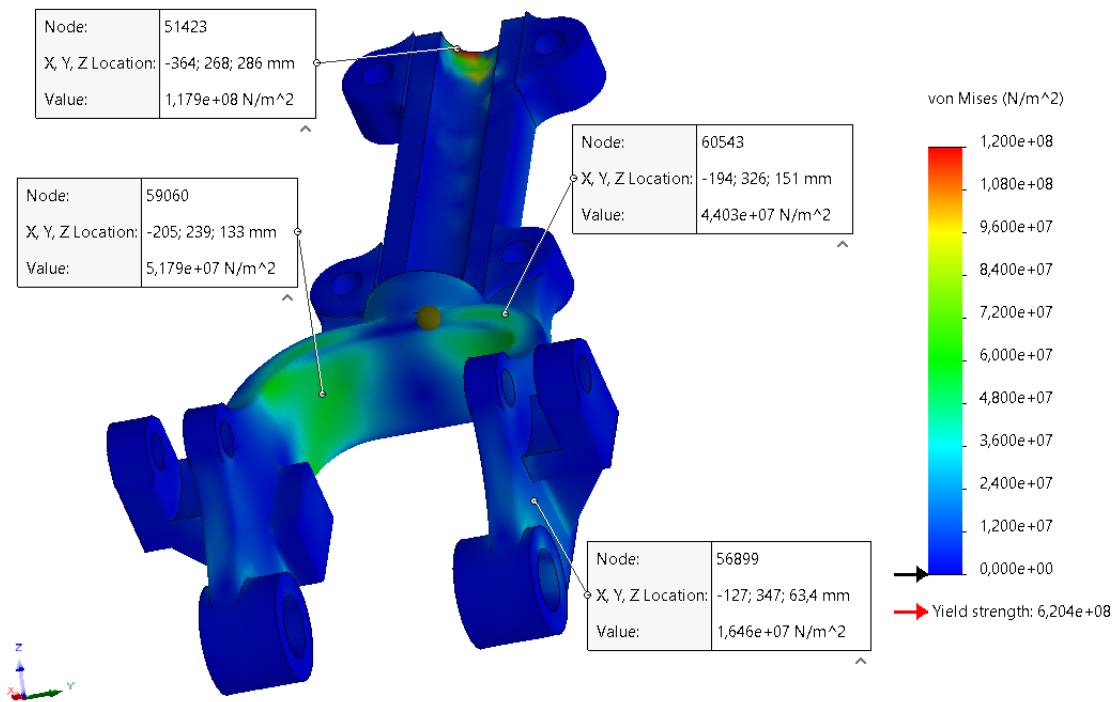


Figura 61 - Tensão equivalente de von Mises em vários pontos da Forquilha utilizando a ferramenta "Probe" do Solidworks no 4º Estudo.

Tabela 19 - Valores da tensão equivalente de von Mises do 4º Estudo obtidos em alguns dos nós da Forquilha com a ferramenta "Probe" do Solidworks.

Nº do Nó	Tensão de von Mises (Pa)
56899	16,5
60543	44,0
59060	51,8
51423	118

De seguida, apresentam-se os valores das intensidades das forças que atuam nas articulações do tipo dobradiça da Forquilha e do Suporte das Molas.

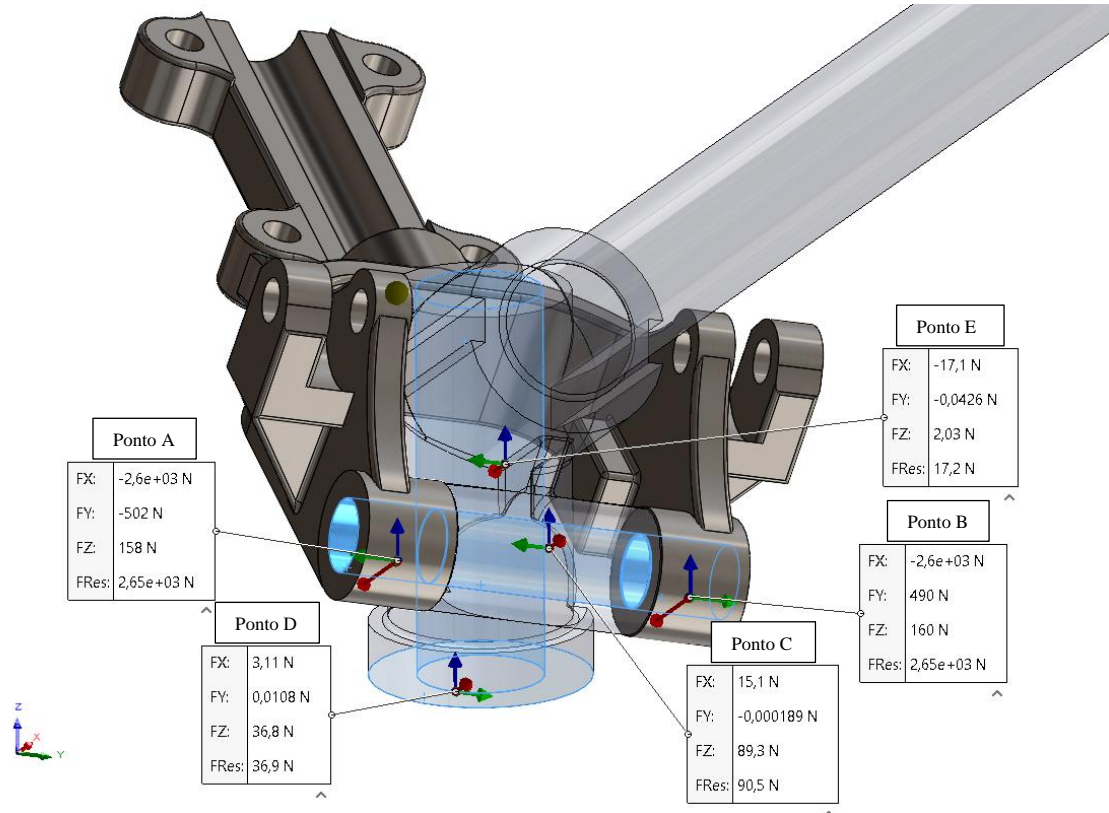


Figura 62 - Intensidade das forças que atuam nas articulações do tipo dobradiça da Forquilha e do Suporte das Molas, e reações no apoio da estrutura do 4º Estudo.

5. Análise e Discussão dos Resultados

Neste capítulo será feita uma compilação e análise dos resultados obtidos nos quatro estudos realizados anteriormente, mas com um maior foco no quarto estudo de elementos finitos. Dado que desde o 1º até ao 4º estudo, o modelo do Braço de Trolley estudado partiu de um mais simples, que se foi tornando mais complexo, com a adição de elementos, por forma a se aproximar mais do modelo real, e a melhor simular o funcionamento do mesmo.

Deste modo, relativamente aos valores obtidos para a deformada, conforme se pode ver na tabela seguinte, verifica-se que esta se situa na ordem dos 600 mm. Esta situação estará muito próxima da realidade, pois o sistema de molas do Braço de Trolley é calibrado nas oficinas da Carris para que a catenária exerça uma força descendente neste da ordem dos 110 N.

Tabela 20 - Valores da deformada máxima do Braço de Trolley na zona da Roldana obtidos nos 4 estudos realizados.

Estudo	Deformada máxima do tubo na zona da Roldana (mm)
1º	-497,8
2º	-613,1
3º	-661,5
4º	-613,4

Quanto os valores da tensão equivalente de von Mises obtidos nos 4 estudos, constata-se que estes não ultrapassam os 200 MPa nos vários pontos analisados, como se pode ver na tabela seguinte. É importante referir que nestes estudos foram excluídos alguns pontos de concentração de tensões, que teriam valores acima deste, como é o caso, por exemplo, dos pontos de fixação das molas no 3º e 4º estudos. Assim, tendo em conta que o material escolhido para este trabalho foi o “Alloy Steel” do software *Soliworks* com uma tensão de cedência de cerca de 620 MPa, mas também sabendo que a maioria dos aços possui uma tensão de cedência superior a 250 MPa, com base nos valores obtidos, pode-se considerar que o Braço de Trolley dificilmente quebrará ou falhará por plasticidade, ou seja, a sua resistência mecânica é adequada para as cargas que lhe são aplicadas no normal desempenho das suas funções.

Tabela 21 - Valores obtidos em 3 dos 4 estudos para a tensão equivalente de von Mises.

Estudo	Nº do Nó	Tensão de von Mises (Pa)
2º	19882	7,76E+07
	27091	8,03E+07
	27107	9,22E+07
	15661	1,02E+08
	17249	1,06E+08
	27131	1,24E+08
3º	12751	5,14E+04
	28917	1,55E+07
	3776	2,18E+07
	23393	3,96E+07
	27148	5,58E+07
	27150	9,25E+07
4º	56899	1,65E+07
	60543	4,40E+07
	59060	5,18E+07
	51423	1,18E+08

Em seguida, procede-se a uma análise das forças atuantes nos pontos mais sensíveis em termos de manutenção do Braço de Trolley, em especial da Forquilha. Assim, na tabela seguinte pode-se ver um resumo da intensidade das forças atuantes em 5 dos pontos de apoio (A, B, C, D e E), como articulações e olhais, do elemento Forquilha.

Tabela 22 - Intensidade das forças atuantes em 5 pontos de apoio da Forquilha, como articulações e olhais.

Ponto de Análise	Reação eixo x [N]	Reação eixo y [N]	Reação eixo z [N]	Resultante [N]
A	-2600	-502	158	2650
B	-2600	490	160	2650
C	15,1	0	89,3	90,5
D	3,11	0	36,8	36,9
E	-17,1	0	2,03	17,2

Analisando os valores obtidos, em especial os obtidos nos pontos A e B, verifica-se que a intensidade das forças atuantes é considerável. Por outro lado, sabe-se que o Braço de Trolley funciona uma grande parte do tempo na mesma posição, dado que a altura da catenária ao longo dos percursos dos elétricos não varia muito, o que faz com que o mesmo se mantenha com uma inclinação da ordem dos 40°. Em termos de

orientação, o Braço de Trolley pode rodar cerca de 45° para cada lado, de modo a que o elétrico possa efetuar as curvas. No entanto, na maior parte do tempo, estará numa posição alinhada com o eixo longitudinal do elétrico, como acontece nos percursos mais retos. Assim, as forças atuantes mantêm durante grande parte do tempo a sua direção e sentido. Este facto, a juntar aos valores obtidos para as intensidades das forças poderá justificar o desgaste assimétrico que ocorre nos diversos casquilhos que se inserem nos olhais ou articulações da Forquilha, ou juntas de rotação. Esta situação pode ser observada nas imagens em seguintes, que foram recolhidas de um Braço de Trolley que se encontrava em início de manutenção nas oficinas da Carris. Na primeira figura 63 pode-se ver um exemplo de um casquilho utilizado nos pontos *A* e *B* estudados da Forquilha, e na figura 64 um exemplo de um casquilho desgastado assimetricamente, que em operação se encontra colocado no ponto *E* estudado. Estes dados poderão demonstrar que o Braço de Trolley poderá sofrer maioritariamente de danos ou falhas à sua normal operação devido ao desgaste que ocorre nestes elementos ao longo do desempenho da sua função.



Figura 63 - Imagem de um casquilho desgastado assimetricamente e que é utilizado nos pontos A e B da Forquilha referidos anteriormente.



Figura 64 - Imagem de um casquilho desgastado assimetricamente e que é utilizado no ponto E estudado do Suporte das Molas.

6. Conclusão

Primeiramente, este trabalho ambicionou utilizar e reconhecer a grande importância das ferramentas computacionais de auxílio à engenharia mecânica no estudo de estruturas e mecanismos, como é disso exemplo, o Braço de Trolley dos elétricos históricos e clássicos da empresa Carris. Com base no modelo geométrico que foi possível criar a partir do modelo real, e também tendo em conta os dados e resultados obtidos, este objetivo terá sido conseguido.

Por outro lado, este trabalho tinha como principal objetivo estudar as causas que originam os danos sofridos pelo Braço de Trolley no decorrer da sua operação, e que levam a que várias intervenções de manutenção corretiva tenham de ocorrer nas oficinas de manutenção da Carris. Dado que o Braço de Trolley é considerado uma peça histórica, o mesmo já não é fabricado, e assim, torna-se importante entender as causas e o que poderá ser feito, para que a frequência das referidas intervenções de manutenção do Braço de Trolley seja diminuída.

Para este objetivo, foi definida uma estratégia que passou primeiro por identificar todos os elementos que constituem um Braço de Trolley, e devido ao facto de a Carris já não dispor de praticamente nenhum desenho técnico destes elementos (à exceção de um), foi necessário efetuar medições de todos os componentes. Por outro lado, também foi necessário observar o estado e os danos que as peças apresentavam, e recolher algumas imagens ilustrativas de todos os elementos, e particularmente dos que apresentavam os referidos danos. Como já foi referido, neste ponto usou-se um exemplar de um Braço de Trolley que tinha dado entrada nas oficinas da Carris para sofrer uma intervenção de manutenção corretiva. Nesta fase foram também recolhidos alguns dados relativos às condições de operação do Braço de Trolley, como por exemplo, a altura da catenária e como é feito o procedimento de calibração das Molas que o constituem, por forma a que a catenária exerça uma força descendente na Roldana de cerca de 110 N.

Concluída esta fase, a fase seguinte consistiu em criar um modelo geométrico do Braço de Trolley no software *Solidworks* a partir do modelo real e das medições efetuadas nas oficinas da Carris, para que fosse possível realizar um estudo por elementos finitos à sua estrutura, e em especial aos seus elementos que normalmente apresentam mais danos

quando entram no processo de manutenção, nomeadamente a chamada Forquilha, ou os seus elementos, como é o caso de alguns casquilhos. Posteriormente, apesar de não ser um objetivo definido à partida, foi também possível criar diversos desenhos técnicos das várias peças que constituem o Braço de Trolley a partir dos vários modelos geométricos criados, e que poderão servir de referência futura para a empresa Carris.

Após a criação do modelo geométrico, foi necessário efetuar uma verificação do mesmo, que passou pela aplicação de uma carga semelhante àquela que o Braço de Trolley sofre pela catenária no desempenho da sua função, a um moledo geométrico simplificado utilizando o módulo *Simulation* do software *Solidworks*, e comparar os resultados obtidos com os resultados do cálculo analítico realizado, e também com os resultados obtidos por outro software denominado *Ftool*. Havendo uma concordância nos valores, iniciou-se a fase de estudo dos esforços sofridos pelo Braço de Trolley por elementos finitos. Para a realização deste estudo, retiraram-se todos os elementos não essenciais e de menor relevância para o objetivo pretendido, por forma a criar um modelo mais simples para que se pudesse aplicar o método dos elementos finitos, e também para reduzir a possibilidade de ocorrência de erros no software, e que o tempo de computação despendido no cálculo das simulações fosse aceitável. À medida que se foram obtendo resultados, foram-se acrescentando elementos, e realizando estudos a modelos de complexidade aumentada até se atingirem alguns resultados numéricos de um modelo já mais próximo do modelo real.

Ao todo, realizaram-se quatro estudos por elementos finitos aos esforços sofridos pelo Braço de Trolley. Posteriormente, procedeu-se a uma análise dos resultados obtidos, e pôde-se concluir que o Braço de Trolley normalmente não falha por critérios de resistência mecânica ou rigidez, mas sim por processos de desgaste. Esta conclusão baseia-se nos resultados obtidos para a tensão equivalente de von Mises, para a deformada máxima que ocorre na zona da Roldana, e no sentido e intensidade das forças que se obtiveram em alguns dos locais, que à partida se sabia que eram pontos onde ocorriam danos, e eram mais suscetíveis necessitarem de manutenção. Como é o caso de alguns veios e casquilhos utilizados na Forquilha.

Com base no referido anteriormente, conclui-se que a principal causa que gera necessidades de manutenção no Braço de Trolley é o desgaste assimétrico de alguns elementos, como casquilhos, e que esta situação se possa dever a uma inadequada

lubrificação do sistema e de articulações ou juntas de rotação. Deste modo, entra-se na área da Tribologia. Assim, não sendo possível alterar a arquitetura do Braço de Trolley e o design de alguns dos seus componentes, por se tratar de uma peça histórica, de atualmente a Carris já não fabricar a maior parte dos seus componentes, e ainda de à partida não serem conhecidas as propriedades dos materiais que o constituem, a ação que poderá ser ponderada pela Carris, é a atualização do procedimento e/ou das rotinas de lubrificação dos vários pontos de maior desgaste do Braço de Trolley, com vista a se atenuar ou retardar o processo de desgaste abrasivo, e para que as ações de manutenção corretiva diminuam de frequência. Esta conclusão assenta no facto das forças atuantes terem uma intensidade considerável e de manterem a maior parte do tempo a sua direção e sentido, em especial, em alguns dos casquilhos e veios da Forquilha.

6.1. Desenvolvimentos Futuros

Como sugestão para desenvolvimentos e trabalhos futuros, seria importante obterem-se dados concretos dos materiais do Braço de Trolley utilizado pela Carris, eventualmente com a realização de alguns ensaios mecânicos, de modo a que as reais propriedades dos materiais possam ser utilizadas no estudo por elementos finitos.

Dado já não ter sido possível neste trabalho, fica também a sugestão para se realizarem novos estudos estáticos por elementos finitos utilizando contactos.

Poderia também ser uma mais-valia, efetuarem-se estudos de fadiga por elementos finitos e estudos dinâmicos, por exemplo, utilizando o módulo *Motion* do *Soliworks*, por forma a se construir um modelo dinâmico com movimento, e que pudesse ser usado para medir os valores das forças atuantes em alguns dos pontos estudados no estudo estático, com o intuito de se realizar uma comparação.

Dado que a melhoria da manutenção do Braço de Trolley poder-se-á tratar de um problema da área da Tribologia, seria importante utilizar outras ferramentas onde se possa efetuar um estudo desta área, pois o Braço de Trolley normalmente não falha ou quebra por plasticidade, mas sim por desgaste abrasivo.

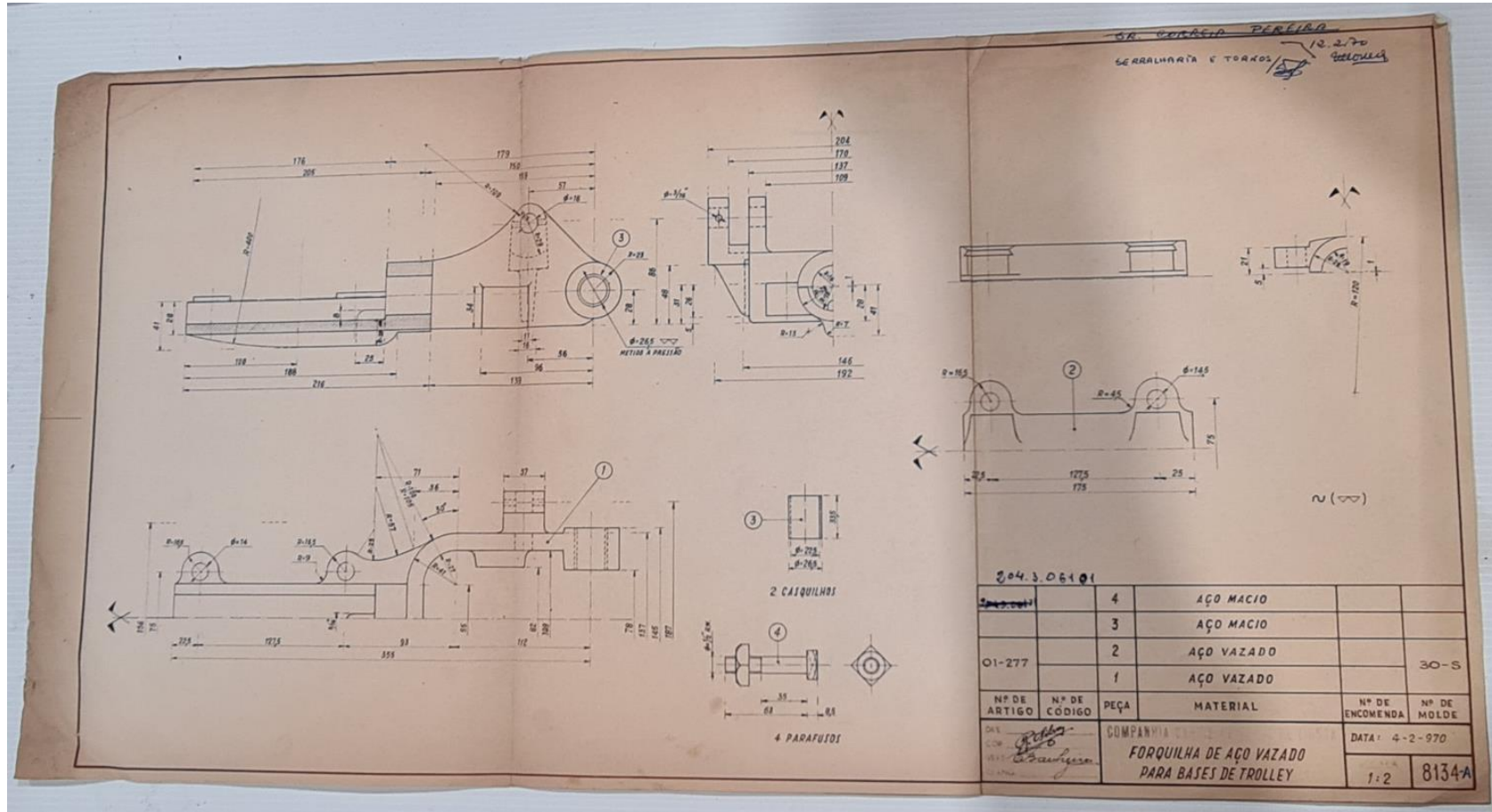
Por último, considerar a possibilidade de se alterarem alguns dos materiais utilizados atualmente no Braço de Trolley por outros que confirmem uma maior longevidade e possam reduzir a frequência das manutenções corretivas.

Referências Bibliográficas

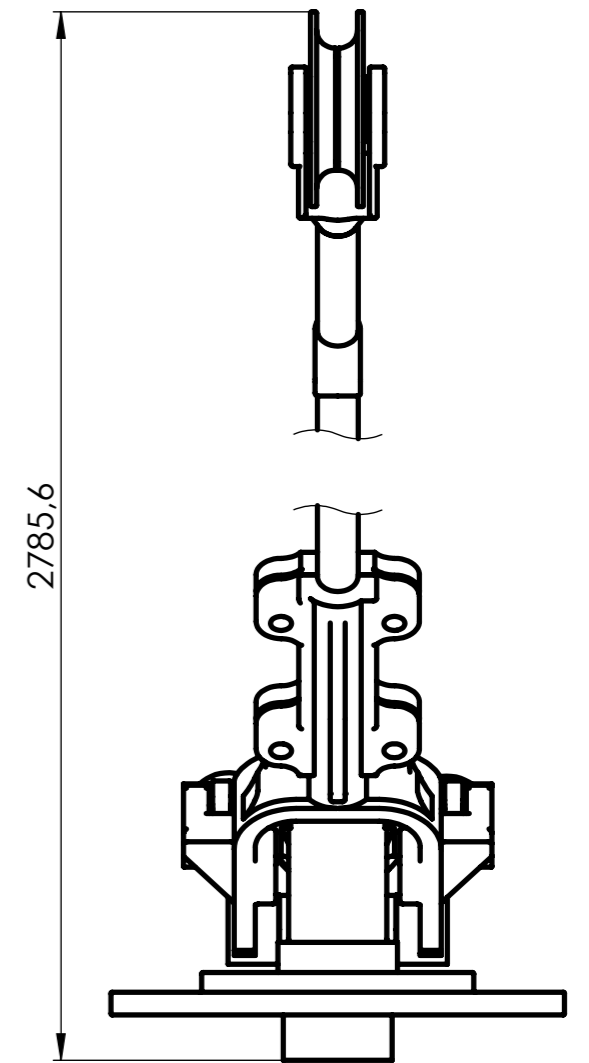
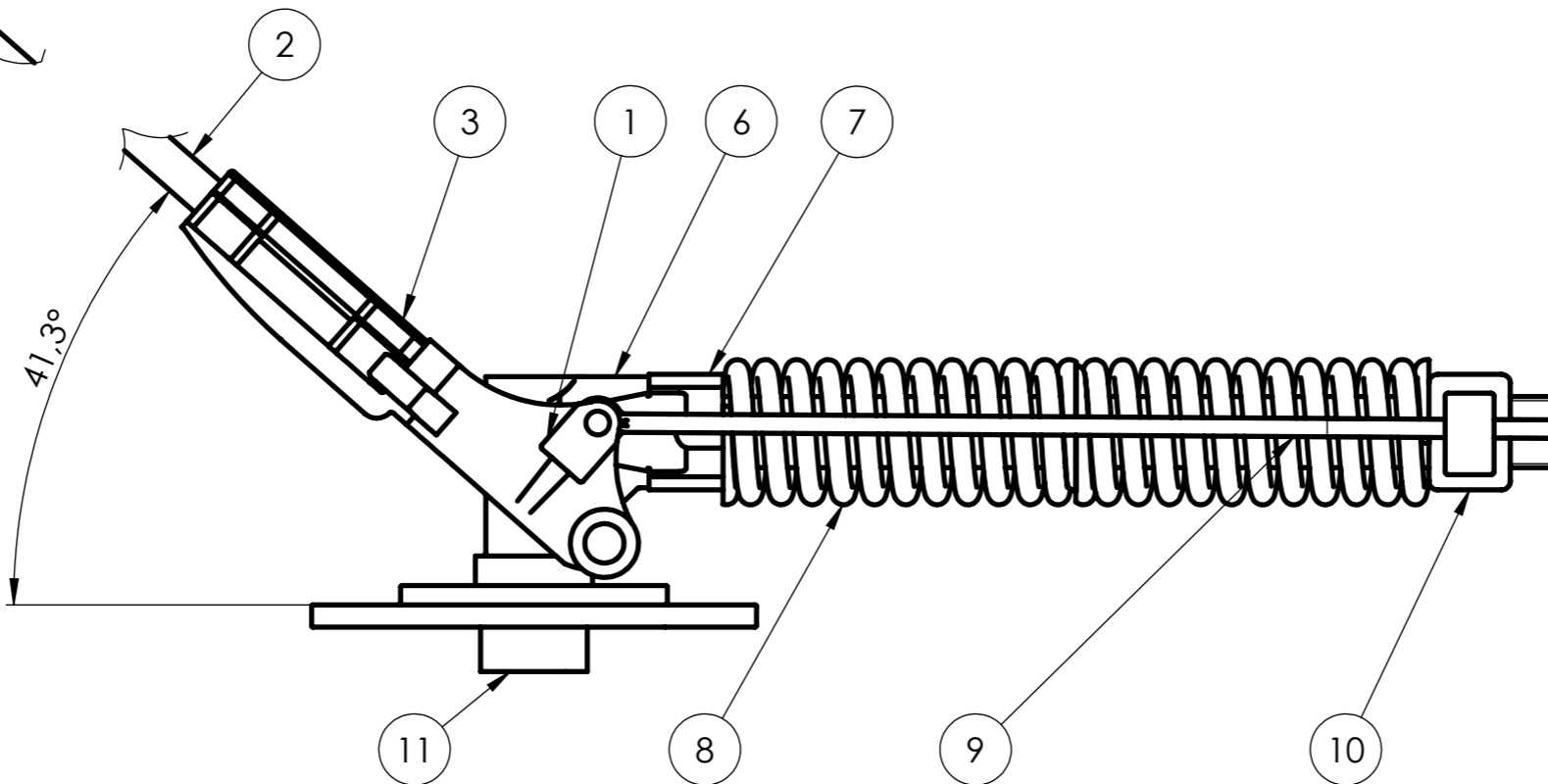
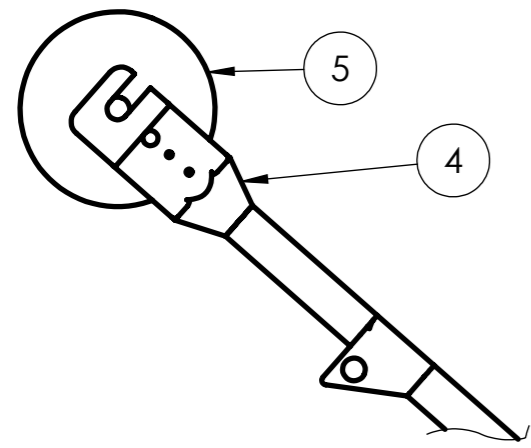
- [1] Museu da Carris, [Online]. <https://gateway.carris.pt/public/visita360/> (acedido a 8 de Setembro de 2023).
- [2] K.-H. Chang, e-Design - Computer-Aided Engineering Design, Elsevier, 2016.
- [3] Álvaro F. M. Azevedo, O Método Dos Elementos Finitos, 1ª Edição, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2003.
- [4] Á. Costa, R. Fernandes, Urban public transport in Europe: Technology diffusion and market organisation, *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 46 (2012) 269–284.
- [5] Site da Carris - Dados da Frota, (2023) [Online]. <https://www.carris.pt/a-carris/empresa/os-nossos-numeros/> (acedido a 9 de Setembro de 2023).
- [6] Características da Frota da Eléctricos, Divisão Estudos e Métodos de Eléctricos - Carris, 2002.
- [7] Current collector, [Online]. https://en.wikipedia.org/wiki/Current_collector#Trolley_pole_wheel (acedido a 18 de Julho de 2023).
- [8] Trolley Pole, [Online]. <https://academic-accelerator.com/encyclopedia/trolley-pole> (acedido a 10 de Setembro de 2023).
- [9] Tramway Information, [Online]. <https://www.tramwayinfo.com/Tramframe.htm?https://www.tramwayinfo.com/tramways/Articles/Depoele.htm> (acedido a 10 de Setembro de 2023).
- [10] W. Schroeter, A. Kautzmann, Trolley Pole, 663788, 1900.
- [11] Trolleybus Current Collectors, [Online]. <https://www.ftczech.com/products/green-city-transportation/trolleybus-current-collectors/> (acedido a 10 de Setembro de 2023).
- [12] Instrução de Trabalho IT/UNE/061/2009, Carris, 2009.

Anexos

Anexo I – Desenho Técnico da Forquilha do Braço de Trolley de 04/02/1970

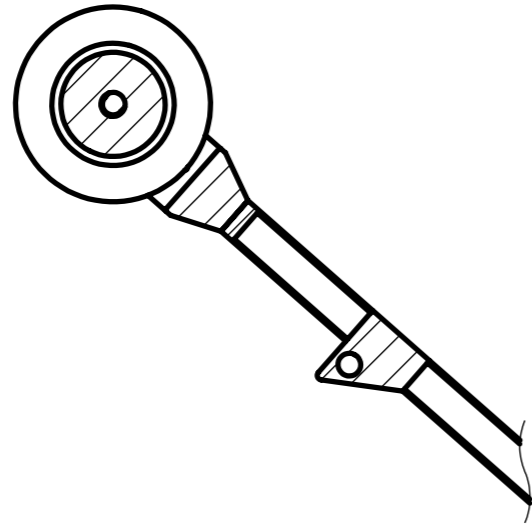


Anexo II – Desenhos Técnicos das componentes do Braço de Trolley obtido a partir do modelo geométrico

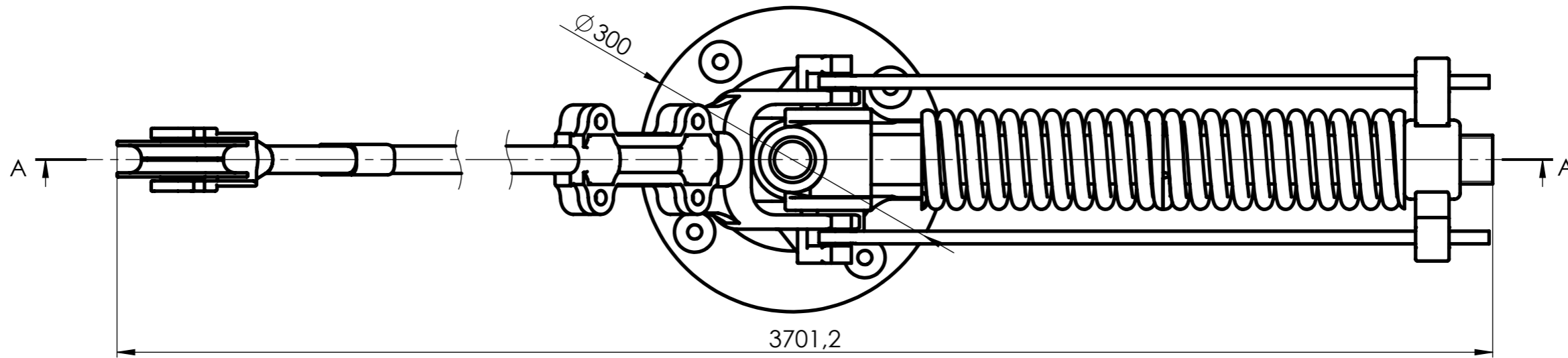
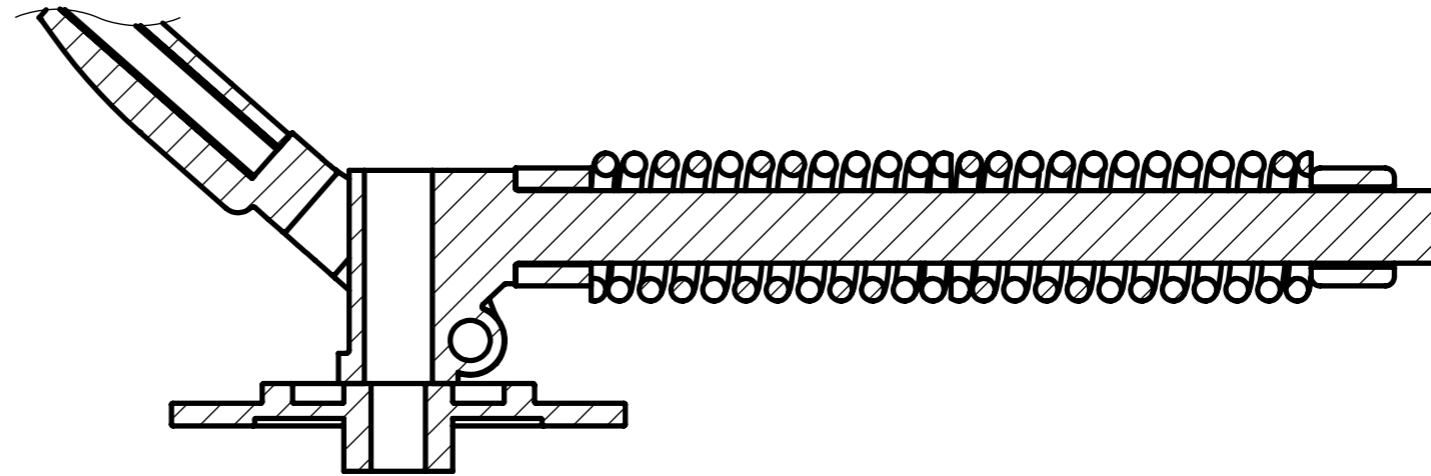


ITEM NO.	DESIGNAÇÃO	QUANTIDADE	MATERIAL	MASSA (g)	Nº DO DESENHO
1	Forquilha - Parte A	1	Aço Liga	6910.77	3
2	Tubo	1	Aço Liga	4888.64	10
3	Forquilha - Parte B	1	Aço Liga	1432.73	4
4	Suporte da Roldana	1	Aço Liga	939.00	11
5	Roldana	1	Bronze com teor de Estanho	1887.86	12
6	Suporte das Molas	1	Aço Liga	12915.62	2
7	Frente das Molas	1	Aço Liga	1952.29	8
8	Mola	2	Aço Liga	4202.30	6
9	Tirante Roscado	2	Aço Liga	657.54	9
10	Fixação das Molas	1	Aço Liga	2281.94	7
11	Base	1	Aço Liga	8850.97	5

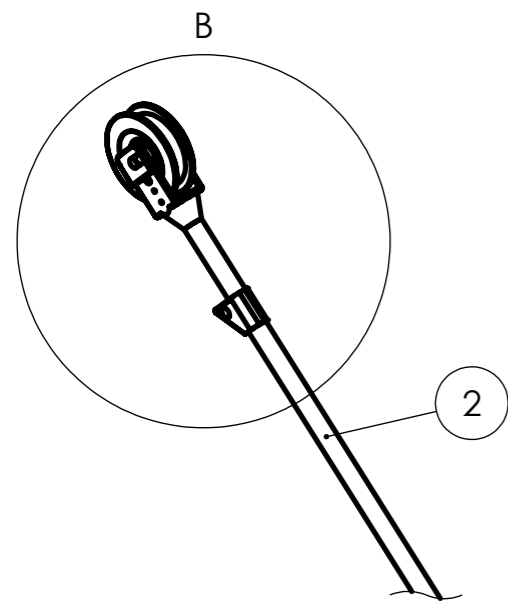
	ESCALA:	NOME	DATA	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA		
	1:5	DESENHOU	CMC		27-09-2023	
MATERIAL:	VERIFICOU	TÍTULO:		BRAÇO DE TROLLEY		
TOLERÂNCIA GERAL:	APROVOU	NOTAS:				
ACABAMENTOS:	NOTAS: CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590		DESENHO N.º A3 1	FOLHA: 1	MASSA [g]: 51779.50	REVISÃO:



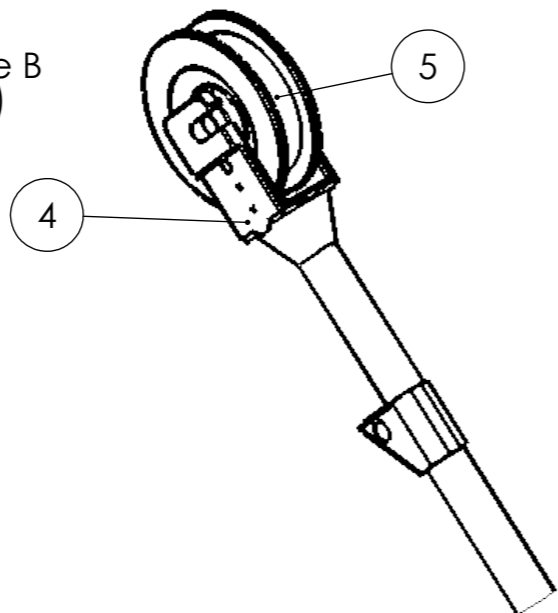
Corte A-A



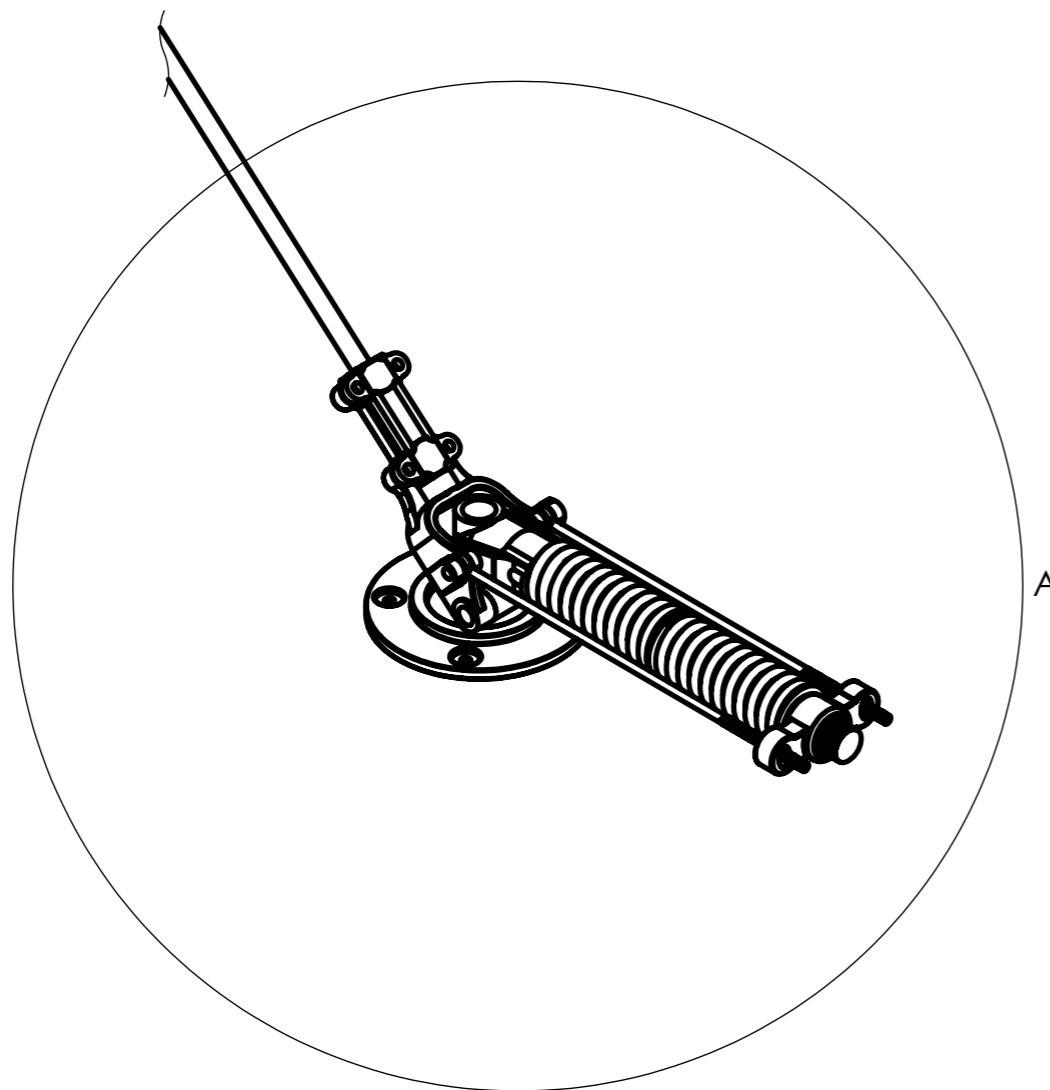
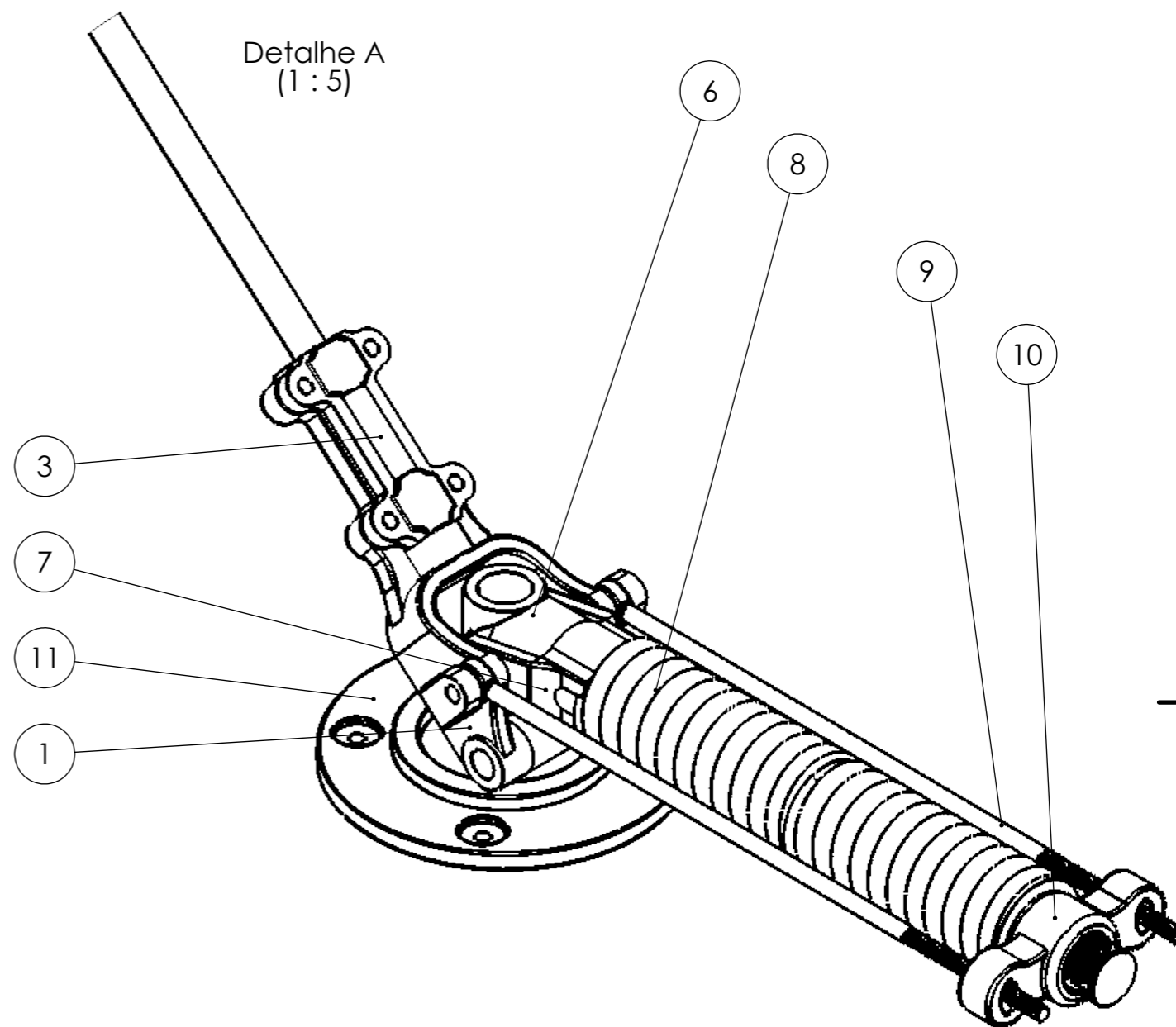
	ESCALA:	NOME	DATA	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA			
	1:5	DESENHOU	CMC		27-09-2023		
MATERIAL:		VERIFICOU		TÍTULO:			
TOLERÂNCIA GERAL:		APROVOU			BRAÇO DE TROLLEY		
ACABAMENTOS:		NOTAS:	CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590				
				DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
				A3	1	2	



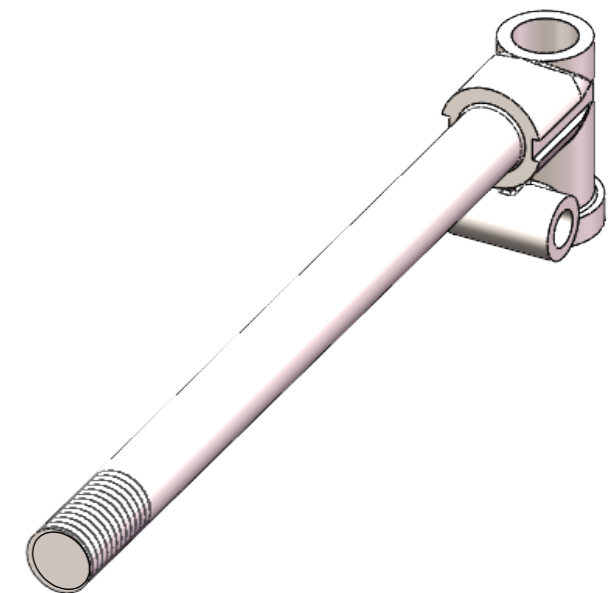
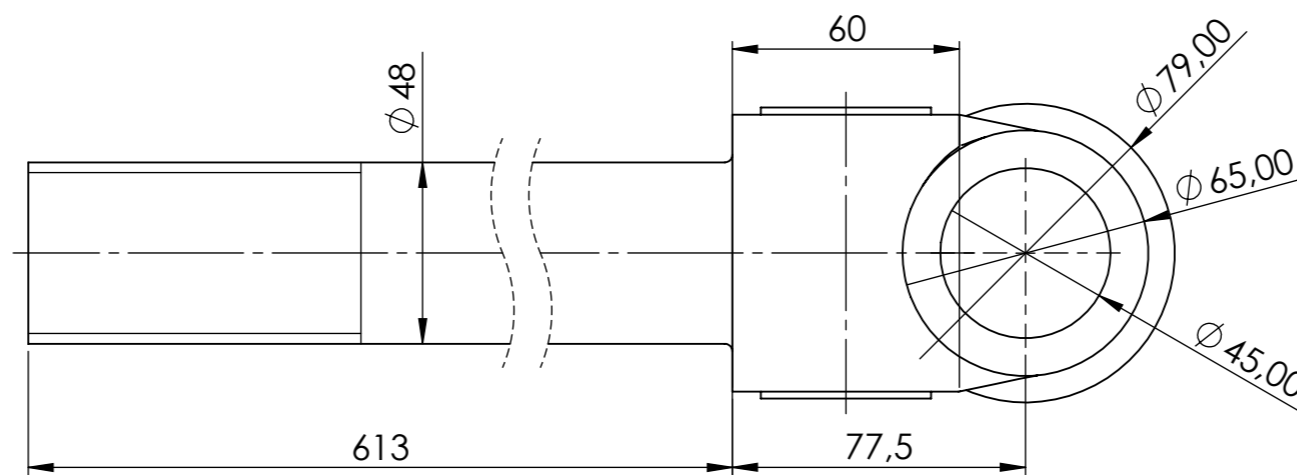
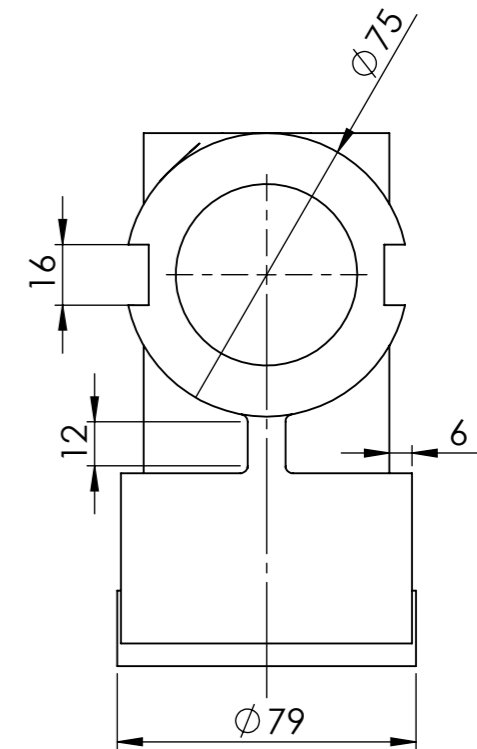
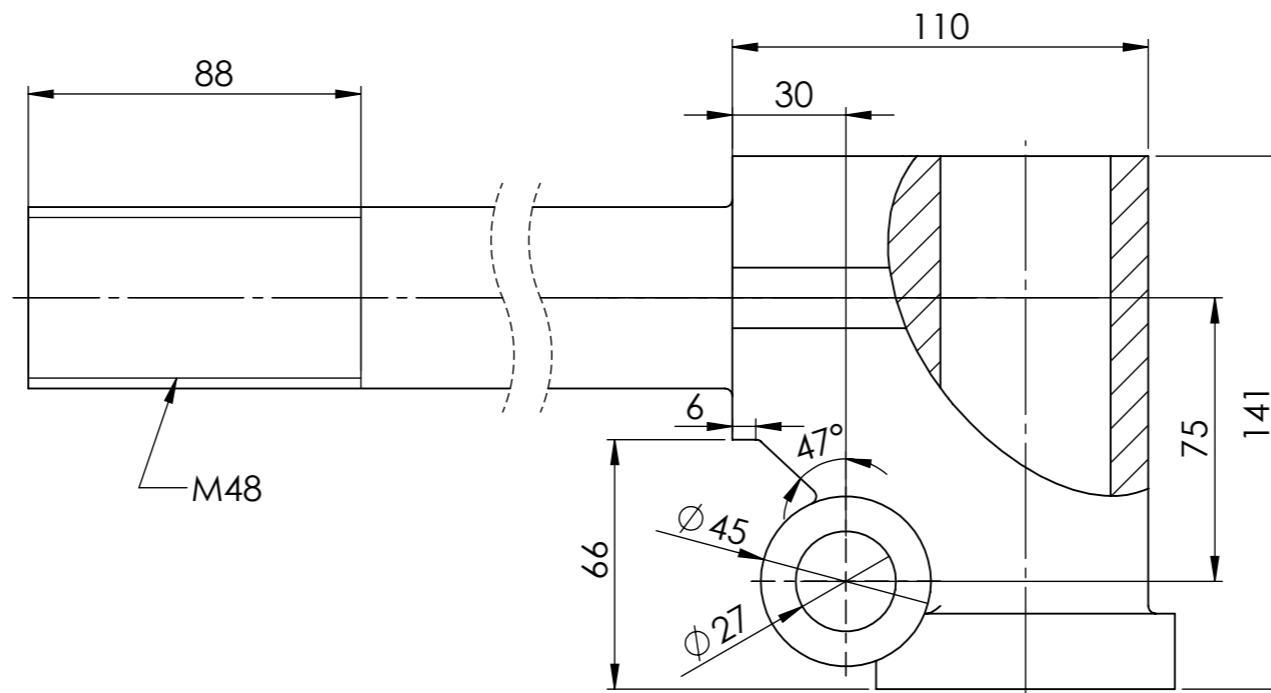
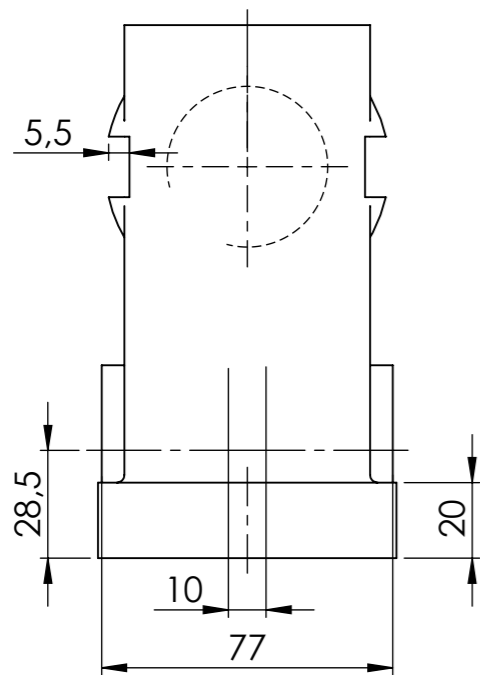
Detalhe B
(1 : 5)



Detalhe A
(1 : 5)

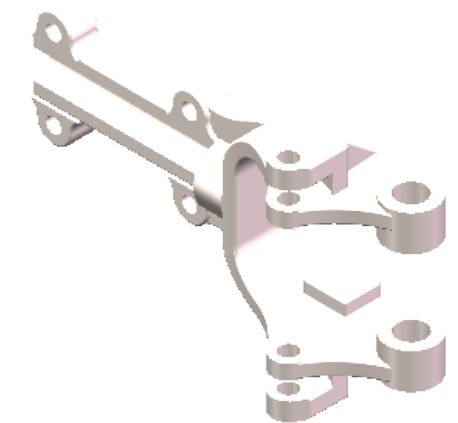
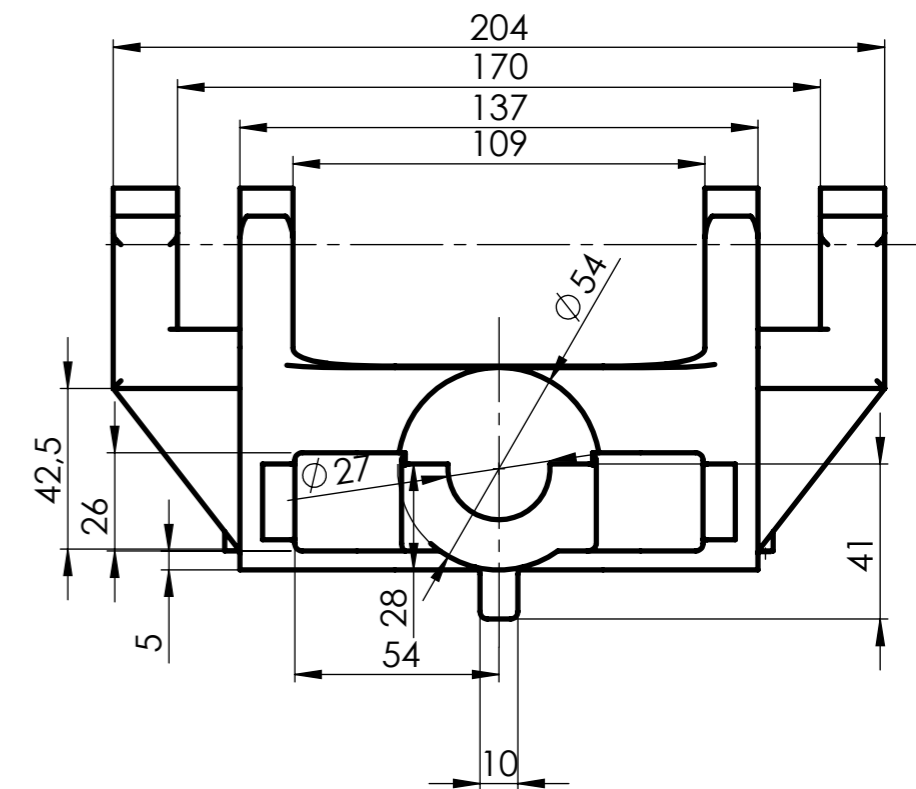
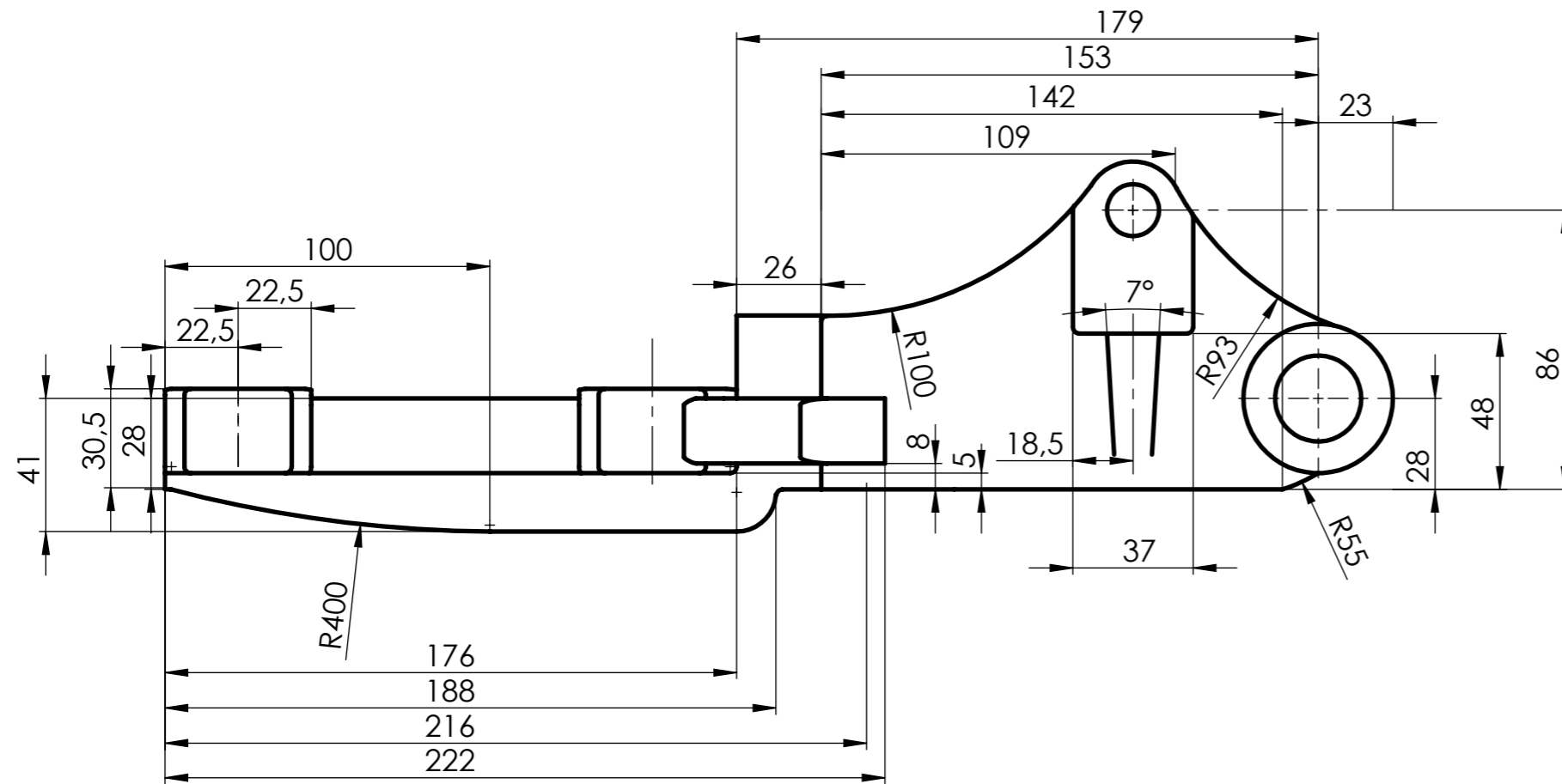


	ESCALA:	1:10	NOME	DATA	ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
	DESENHOU	CMC	27-09-2023		
	VERIFICOU				
MATERIAL:	APROVOU				TÍTULO:
TOLERÂNCIA GERAL:	NOTAS:			BRAÇO DE TROLLEY	
ACABAMENTOS:	CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590				
A3		DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
1		3	51663.96		



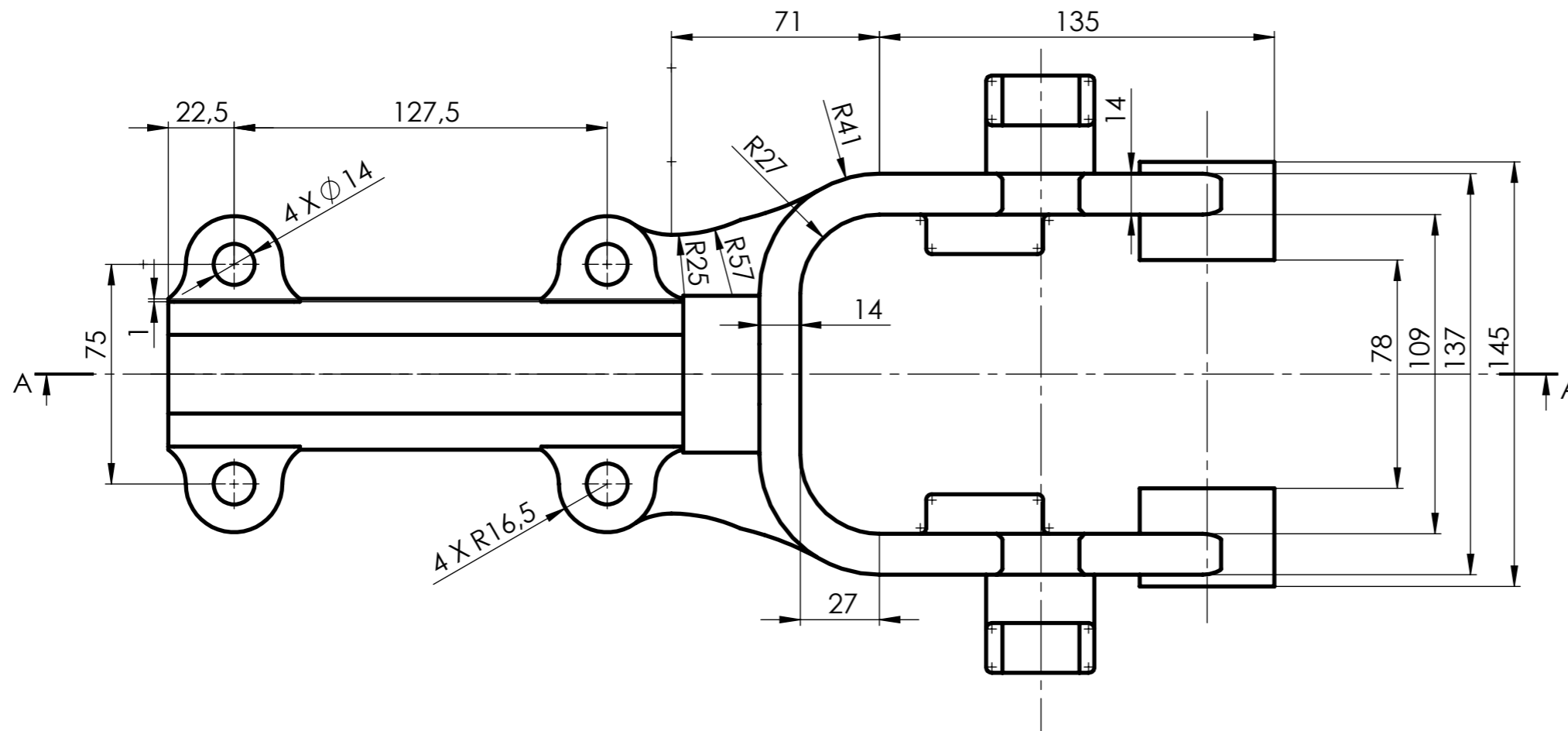
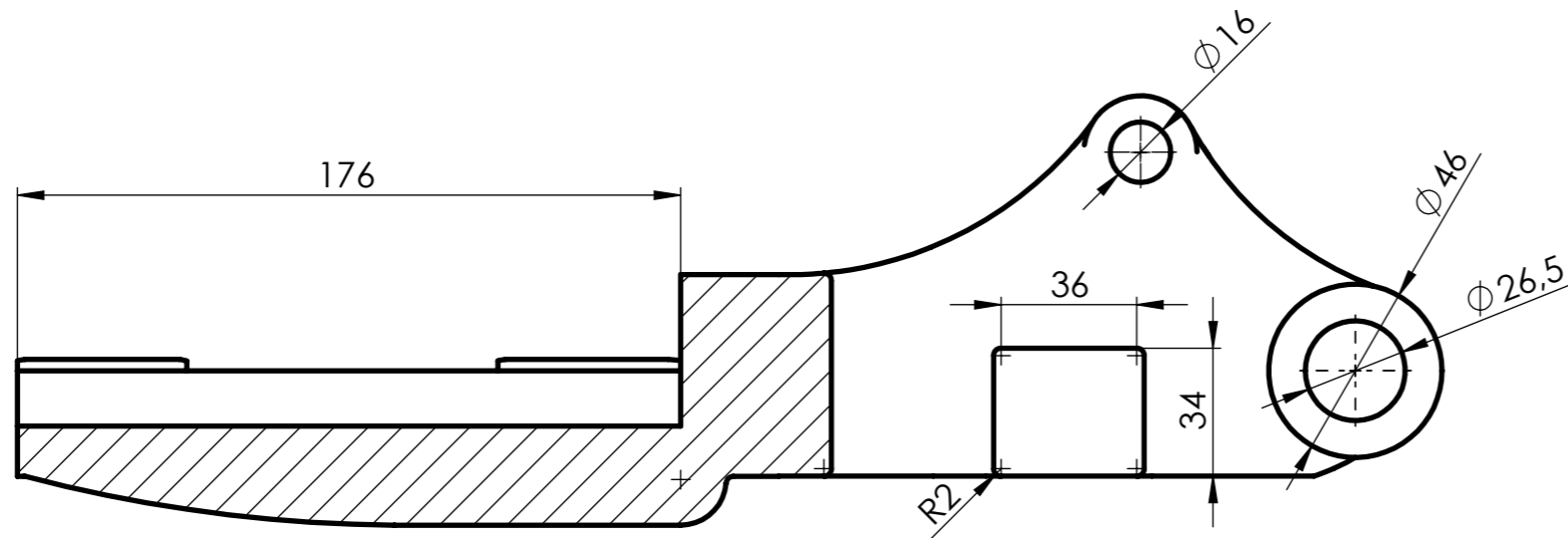
Todos os boleados têm raio 2

	ESCALA:	NOME	DATA	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
	1:2	DESENHOU	27-09-2023		
MATERIAL:		VERIFICOU		TÍTULO:	
Aço Liga		APROVOU			
TOLERÂNCIA GERAL:		NOTAS:		SUPORTE DAS MOLAS	
		CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590			
ACABAMENTOS:		DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
		A3	2	1	12915.62

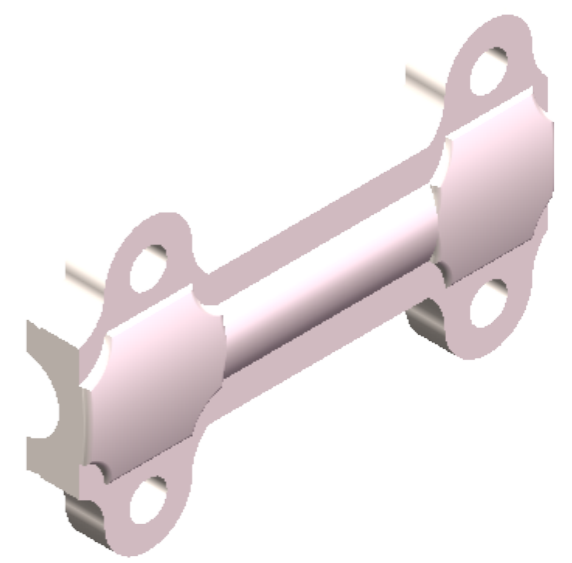
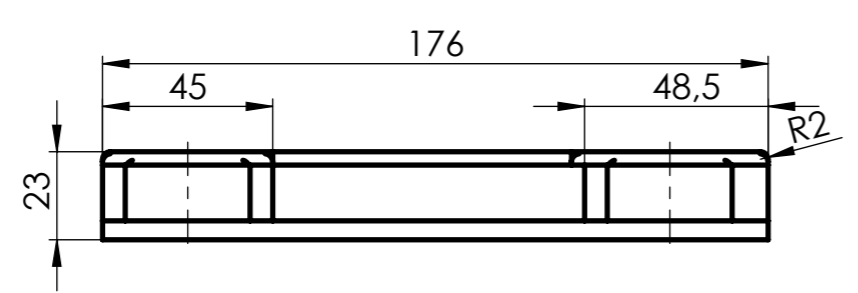
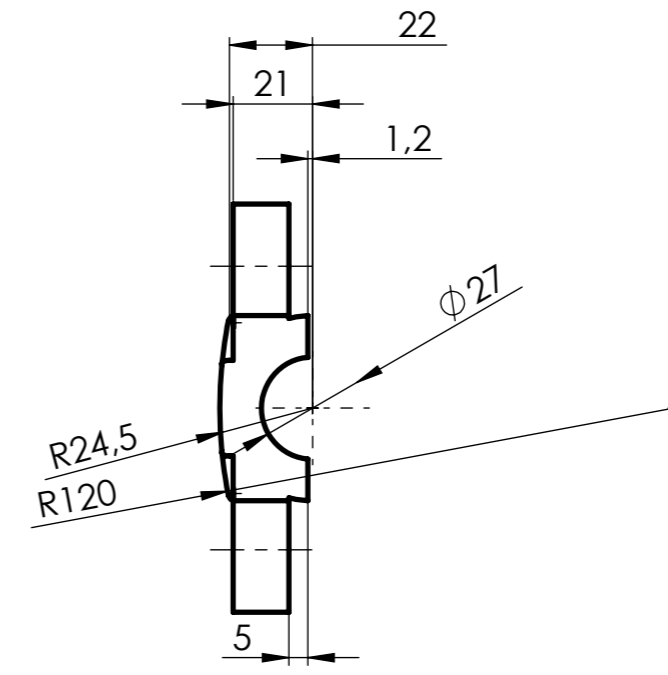
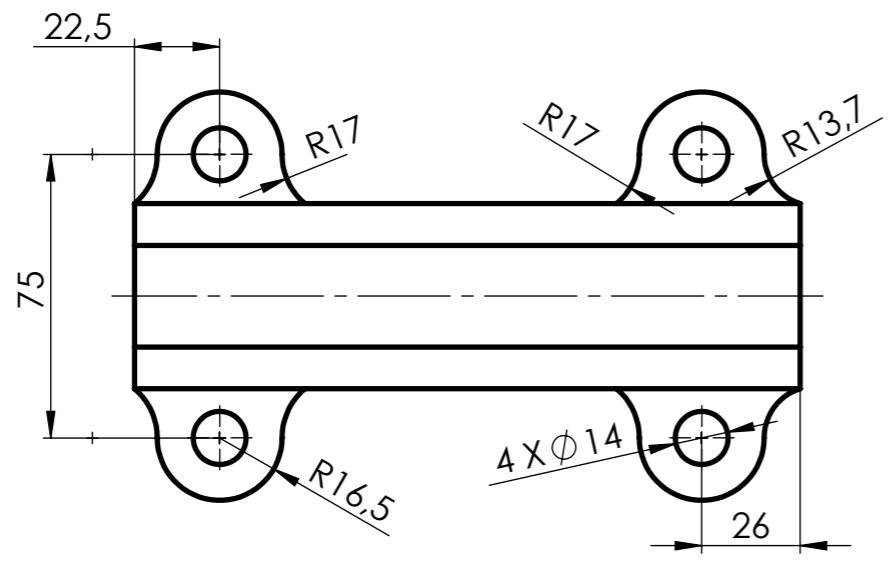


	ESCALA:	NOME	DATA	ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
	1:2	DESENHOU	CMC		27-09-2023
MATERIAL:		VERIFICOU		TÍTULO:	
Aço Liga		APROVOU			
TOLERÂNCIA GERAL:		NOTAS:		FORQUILHA - PARTE A	
		CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590			
ACABAMENTOS:		DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
		A3	3	1	6910.77

Corte A-A

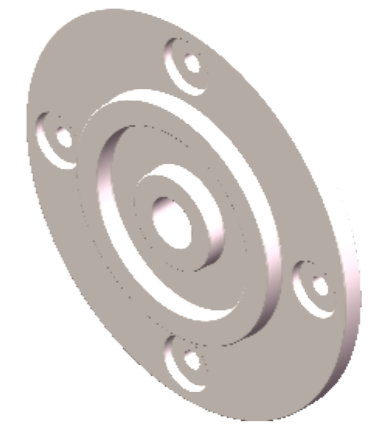
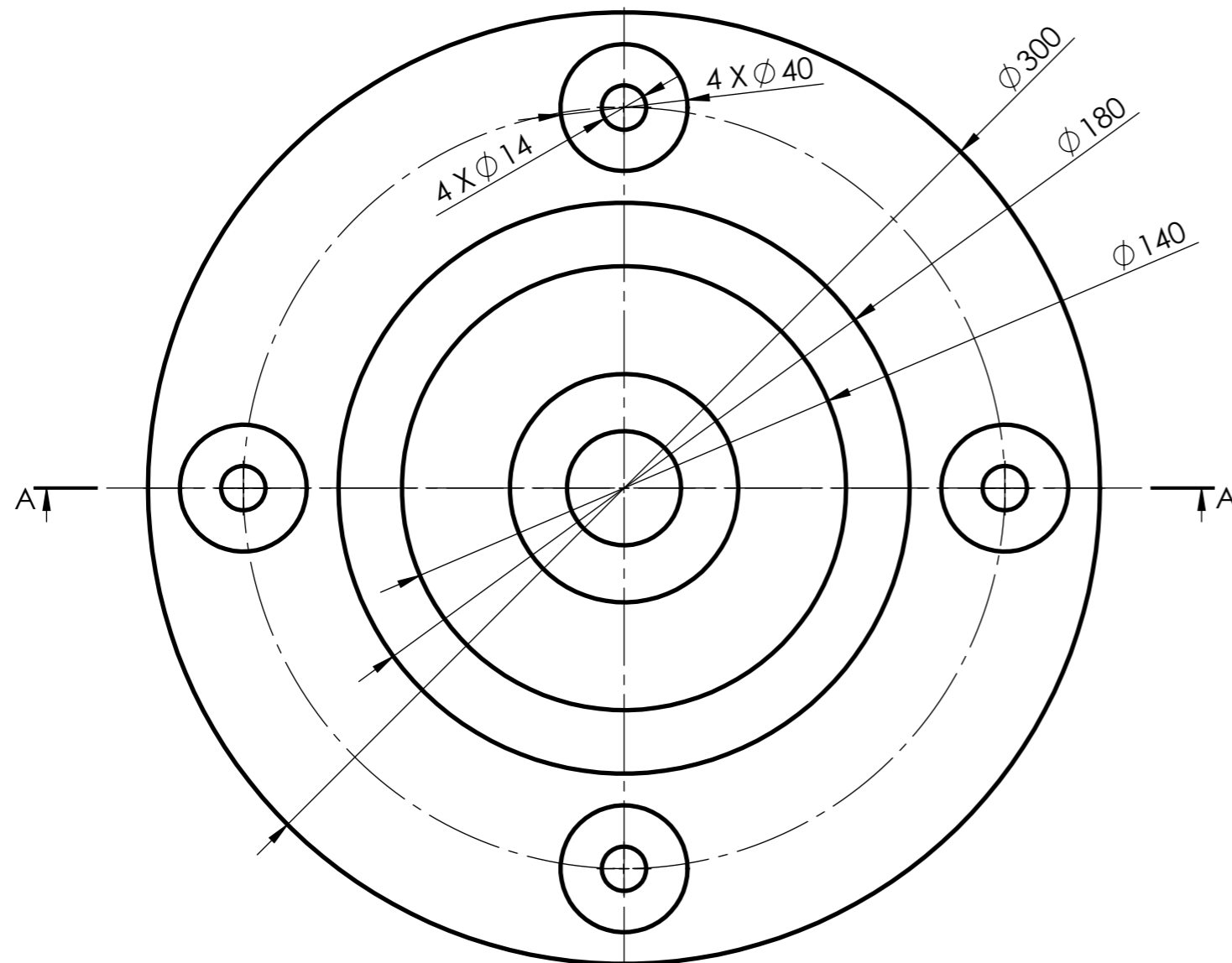
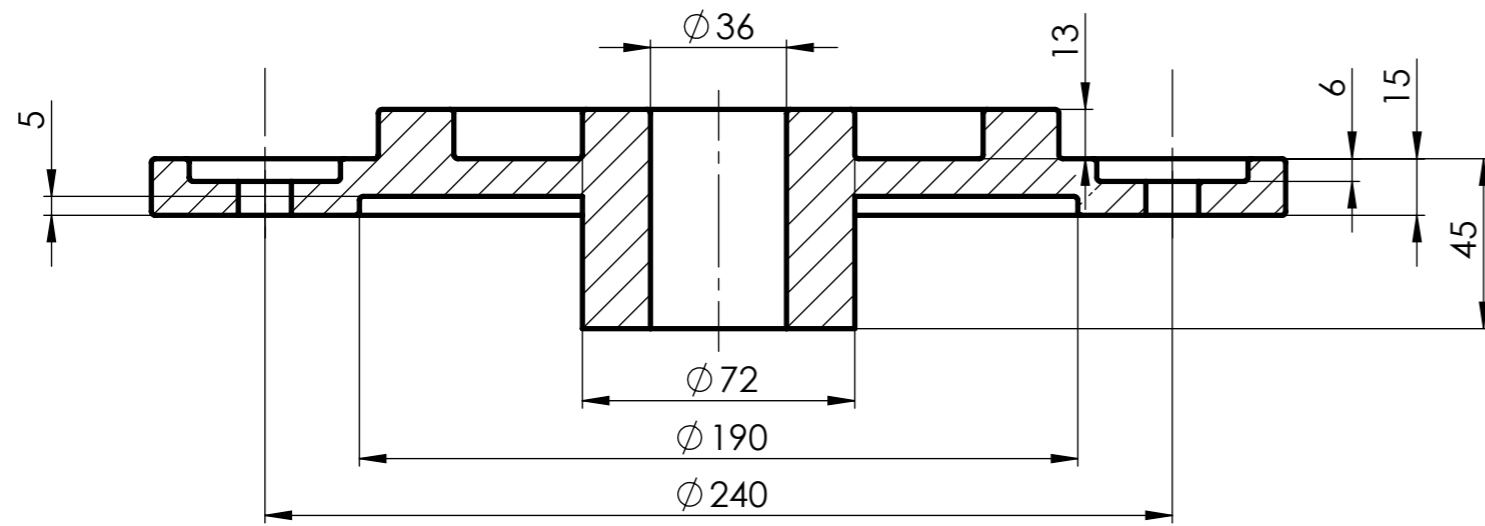


	ESCALA:	NOME	DATA	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
	1:2	DESENHOU	CMC		27-09-2023
MATERIAL:		VERIFICOU		TÍTULO:	
Aço Liga		APROVOU			
TOLERÂNCIA GERAL:		NOTAS:		FORQUILHA - PARTE A	
		CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590			
ACABAMENTOS:		DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
		A3 3	2	6910.77	



	ESCALA:	NOME	DATA	ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA		
	1:2	DESENHOU	CMC		27-09-2023	
MATERIAL:		VERIFICOU		TÍTULO:		
Aço Liga		APROVOU			FORQUILHA - PARTE B	
TOLERÂNCIA GERAL:		NOTAS:		DESENHO N.º A3 4		
ACABAMENTOS:		CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590				
				FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
				1	1432.73	

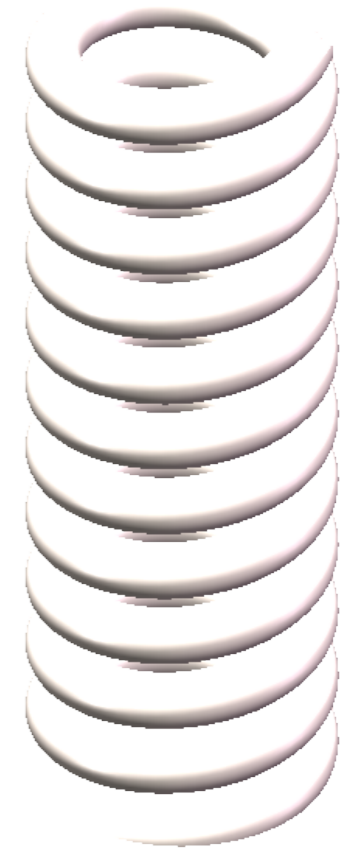
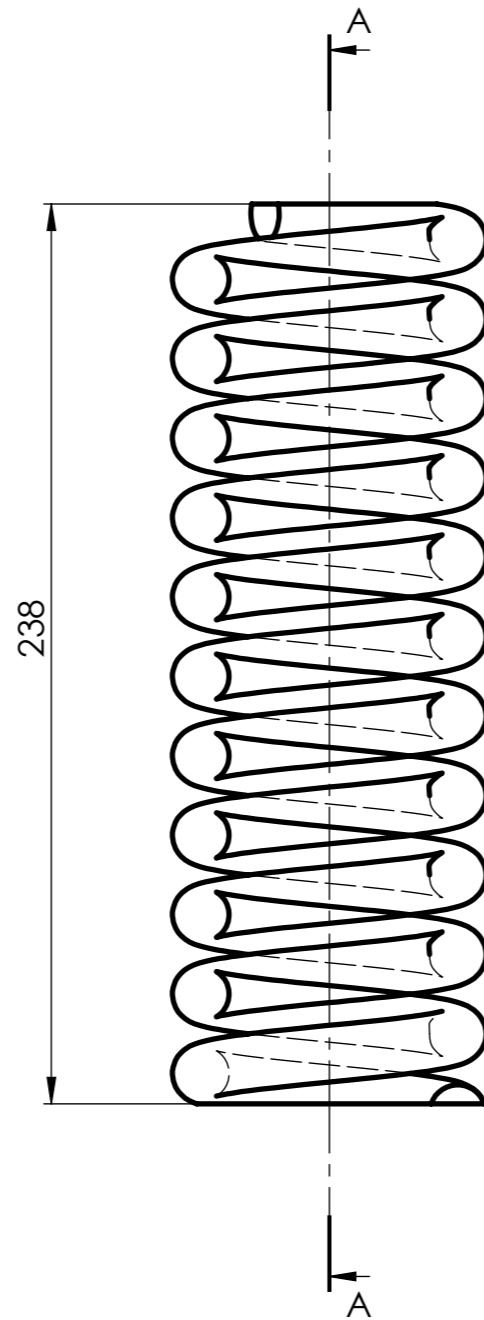
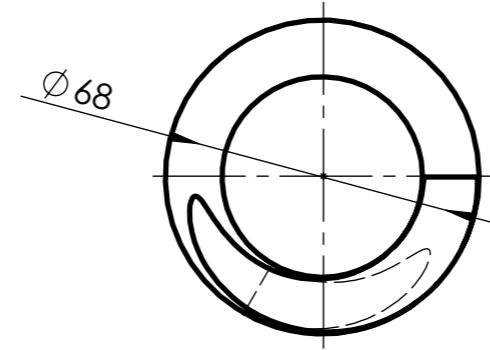
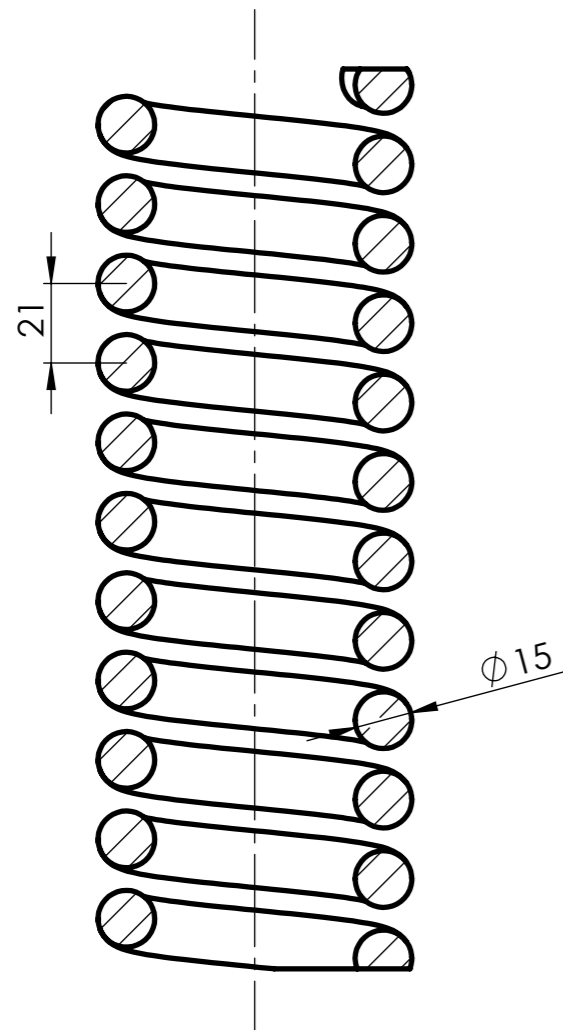
Corte A-A



Todos os boleados têm raio 1

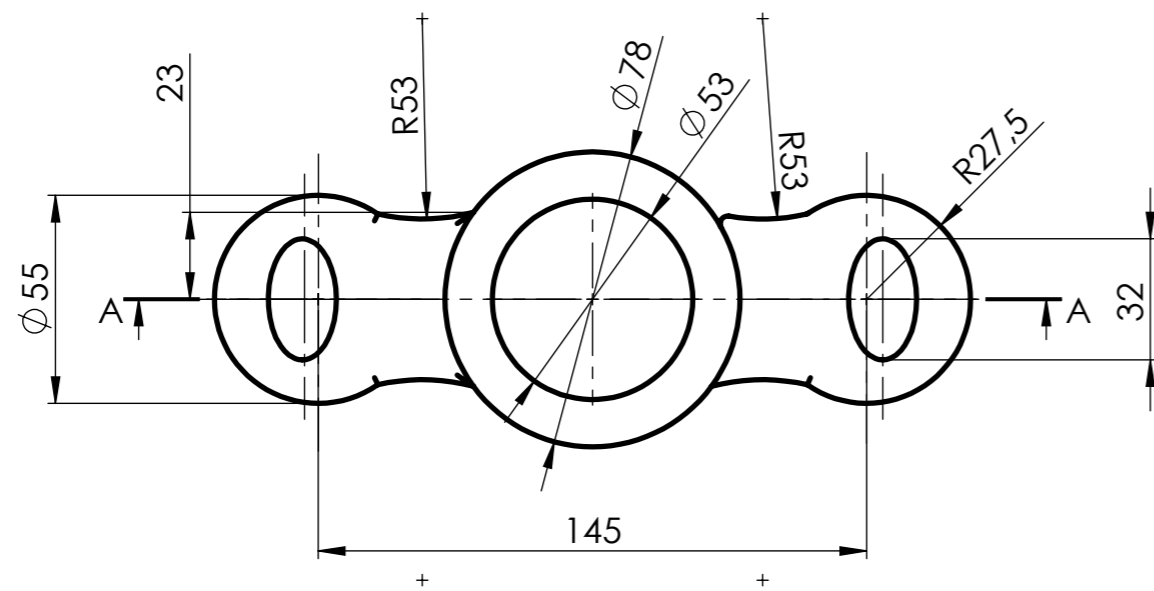
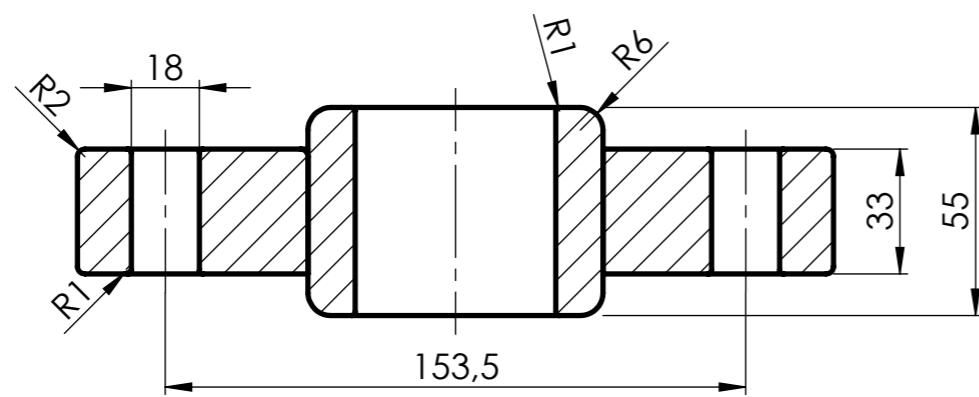
	ESCALA:	NOME	DATA		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA		
	1:2	DESENHOU	CMC		27-09-2023	TÍTULO:	
MATERIAL:	Aço Liga			<p style="text-align: center; font-size: 24px; font-weight: bold;">BASE</p>			
TOLERÂNCIA GERAL:	NOTAS:						
ACABAMENTOS:	CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590			DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
	A3	5	1	8850.97			

Corte A-A

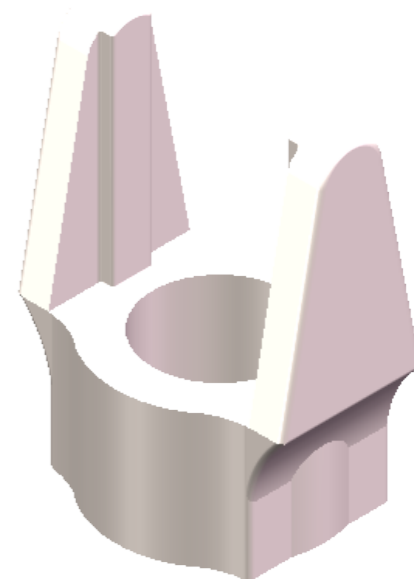
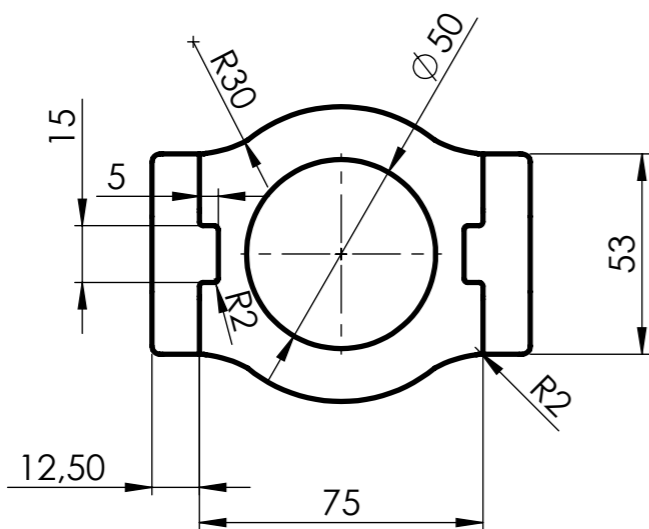
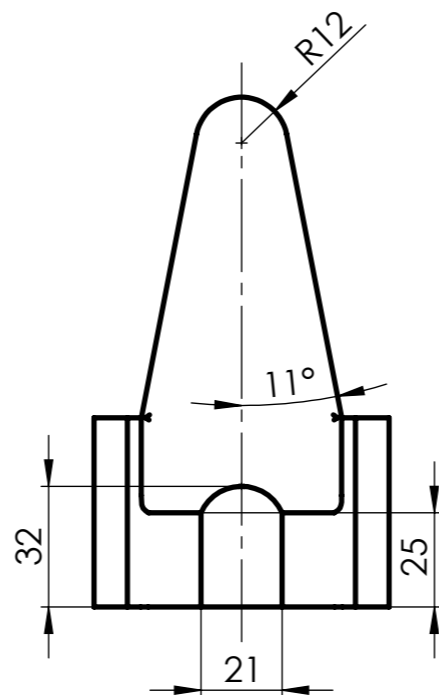
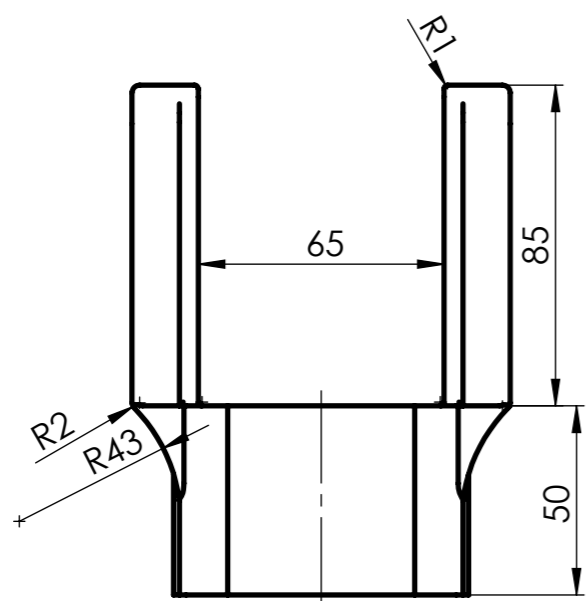
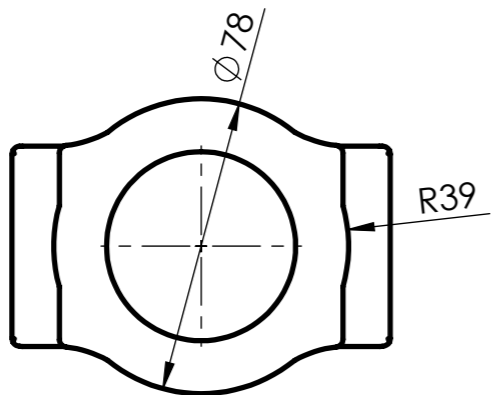


	ESCALA:	NOME	DATA	ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
	1:2	DESENHOU	CMC		27-09-2023
MATERIAL:	TOLERÂNCIA GERAL:	APROVOU		TÍTULO:	
Aço Liga				MOLA	
ACABAMENTOS:	NOTAS:	CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590			
A3		DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
6		1	3243.22		

Corte A-A

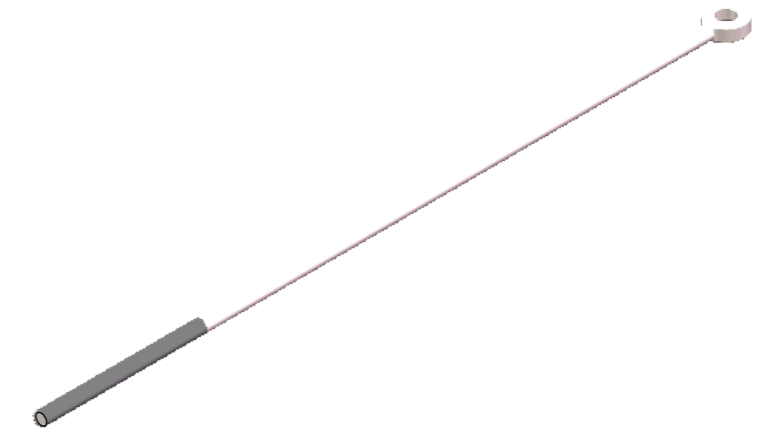
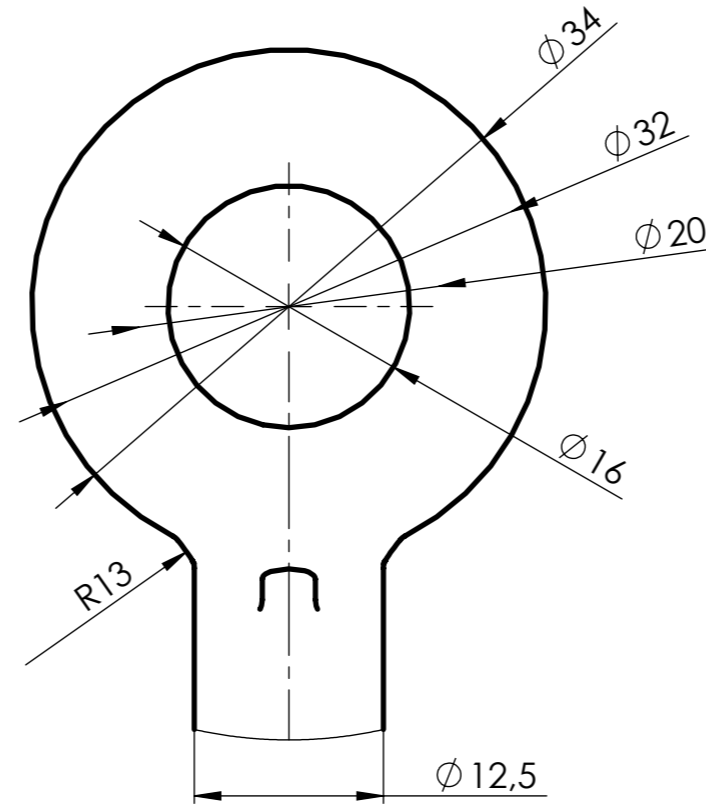
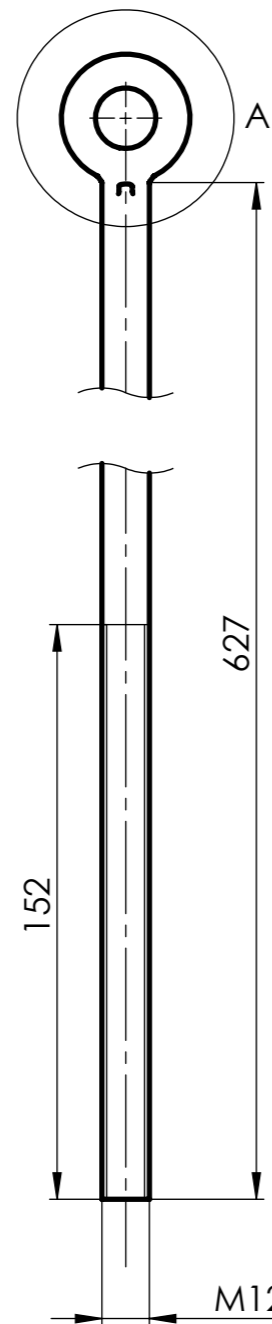
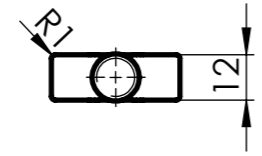


	ESCALA:	NOME	DATA	ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
	1:2	DESENHOU	CMC		27-09-2023
MATERIAL:		VERIFICOU		TÍTULO:	
Aço Liga		APROVOU			
TOLERÂNCIA GERAL:		NOTAS:		FIXAÇÃO DAS MOLAS	
		CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590			
ACABAMENTOS:		DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
		A3	7	1	2281.94

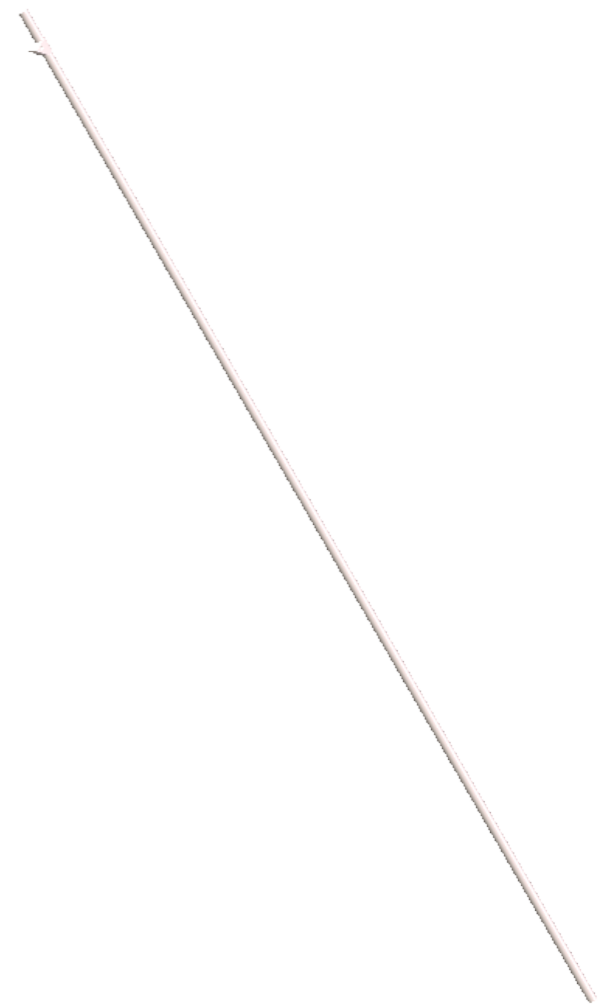
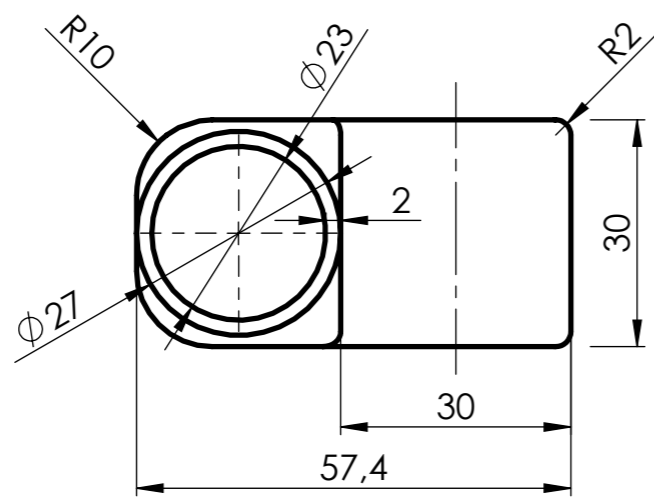
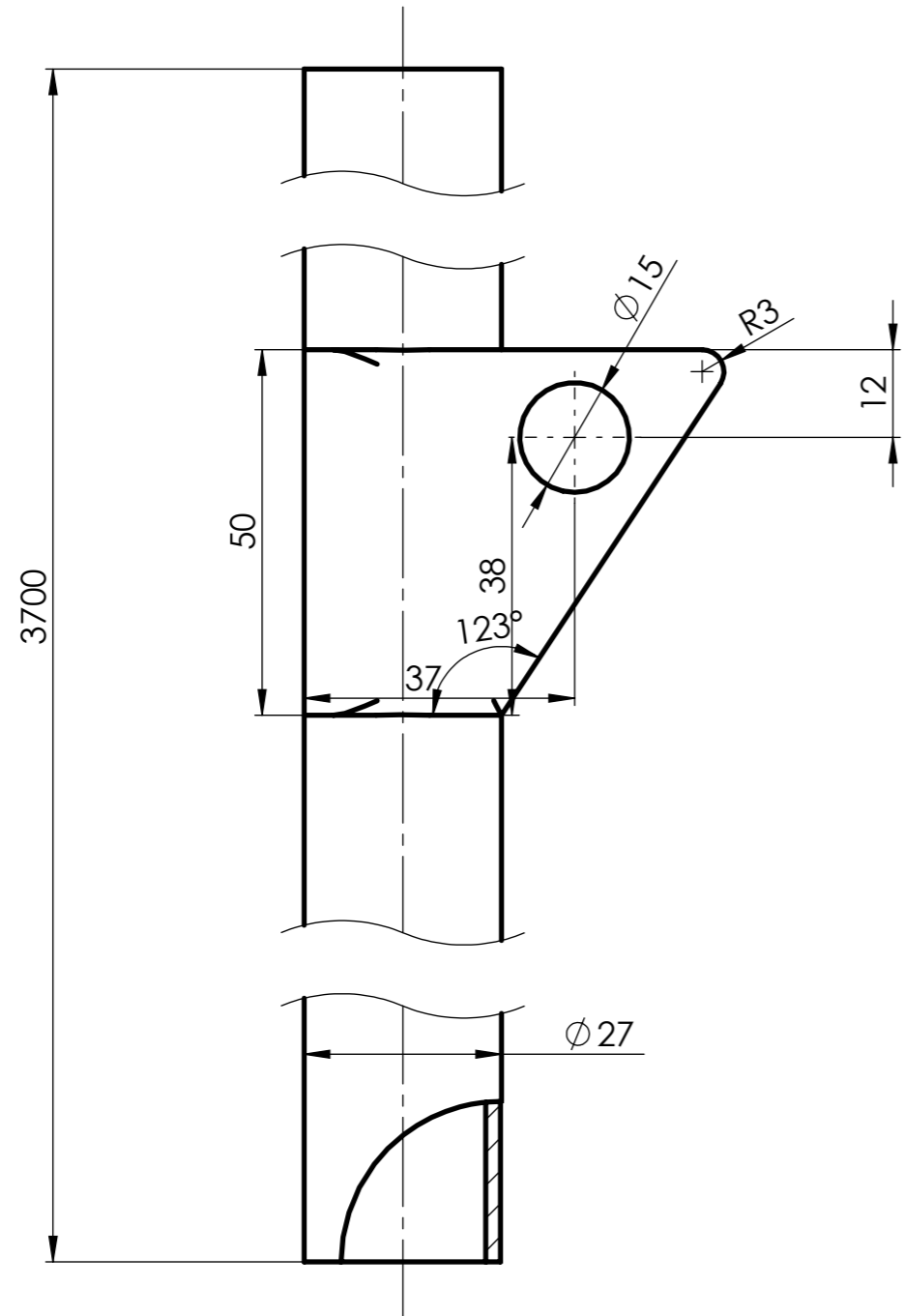


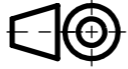

	ESCALA:	NOME	DATA	ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
	1:2	DESENHOU CMC	27-09-2023	
MATERIAL: Aço Liga	TOLERÂNCIA GERAL:	NOTAS: CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590	TÍTULO: FRENTE DAS MOLAS	
ACABAMENTOS:			DESENHO N.º A3 8	FOLHA: 1
			MASSA [g]: 1952.29	REVISÃO:

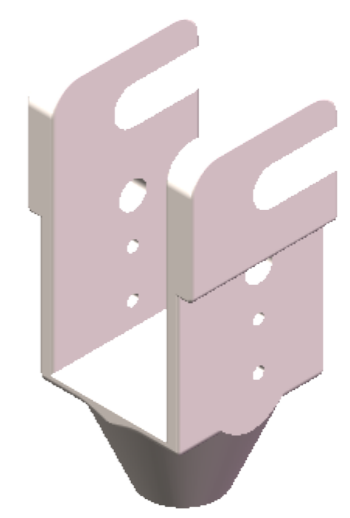
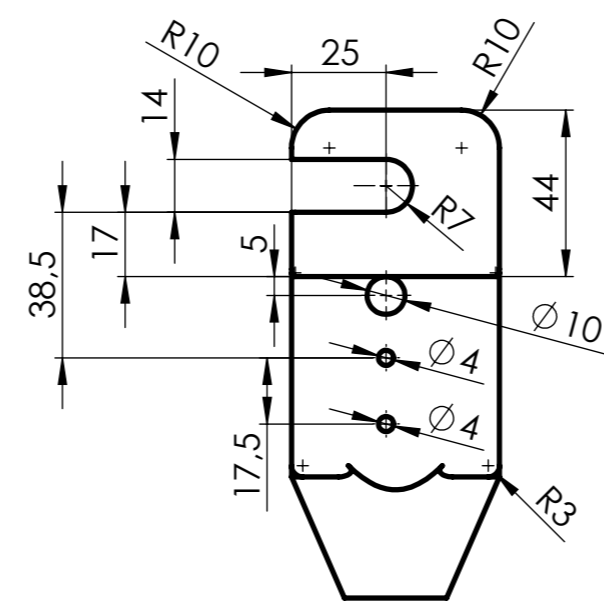
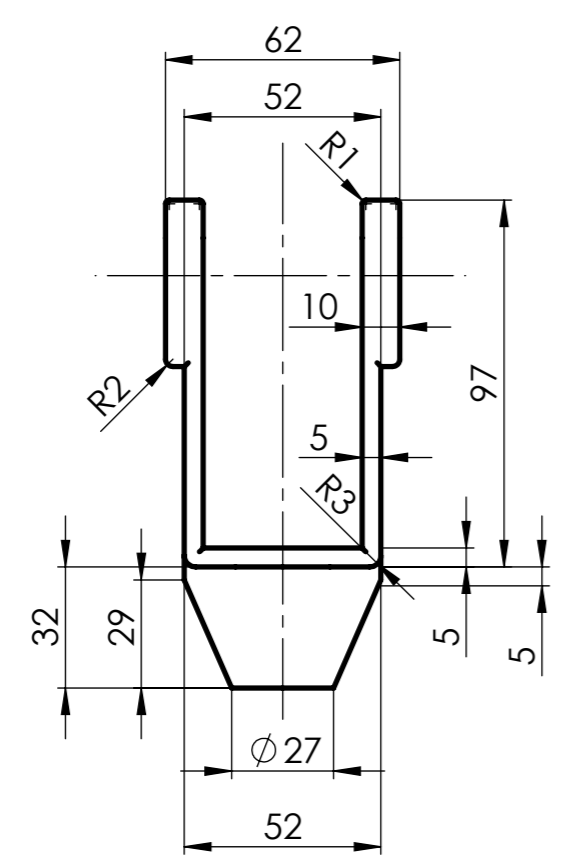
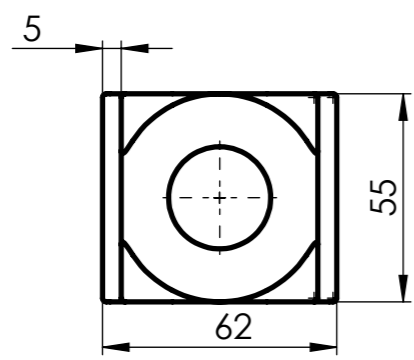
Detalhe A
(2:1)

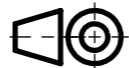



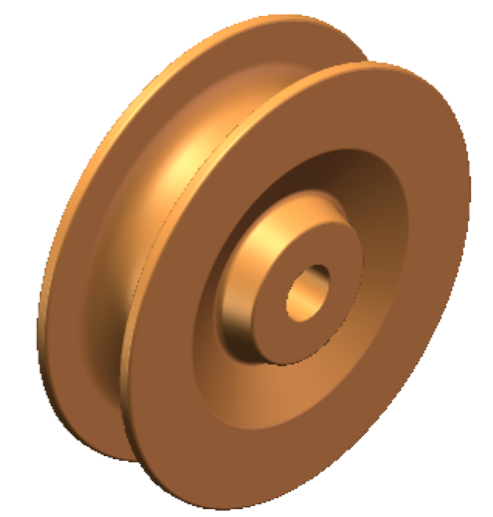
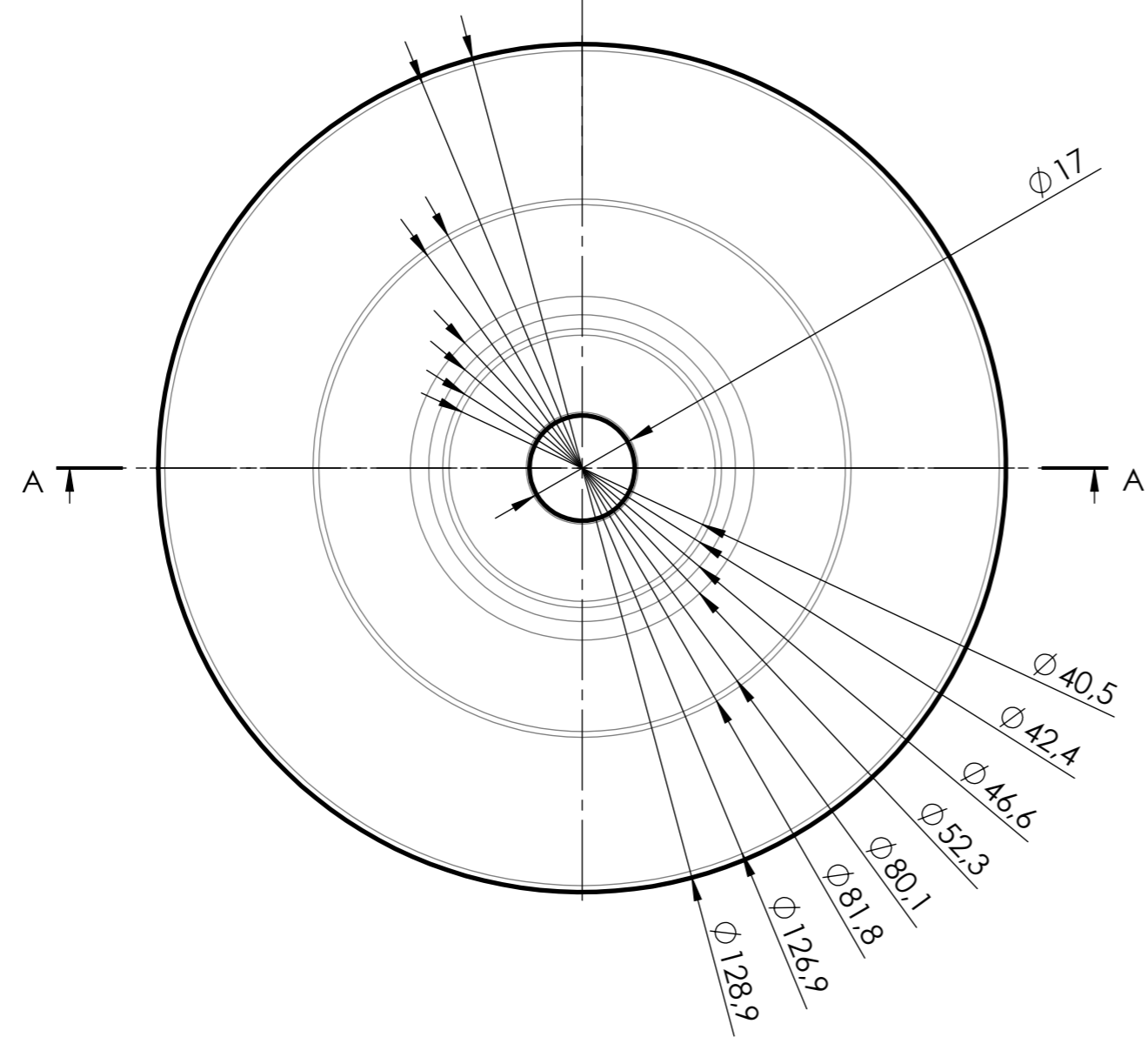
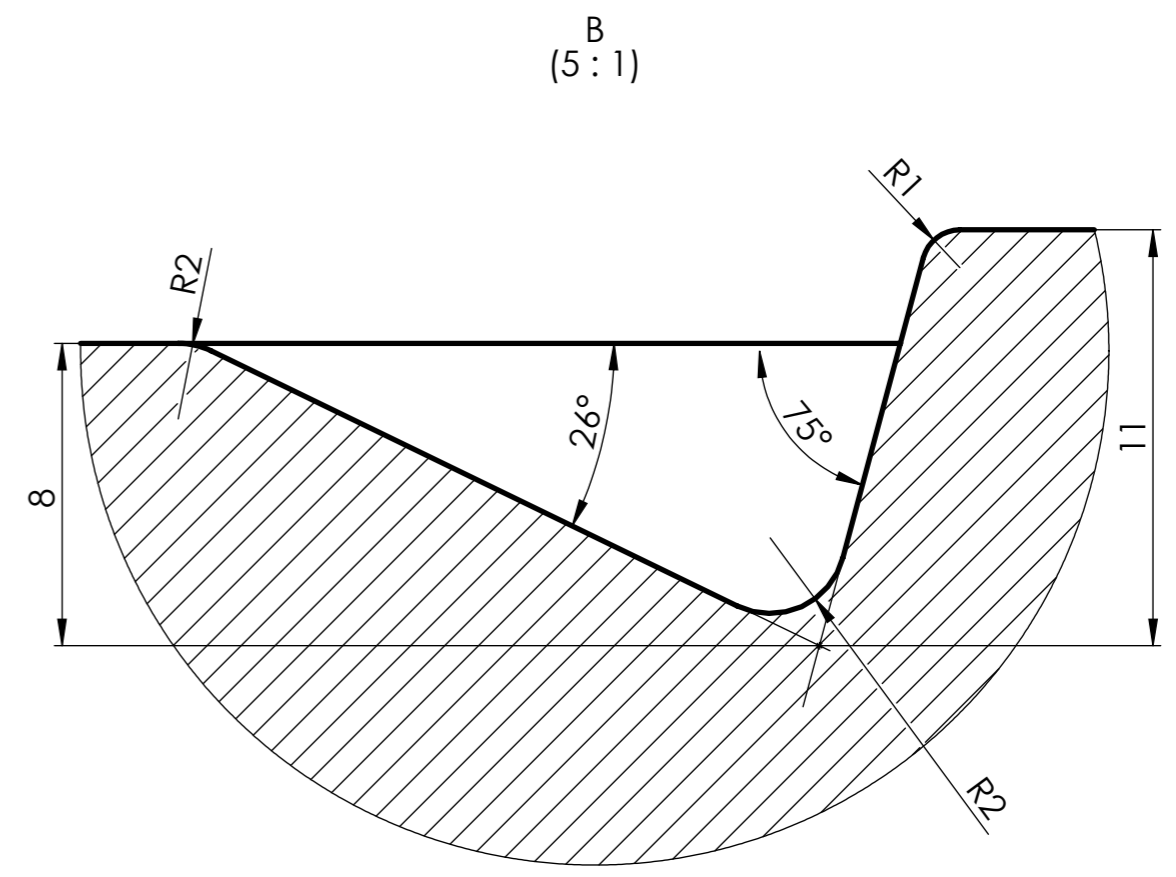
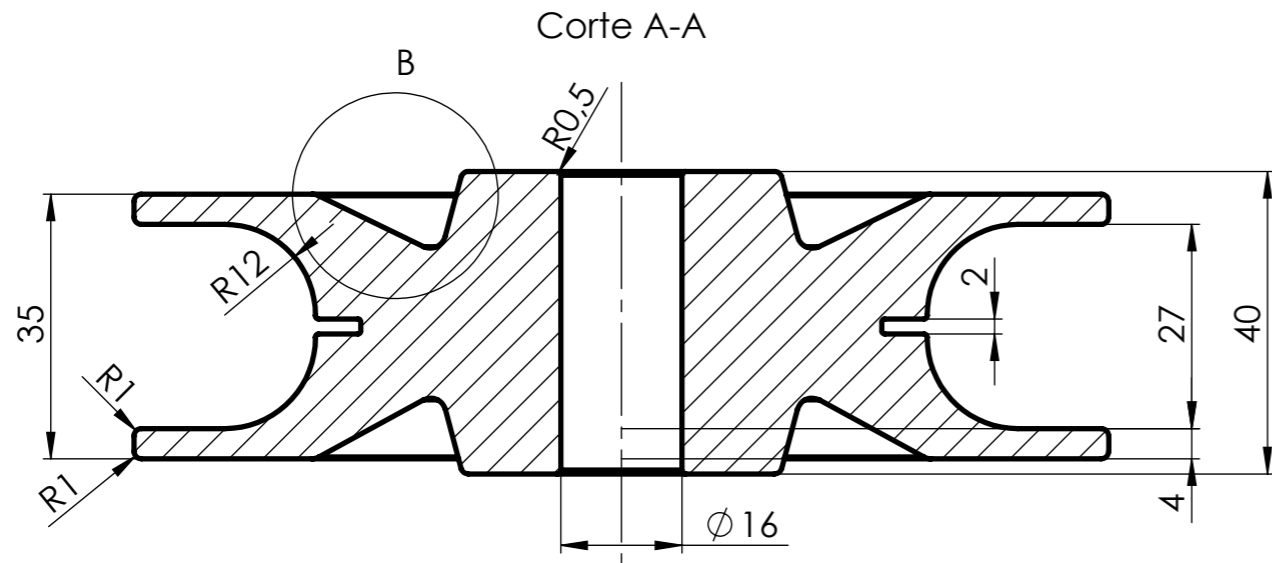
	ESCALA:	NOME	DATA	ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
	1:2	DESENHOU CMC	27-09-2023		
MATERIAL: Aço Liga	TOLERÂNCIA GERAL:	ACABAMENTOS:	NOTAS: CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590	TÍTULO: TIRANTE ROSCADO	
A3		DESENHO N.º 9	FOLHA: 1	MASSA [g]: 657.54	REVISÃO:



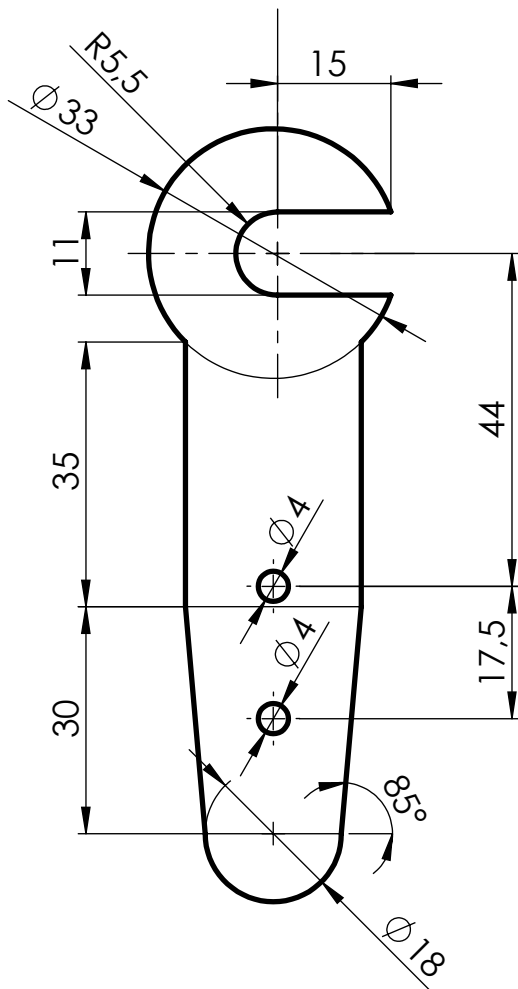
	ESCALA:	NOME	DATA	 ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA	
	1:1	DESENHOU	CMC		27-09-2023
MATERIAL:		VERIFICOU		TÍTULO:	
Aço Liga		APROVOU			TUBO
TOLERÂNCIA GERAL:		NOTAS:			
		CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590			
ACABAMENTOS:		DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
		A3	10	1	4888.64



	ESCALA:	NOME	DATA	 ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
	1:2	DESENHOU	CMC	
MATERIAL:		VERIFICOU		TÍTULO:
Aço Liga		APROVOU		
TOLERÂNCIA GERAL:		NOTAS:		DESENHO N.º A3 11
ACABAMENTOS:		CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590		
		FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
		1	939.00	

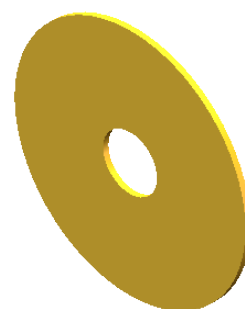
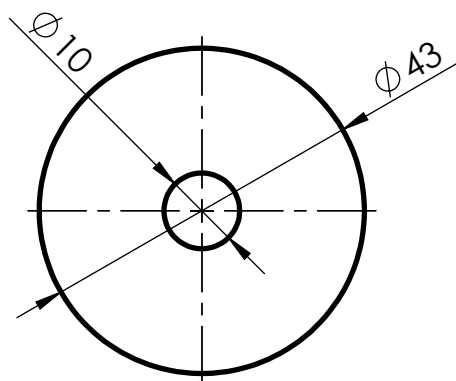


	ESCALA:	NOME	DATA	ISEL DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
	1:1	DESENHOU CMC	27-09-2023	
MATERIAL: Bronze com teor de Estanho	VERIFICOU	TÍTULO: ROLDANA		
TOLERÂNCIA GERAL:	APROVOU	NOTAS: CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590		
ACABAMENTOS:	A3	DESENHO N.º 12	FOLHA: 1	MASSA [g]: 1887.86
			REVISÃO:	

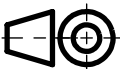



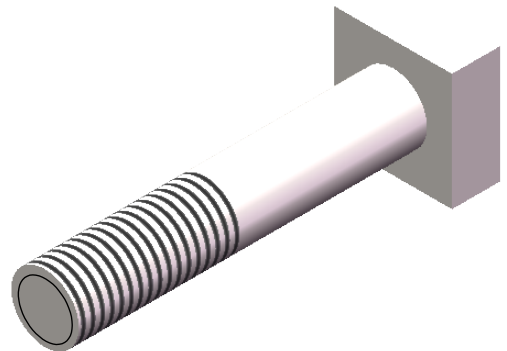
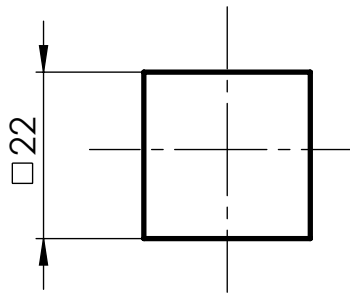
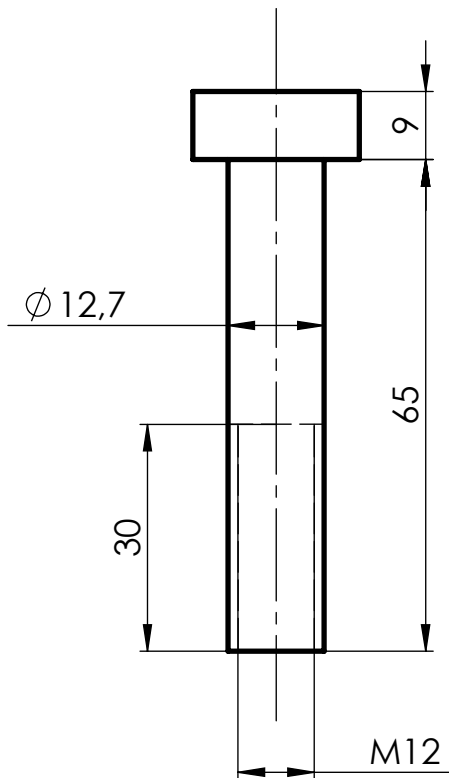
Chapa com espessura de 1mm



	ESCALA: 1:1	NOME CMC	DATA 27-09-2023	ISEL	DEPARTAMENTO DE DE ENGENHARIA MECÂNICA		
		DESENHOU VERIFICOU APROVOU	TÍTULO: ACESSÓRIO DA ROLDANA		DESENHO N.º A4 13	FOLHA: 1	MASSA [g]: 17.80
MATERIAL: Latão		NOTAS: CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590					
TOLERÂNCIA GERAL:							
ACABAMENTOS:							



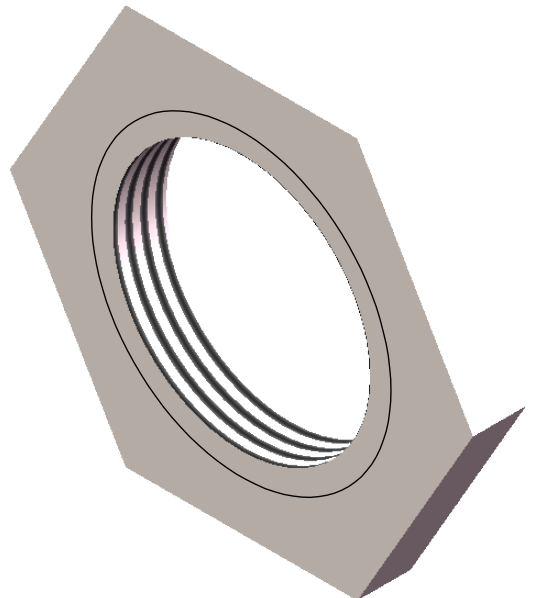
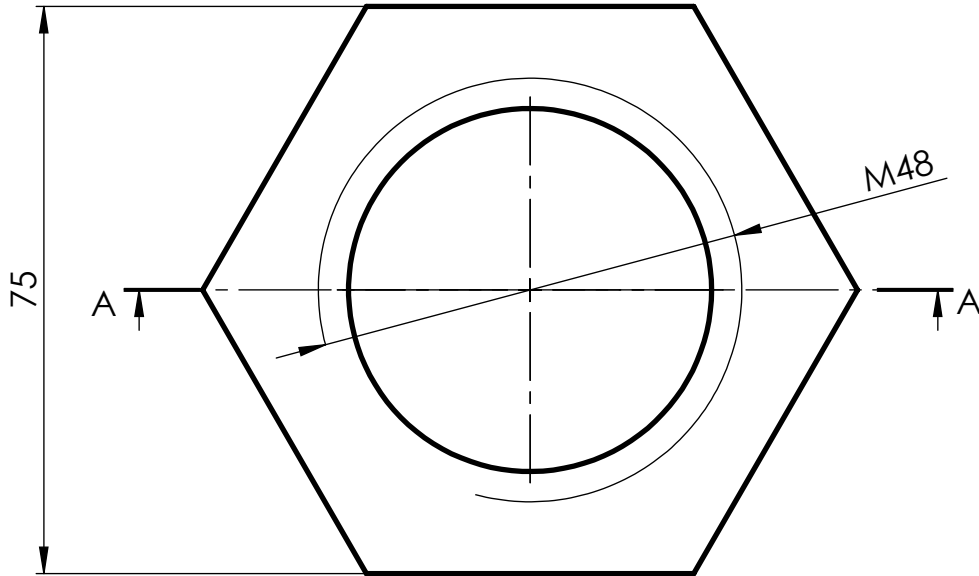
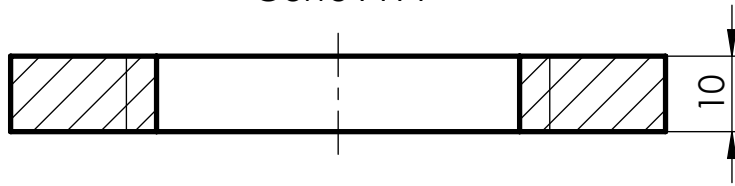
Chapa com espessura de 1 mm

	ESCALA: 1:1	NOME CMC	DATA 27-09-2023	 ISEL	DEPARTAMENTO DE DE ENGENHARIA MECÂNICA		
		DESENHOU VERIFICOU APROVOU					
MATERIAL: Latão		NOTAS: CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590		DESENHO N.º A4 14	FOLHA: 1	MASSA [g]: 11.68	REVISÃO:
TOLERÂNCIA GERAL:		ACABAMENTOS:					



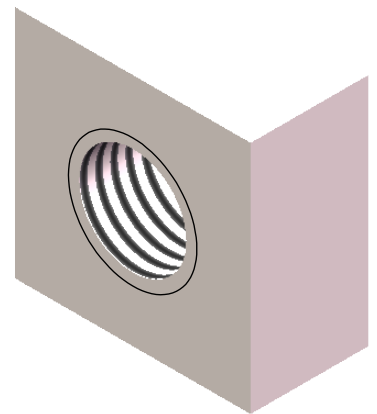
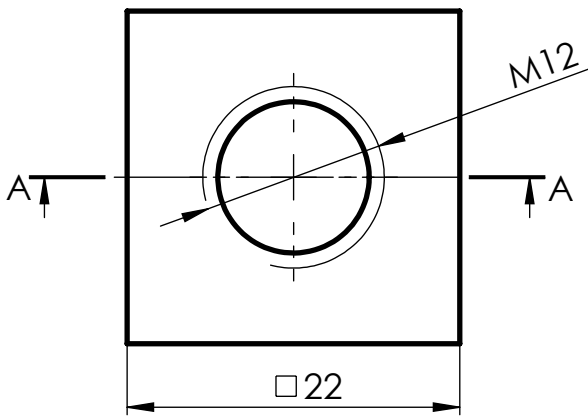
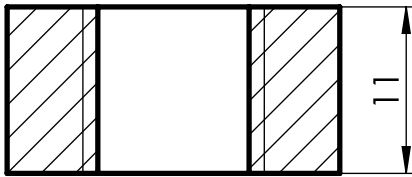
	ESCALA: 1:1	NOME DESENHOU CMC	DATA 27-09-2023	 ISEL	DEPARTAMENTO DE DE ENGENHARIA MECÂNICA		
		VERIFICOU	APROVOU				
MATERIAL: Aço Liga		NOTAS: CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590		DESENHO N.º A4 15	FOLHA: 1	MASSA [g]: 96.94	REVISÃO:
TOLERÂNCIA GERAL:							
ACABAMENTOS:							

Corte A-A



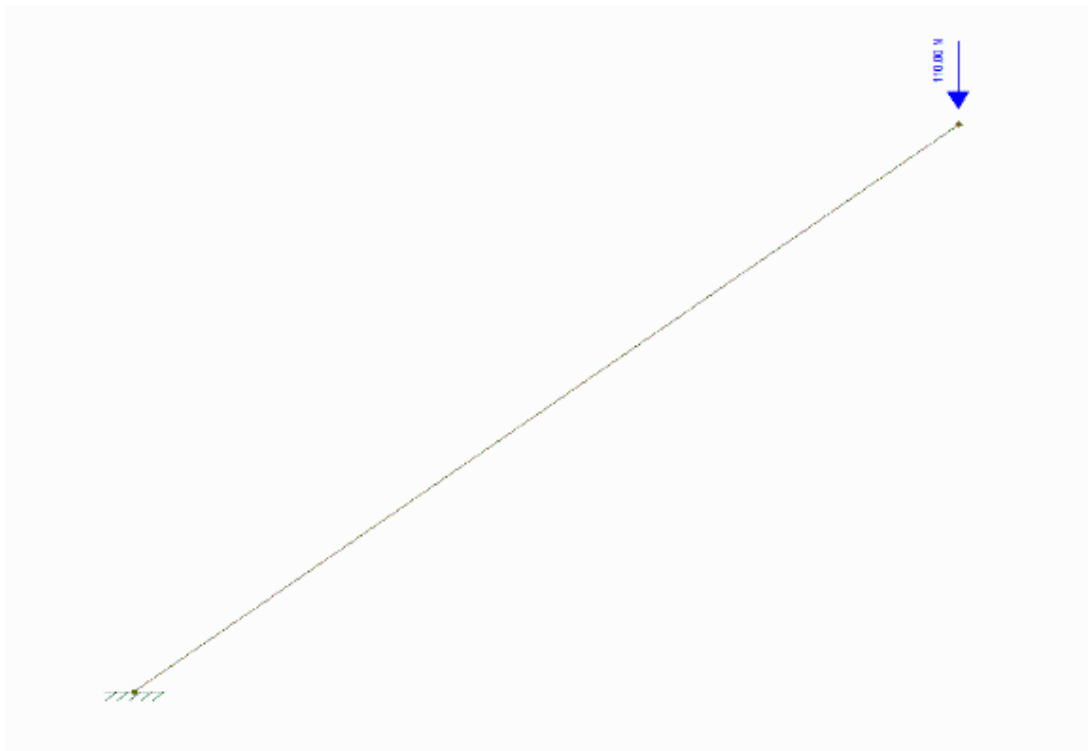
	ESCALA: 1:1	DESENHOU	NOME	DATA		DEPARTAMENTO DE DE ENGENHARIA MECÂNICA				
		VERIFICOU	CMC	27-09-2023		TÍTULO: PORCA HEXAGONAL	DESENHO N.º	FOLHA:	MASSA [g]:	REVISÃO:
		APROVOU					A4	16	1	235.76
MATERIAL: Aço Liga	NOTAS: CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590									
TOLERÂNCIA GERAL:										
ACABAMENTOS:										

Corte A-A



	ESCALA:	NOME	DATA		DEPARTAMENTO DE DE ENGENHARIA MECÂNICA			
	1:1	DESENHOU	CMC					
MATERIAL:	Aço Liga	VERIFICOU		TÍTULO:	PORCA QUADRADA			
TOLERÂNCIA GERAL:		APROVOU						
ACABAMENTOS:		NOTAS:						
		CARLOS MIGUEL COELHO NÚMERO: 33590		A4 17	1	34.34		

Anexo III – Cálculo Analítico de Validação do Modelo



> restart;

> # Dados:
 $E := 210e9; \# Pa$
 $AB := 3.7; \# m$
 $\# FBy := 82.69; \# N$
 $\# FBx := 72.54; \# N$

$$E := 2.10 \cdot 10^{11}$$

$$AB := 3.7$$

> # Dados da secção anelar:

$$I_x := \text{simplify} \left(\frac{\text{Pi} \cdot 0.027^4}{64} - \frac{\text{Pi} \cdot 0.023^4}{64} \right); \# m^4$$

$$A := \text{simplify} \left(\frac{\text{Pi} \cdot 0.027^2}{4} - \frac{\text{Pi} \cdot 0.023^2}{4} \right); \# m^2$$

$$I_x := 1.235038612 \cdot 10^{-8}$$

$$A := 0.0001570796327$$

> # Equações da Estática:

$SF_x := Ax - FB_x = 0$; # (Positivo para a direita)
 $SF_y := Ay - FB_y = 0$; # (Positivo para cima)
 $SMA := -MA + MB + FB_y \cdot AB = 0$; # (Sentido positivo horário)
 $solve(\{SF_x, SF_y, SMA\}, \{Ax, Ay, MA\})$;
 $assign(\%)$:

$$SF_x := Ax - FB_x = 0$$

$$SF_y := Ay - FB_y = 0$$

$$SMA := 3.7 FB_y - MA + MB = 0$$

$$\{Ax = FB_x, Ay = FB_y, MA = 3.700000000 FB_y + MB\}$$

> # Esforço axial, esforço transversal e momento fletor em cada membro:

> # Membro AB(x1) :

$N_{AB} := -Ax$;
 $V_{AB} := Ay$;
 $M_{AB} := -MA + V_{AB} \cdot x1$;

$$N_{AB} := -FB_x$$

$$V_{AB} := FB_y$$

$$M_{AB} := FB_y x1 - 3.700000000 FB_y - MB$$

> # Energia Estática:

$U := simplify\left(\frac{1}{2 \cdot E \cdot I_x} \cdot (int(expand(M_{AB}^2), x1 = 0 .. AB))\right)$
 $+ \frac{1}{2 \cdot E \cdot A} \cdot (int(expand(N_{AB}^2), x1 = 0 .. AB))$;

$$U := 0.003255023224 FB_y^2 + 0.002639208020 FB_y MB$$
$$+ 0.0007132994650 MB^2 + 5.608317040 \cdot 10^{-8} FB_x^2$$

> # Todas as reações em função de FBx e FBy:

$Ax := Ax$; # N
 $Ay := Ay$; # N
 $MA := MA$; # N·m

$$Ax := FB_x$$

$$Ay := FB_y$$

$$MA := 3.700000000 FB_y + MB$$

> #Deslocamento vertical, horizontal e rotação em B em função de FBx e FBy:

$y_B := \text{diff}(U, FBy);$
 $x_B := \text{diff}(U, FBx);$
 $\theta_B := \text{diff}(U, MB);$

$$y_B := 0.006510046448 FBy + 0.002639208020 MB$$

$$x_B := 1.121663408 \cdot 10^{-7} FBx$$

$$\theta_B := 0.002639208020 FBy + 0.001426598930 MB$$

> #Deformada máxima, em função de Bx, By, MB, FBx e FBy:

$y_{max} := \text{diff}(U, FBy);$
 $x_{max} := \text{diff}(U, FBx);$

$$y_{max} := 0.006510046448 FBy + 0.002639208020 MB$$

$$x_{max} := 1.121663408 \cdot 10^{-7} FBx$$

> #Valor das forças:

$FBy := 82.69; \# N$
 $FBx := 72.54; \# N$
 $MB := 0; \# N \cdot m$

$$FBy := 82.69$$

$$FBx := 72.54$$

$$MB := 0$$

> #Reações e esforços:

$Ax := Ax; \# N$
 $Ay := Ay; \# N$
 $MA := MA; \# N \cdot m$

$$Ax := 72.54$$

$$Ay := 82.69$$

$$MA := 305.9530000$$

> #Cálculo da deformada máxima:

$y_{max} := y_{max}; \# m$
 $x_{max} := x_{max}; \# m$

$$y_{max} := 0.5383157408$$

$$x_{max} := 0.000008136546362$$

>

*#Deslocamento vertical, horizontal e rotação em B
e C*

$y_B := y_B; \# m$
 $x_B := x_B; \# m$
 $\theta_B := \theta_B; \# rad$

$y_B := 0.5383157408$

$x_B := 0.000008136546362$

$\theta_B := 0.2182361112$