Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Débora Cláudia Simões Pereira

Desenvolvimento de um protótipo para aplicação em doentes com amputação da perna

Tese de mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Biomédica

Ramo de Biomateriais, Reabilitação e Biomecânica

Trabalho realizado sob orientação de:

Professor Marques Pinho

Demétrio Ferreira Matos

Novembro 2014

AGRADECIMENTOS

Apesar de se tratar de um projeto essencialmente individual, a realização desta dissertação não seria possível sem o contributo de várias pessoas, às quais não posso deixar de agradecer.

Em primeiro lugar, agradeço aos professores António Marques Pinho, e Demétrio Ferreira Matos, por toda a disponibilidade, aconselhamento e apoio prestados, cruciais durante a realização do presente projeto.

Expresso também a minha gratidão aos técnicos do Laboratório e Oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica e Eletrónica Industrial da Universidade do Minho, nomeadamente ao Fernando Araújo, ao Vítor Neto e ao Joel Almeida por todas as ajudas e trabalhos auxiliares desenvolvidos em prol deste projeto.

O bom término desta dissertação não seria possível sem o companheirismo e ajuda dos que me são mais próximos, pai, mãe, irmão, avó, amigos e namorado, por todo o tempo de trabalho e lazer que passamos juntos.

TÍTULO

Desenvolvimento de um protótipo para aplicação em doentes com amputação da perna.

RESUMO

A presente dissertação de mestrado é parte integrante de um projeto de investigação em Design, realizado no âmbito do curso de doutoramento de Demétrio Matos. Este projeto consiste no desenvolvimento de um dispositivo que facilite a remoção de uma prótese endosquelética da perna. Os custos associados à aquisição de mais do que uma prótese e a dificuldade no processo de substituição fazem com o desenvolvimento deste tipo de dispositivos tenha especial importância.

Ao invés de criar um dispositivo de raiz optou-se por melhorar o desempenho de um protótipo já desenvolvido. Este era constituído por um mecanismo de engate/desengate, que não sofreu qualquer alteração neste projeto, e um mecanismo de ativação, que foi substituído por uma bobina.

O projeto consistiu então, na conceção de uma bobina que criasse uma força magnética suficiente para ativar o mecanismo de engate/desengate. Posteriormente, analisou-se qual seria a melhor fonte de alimentação a utilizar. Foram também projetados alguns componentes que suportariam a bobina e fariam a ligação entre o encaixe e o componente de fixação. Por fim, foi feito o dimensionamento desses componentes de forma a cumprirem os requisitos da norma internacional ISO 10328:2206

TITLE

Development of a prototype for use in patients with leg amputation.

ABSTRACT

This dissertation is part of a Design research project, carried out under the doctoral course of Demétrio Matos. This research consists in developing a device to facilitate the replacement of a endoskeletal prosthetic leg. The costs associated with the acquisition of more than a prosthesis and the difficulty in the replacement process are relevant to develop of this type of devices.

Instead of creating a device from scratch, it was decided to improve the performance of a prototype already developed. This consisted of a mechanism for engagement / disengagement, which has not changed in this project, and a mechanism for activation that was replaced by a coil.

The project involved the design of a coil that creates a magnetic force to activate the mechanism for engagement / disengagement. Subsequently analyzed what would be the best power source to use. Then some components have been designed to bear the coil and to do the connection between the socket and the prototype. Finally, it was done the sizing of these components in order to satisfy the requirements of international standard ISO 10328: 2206

ÍNDICE

Agradecimentos ……..... ii

Resumo ……iii

Abstract ……....iv

Índice ……....v

Lista de Figuras ……...……...…vii

Lista de Tabelas ……...…...….x

Notação ……..…….xi

Capítulo 1 – Introdução ……....1

1.1. Enquadramento ……..…….…..……1

1.2. Objetivo ……..……...……2

1.3. Metodologia ……..……...……..3

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica ……..4

2.1. Dispositivos protésicos …….……4

2.2. Próteses vs Nível de impacto ……7

2.3. Sistemas de ligação/remoção rápida ……9

Capítulo 3 – Eletromagnetismo …….…….16

3.1. Conceitos Básicos ……16

3.2. Equações de Maxwell ……..18

3.3. Campo magnético (bobina) ……..20

3.4. Eletroímanes ……21

3.5. Força magnética (solenoide) ……23

Capítulo 4 – Projeto ……...….27

4.1. Produção dos adaptadores …….……...27

4.2. Determinação da força de desengate …….....28

4.3. Desenvolvimento da bobina …….……28

4.4. Alimentação da bobina …….…...42

4.5. Verificação do funcionamento da bobina …….……...44

4.6. Componentes finais …….…….45

4.7. Discussão ……48

Capítulo 5 – Dimensionamento …….……....49

5.1. Materiais ……..49

5.2. Dimensionamento Analítico ……50

5.3. Análise pelo método dos Elementos Finitos ……..……. 54

5.4. Discussão ……..58

Capítulo 6 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros ……...……...59

Capítulo 7 – Referências Bibliográficas ……61

Anexos ……....64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Causas de amputação a nível mundial.[2] 1

Figura 2 - Níveis de amputação e respetivas percentagens. (4)..... 4

Figura 3 - Componentes de uma prótese de membro inferior. Cortesia de Demétrio Matos 5

Figura 4 – a) Diferentes tipos de liners b) joelho protético Total Knee®. [6] 5

Figura 5 -Adaptadores a) standard b) de 4 furos com rosca c) duplos d) de encaixe rígido; e) Fixações tubulares. [6] 6

Figura 6 - Componentes de uma prótese transfemoral.[7] 7

Figura 7 - Modelo do pêndulo invertido (marcha) e modelo mola-massa (corrida). [9] ... 7

Figura 8 - Representação de duas próteses transtibiais para diferentes níveis de atividade física..... 8

Figura 9 - Representação do encaixe, do adaptador e do tubo protésico..... 9

Figura 10 - Representação do bloqueio do mecanismo. 10

Figura 11 - Vista em corte transversal do mecanismo de libertação rápida: a) mecanismo bloqueado b) mecanismo desbloqueado. 10

Figura 12 - a) incorporação de Ferrier Couplers numa prótese, b) vista lateral do dispositivo de acoplamento c) componentes do dispositivo de acoplamento. 11

Figura 13 - Representação dos diferentes modelos desenvolvidos pela Ferrier Coupler Inc. 12

Figura 14 - Vista explodida dos componentes do mecanismo de libertação rápida. 13

Figura 15 - Vista em corte transversal da porção superior com: o a) mecanismo bloqueado e b) desbloqueado. 14

Figura 16 - Modelo virtual do mecanismo de ativação: a) Vista de cima b) Vista em corte. [9] 15

Figura 17 - Configuração do dipolo, com e sem campo magnético, em materiais a) diamagnéticos e b) paramagnéticos. 17

Figura 18 - Alinhamento dos dipolos em materiais ferromagnéticos. 18

Figura 19 - Representação das linhas de campo numa bobina. 20

Figura 20 - Representação das linhas de campo numa bobina com núcleo de ar e com núcleo de ferro. 21

Figura 21 – Eletroímanes. 22

Figura 22 – Representação esquemática de um solenoide linear com função a)“push” e b)“pull” 23

Figura 23 - Representação de uma bobina multicamada. 26

Figura 24 - Representação dos adaptadores concebidos e da sua localização no sistema protésico 27

Figura 25 - Gráfico força - deslocamento obtido através do software Instron Bluehill . 28

Figura 26 - Gráfico força - deslocamento para solenoides existentes no mercado: a) MCSMO-0630S06STD b) BLP-67-120-610-620 [21][22] 29

Figura 27 – Representação do movimento do colar por intermédio de uma alavanca e um solenoide. 30

Figura 28 - Mecanismo multiplicador de força/deslocamento - Alavanca. 30

Figura 29 - Desenho técnico do tubo Nylon e do pino produzidos. 31

Figura 30 - Representação das linhas de campo de uma bobina. 32

Figura 31 - Bobina fabricada. 32

Figura 32 - Segunda bobina produzida. 38

Figura 33 - Modelo virtual 3D do núcleo quadrado da bobina. 38

Figura 34 - Núcleo para enrolamento do fio. 39

Figura 35 - Bobina concebida com menor comprimento. 41

Figura 36 - Ligação em série de três pilhas de Lítio. 43

Figura 37 - Interruptores pulsadores. 43

Figura 38 - Esquema da ligação entre as pilhas, a bobina e os interruptores. 44

Figura 39 - Representação do ensaio realizado para verificar a relação força-deslocamento da bobina fabricada..... 44

Figura 40 - Gráfico força-deslocamento..... 45

Figura 41 - Modelo virtual 3D do componente de fixação superior adaptado. 46

Figura 42 - Modelo virtual 3D do adaptador com um raio interno não uniforme. 46

Figura 43 - Modelo virtual 3D do adaptador com raio interno uniforme..... 47

Figura 44 - Montagem final do sistema protésico. 47

Figura 45 - Representação de uma montagem protésica sujeita a uma carga FT. 50

Figura 46 - Representação das forças aplicadas na peça e dos diagramas de esforços. . 51

Figura 47 - Gráfico tensão - raio externo. 53

Figura 48 - Representação das forças aplicadas para análise de elementos finitos. 55

Figura 49 – Análise de elementos finitos para um raio externo de 22mm: a) Distribuição das tensões equivalentes b) Distribuição das deformações. 55

Figura 50 - Análise de elementos finitos para um raio externo de 23mm: a) Distribuição das tensões equivalentes b) Distribuição das deformações. 56

Figura 51 - Representação das variáveis para o cálculo da tensão de contacto..... 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Permeabilidade magnética de diferentes materiais 18

Tabela 2 - Valores de resistência do fio de cobre de acordo com o seu diâmetro..... 25

Tabela 3 - Variáveis que influenciam o valor da força magnética 33

Tabela 4 – Valores obtidos para uma bobina com 50mm de comprimento 35

Tabela 5 – Valores obtidos para o solenoide MCSMO-0630S06STD com núcleo uniforme..... 36

Tabela 6 – Valores obtidos para a bobina com 25mm de comprimento 37

Tabela 7 - Composição química do aço 304..... 49

Tabela 8 - Propriedade do aço 304 e 316 49

Tabela 9 - Forças utilizadas nos ensaios estáticos para o nível P5..... 50

Tabela 10 - Tensões obtidas no componente com diâmetro externo de 23mm..... 53

Tabela 11- Tensões de Von Mises obtidas na zona crítica..... 56

NOTAÇÃO

g	"Air gap"
ε_0	……
A	Área
E	Campo elétrico
B	Campo magnético
Q	Carga elétrica
l	Comprimento
I	Corrente elétrica
n	Densidade de espiras
x	Deslocamento
D	Diâmetro
U_B	Energia armazenada
ϕ	Fluxo magnético
F	Força
L	Indutância magnética
C	Número de camadas
N	Número de espiras
N_C	Número de espiras por camada
p	Perímetro
μ	Permeabilidade magnética
μ_0	Permeabilidade magnética no vazio
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
P	Potência
r	Raio
$\Re$	Relutância magnética
R	Resistência

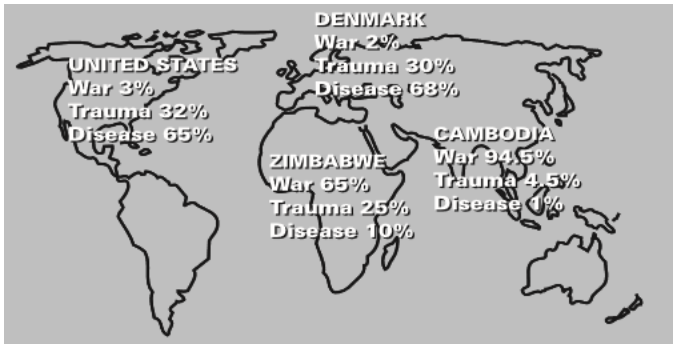
t	Tempo
V	Voltagem

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Amputação é uma palavra que derivada do latim em que *ambi* significa "ao redor de" e *putatio* "retirar", definindo-se assim como remoção parcial ou total de um membro do corpo. Apesar de estar muitas vezes associada à mutilação e incapacidade, esta deve ser encarada como um tratamento, uma vez que liberta o paciente de um membro do seu corpo que só lhe traz sofrimento, não apresentando qualquer utilidade. Desta forma a amputação fornece uma melhor qualidade de vida e por isso deve ser vista como uma restauração em vez de uma mutilação. [1]

As três principais causas de amputação são doenças, traumatismos e deformidades congênitas, contudo as suas percentagens variam consoante a região, como comprova a figura 1. [2]



Country	War Related Trauma	Other Trauma	Disease
Cambodia	94.5%	4.5%	1%
Zimbabwe	65%	25%	10%
United States	3%	32%	65%
Denmark	2%	30%	68%

Figura 1 - Causas de amputação a nível mundial.[2]

Em países desenvolvidos, o trauma geralmente ocorre como resultado de acidentes de trabalho e viação. Os países menos desenvolvidos apresentam um maior número de amputações devido a uma maior taxa de guerra e sistemas médicos menos

desenvolvidos.[3] Em muitos desses países, as minas terrestres tornaram-se um grande problema matando ou incapacitando mais de 150 pessoas a cada semana. [2]

Patologias vasculares como Doença Vascular Periférica (DVP), Diabetes Mellitus (DM) ou Insuficiência Venosa (IVC) limitam o fluxo de sangue para os membros inferiores causando úlceras e infeções que podem levar à amputação. Nos países industrializados, como os Estados Unidos e a Dinamarca, 65% das amputações provêm destas doenças. [3]

A má formação congénita é responsável por uma pequena parte das amputações (3%). Nestes casos, uma criança pode nascer com o membro incompleto ou mal formado e consoante a gravidade da situação o membro pode ser encurtado ou removido. [2]

A relação entre a idade dos amputados e o número de amputações é difícil de obter, mas vários estudos foram feitos nesse âmbito e, no geral, observou-se que as amputações causadas por doença ocorrem mais em pessoas idosas enquanto que as amputações relacionadas com trauma ocorrem mais nos jovens e nas pessoas ativas.

Muitos indivíduos possuem mais que um tipo de prótese devido aos diferentes níveis de atividade a que estão sujeitos e como tal era importante que o sistema de substituição fosse fácil e rápido. Seria também vantajoso que os encaixes fossem universais, ou seja, que se adaptassem a qualquer prótese. Desta forma o indivíduo não teria que comprar um encaixe para cada tipo de prótese, reduzindo assim os custos.

1.2. OBJETIVO

O objetivo da presente dissertação é contribuir no desenvolvimento de um sistema eletrónico de ligação/remoção rápida entre o encaixe e a restante estrutura da prótese. Este sistema deverá facilitar a substituição de dispositivos prótesicos por parte dos indivíduos, eliminando componentes soltos e movimentos difíceis para o individuo. Outro objetivo é que este seja universal, ou seja, que se possa adaptar a qualquer montagem protésica. Isto será economicamente vantajoso para o indivíduo uma vez que não necessitará ter um encaixe para cada prótese. Quanto à ativação do mecanismo, esta deve ser feita na presença de vestuário, deve ocupar o mínimo de espaço possível e deve ser uma ativação segura, ou seja, feita apenas quando o individuo pretende. Por estas razões

se optou por um sistema eletrónico. Houve também uma especial atenção no espaço ocupado por todo o sistema bem como nos custos que este acarreta.

1.3. METODOLOGIA

A primeira fase deste projeto foi fazer um levantamento do estado da arte dos componentes existentes numa prótese do membro inferior bem como dos sistemas de ligação entre o coto e o dispositivo protésico. De seguida foi necessário explorar alguns conceitos de eletromagnetismo de forma a compreender melhor o funcionamento dos eletroímanes.

Na fase de projeto foram desenvolvidas várias bobinas até se conseguir atingir os requisitos estabelecidos. Posteriormente foram analisadas diferentes formas de alimentar essa bobina e o conjunto foi testado experimentalmente. Elaborou-se também o projeto da montagem final com todos os componentes de fixação e adaptadores da prótese.

Finalmente foi feito um dimensionamento analítico para testar a segurança dos componentes. Este foi ainda comparado com uma análise de elementos finitos no software Solidworks.

CAPÍTULO 2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DISPOSITIVOS PROTÉSICOS

No membro inferior podem ocorrer vários tipos de amputação: transtibiais (abaixo do joelho), transfemurais (acima do joelho), desarticulação da anca, do joelho e do tornozelo, sendo os dois primeiros mais frequentes. [4]

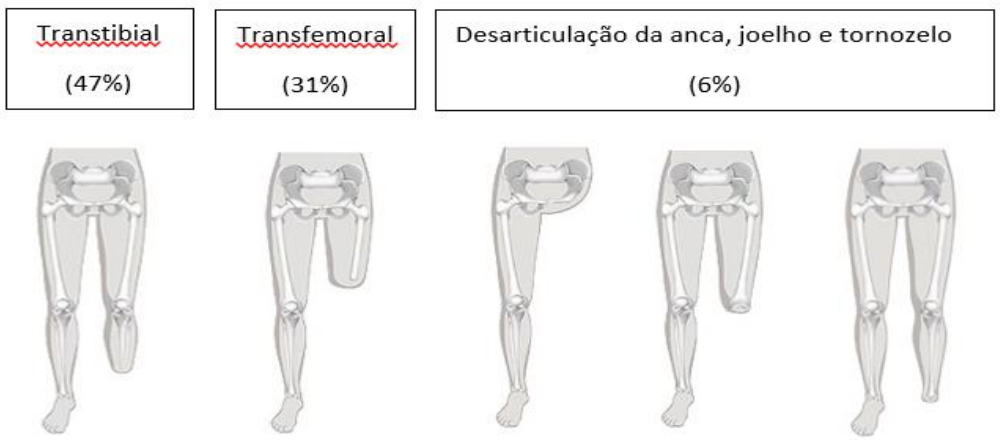


Figura 2 - Níveis de amputação e respetivas percentagens. (4)

Quanto mais distal for a amputação, menor será o gasto energético do paciente, melhor será a sua adaptação à próteses e os custos não serão tão elevados. [2] Em comparação com o padrão de marcha normal, andar com uma prótese transtibial requer um gasto de energia adicional de 25-40% enquanto que uma prótese transfemoral necessita de um gasto de 65-100%. Este é um dos fatores que limita o uso de próteses por parte de indivíduos com doenças cardíacas e, em alguns casos, a solução passa pelo uso de cadeira de rodas que apenas requer 8% mais de energia. [5]

Os dispositivos protésicos ajudam o indivíduo amputado na recuperação da sua atividade motora e da mesma forma que existem diferentes níveis de amputação também existem diferentes tipos de próteses. Os cincos tipos de dispositivos utilizados no membro inferior são as próteses transtibiais, transfemurais, de desarticulação da anca, do joelho e do tornozelo.[4]

Apesar de existirem diferentes tipos de próteses para o membro inferior todas contêm um encaixe, um corpo e um pé.

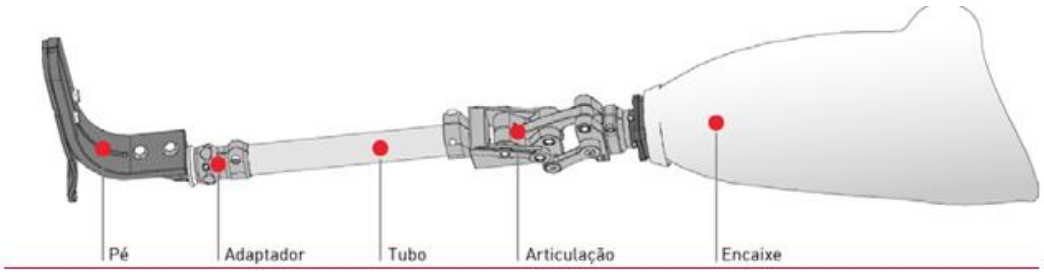


Figura 3 - Componentes de uma prótese de membro inferior. Cortesia de Demétrio Matos

O corpo é constituído por tubos e adaptadores e em alguns casos por joelhos protéticos como por exemplo o *Total Knee*®. O encaixe é produzido num termoplástico através de um molde negativo do coto do indivíduo e a sua interface com o coto é assegurada por liners. Estes liners, geralmente, são produzidos em silicone e têm como objetivo proteger a pele, reduzir os picos de pressão dentro do encaixe e eliminar o movimento entre o encaixe e o coto. Também são utilizados para a suspensão da prótese de maneira muito efetiva oferecendo vários tipos de suspensão para que o paciente encontre algo que se ajuste às suas necessidades.

Figura 4 – a) Diferentes tipos de liners b) joelho protético Total Knee®. [6]

Todos estes componentes devem ser conectados e ajustados na perfeição para que não ocorra nenhum tipo de desalinhamento. Por esta razão existem adaptadores específicos para este tipo de dispositivos que diferem de acordo com a sua funcionalidade.

Figura 5 -Adaptadores a) standard b) de 4 furos com rosca c) duplos d) de encaixe rígido; e) Fixações tubulares. [6]

Geralmente estes adaptadores ocupam zonas entre o encaixe e o tubo protésico, o pé e o tubo, entre outras combinações. Na figura 6 é representada uma prótese transfemoral onde se observar diferentes tipos de adaptadores em zonas distintas.

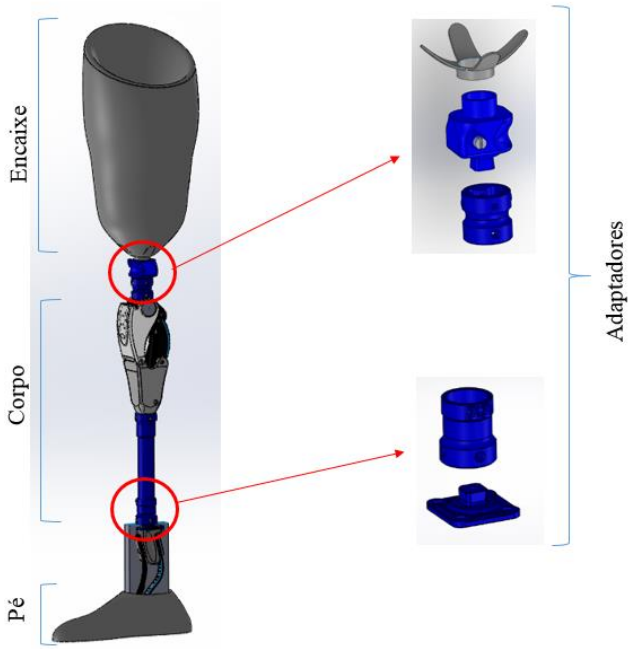


Figura 6 - Componentes de uma prótese transfemoral.[7]

2.2. PRÓTESE VS NÍVEL DE IMPACTO

Diversos fatores são considerados na montagem de uma prótese tais como: peso do indivíduo, o tamanho do coto, o nível de amputação, o nível de impacto, etc. Existem quatro níveis de impacto sendo o mais baixo correspondente à marcha e o mais elevado correspondente a corridas de impacto elevado. [8] A corrida requer uma maior amplitude de movimento das articulações, maior contração muscular, menos apoio do pé e maior força de reação. Desta forma o modelo mecânico para descrever a corrida é o sistema massa-mola enquanto que a marcha é modelada por um sistema de pêndulo invertido.

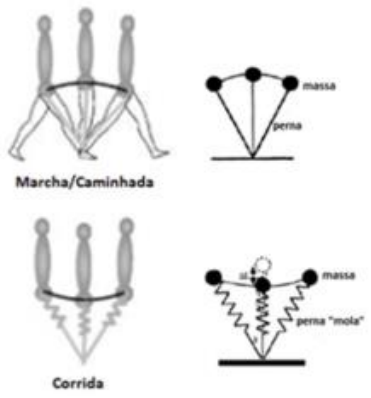


Figura 7 - Modelo do pêndulo invertido (marcha) e modelo mola-massa (corrida). [9]

O modelo massa-mola descreve a perna como um corpo deformável que sofre uma compressão máxima na fase média de apoio, onde o centro de massa atinge o seu ponto mínimo. Na marcha, a perna é considerada um corpo rígido cujo centro de massa alcança o seu ponto máximo na fase média de apoio.[9] São estas diferenças no padrão motor que fazem com que cada prótese de associe a um único nível de impacto. No caso de o indivíduo ter diferentes níveis de impacto no seu dia-a-dia então irá necessitar de mais de que uma prótese. Veja-se o caso mediático de Oscar Pistorius que utiliza uma prótese para correr e outra para caminhar.

Figura 8 - Representação de duas próteses transtibiais para diferentes níveis de atividade física.

Na figura 8 observa-se Pistorius a substituir a prótese, retirando o encaixe do coto. Tal como ele muitos indivíduos realizam esta troca diariamente e como tal são necessários novos sistemas que facilitem esta substituição. Surgiram então os mecanismos de libertação rápida.

2.3. SISTEMAS DE LIGAÇÃO/REMOÇÃO RÁPIDA

- **Patente US 6972042 B2**

A patente americana US 6972042 B2 apresenta um mecanismo de engate/desengate rápido **40** entre o encaixe **20** e o tubo protésico **50**. Este é constituído por três partes, uma tubular **320**, uma de encaixe anelar **330** e outra de aperto **340**.

A porção tubular **320** possui um diâmetro interno **210** ligeiramente superior ao diâmetro externo **220** do tubo protésico **50**. A porção de encaixe anelar **330** liga-se ao encaixe da prótese **20**, e a porção de aperto **340** bloqueia a porção tubular **320** à volta do tubo **50**.

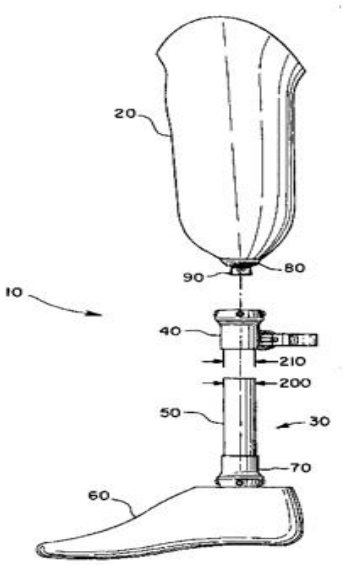


Figura 9 - Representação do encaixe, do adaptador e do tubo protésico.

A porção de aperto **340** possui um manípulo **300** que roda em torno de um pino **310**, e duas abas opostas **350A 350B**. Esta também contém um parafuso **530** com cabeça anelar **540** e outra extremidade roscada para se fixar na porca **370**. Ao ajustar esta porca roscada **370** ajusta-se também a ligação entre o sistema de libertação rápida **40** e o tubo protésico **50**.

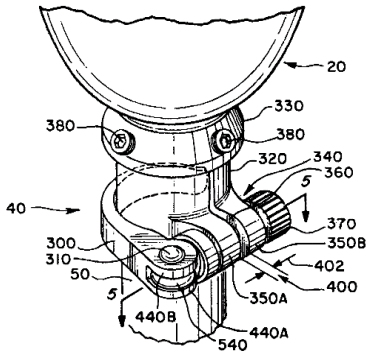


Figura 10 - Representação do bloqueio do mecanismo.

A porção de encaixe anelar **330** tem quatro parafusos de fixação **380** para se conectar ao adaptador macho em pirâmide **90**.

A figura 11a representa o engate rápido, onde a superfície excêntrica **620** do manípulo **300** contacta com o elemento de apoio **600** movendo assim as abas no sentido de diminuir a distância entre elas **400**.

Para que ocorra o desengate entre o sistema de libertação rápida **40** e o tubo protésico **50** basta mover o manípulo **300** na direção da seta 404, o que fará aumentar a distância entre as abas **410**, como está representado na figura 11b. [10]

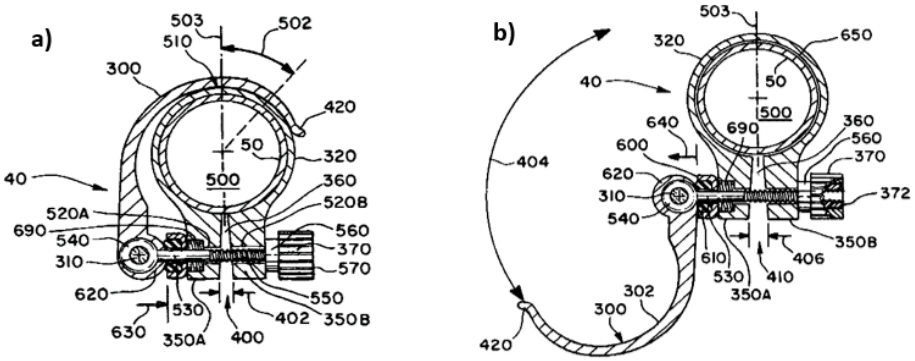


Figura 11 - Vista em corte transversal do mecanismo de libertação rápida: a) mecanismo bloqueado b) mecanismo desbloqueado.

- **Patente US 5326352 A**

A patente americana US 5326352 A apresenta um mecanismo tanto de auto alinhamento como de acoplamento rápido. Este é composto por um anel **34** que se encontra fixo no encaixe **17**, uma placa **18** com uma abertura quadrada **22**, e uma placa **12** fixa ao componente protético.

A placa **12** apresenta um conector **14** com um furo **16** em forma de cone truncado.

A placa **18** tem um encaixe **20** com uma abertura interior **22** dimensionada para aceitar o conector **14** da placa **12**.

O anel **34** é usado para fixar a placa **18** ao encaixe **17**. Este anel tem quatro furos **36** igualmente espaçados que correspondem aos quatro furos **38** da placa **18**. Para fixar o conjunto é necessário alinhar os furos **36** com os furos **38** e enroscar os parafusos **42** com as roscas **40**.

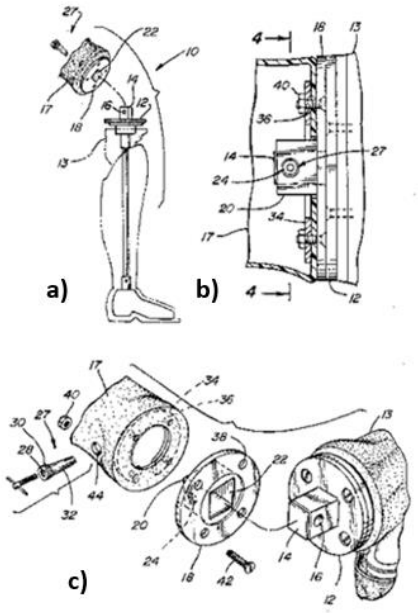


Figura 12 - a) incorporação de Ferrier Couplers numa prótese, b) vista lateral do dispositivo de acoplamento c) componentes do dispositivo de acoplamento.

Para fixar o dispositivo protético ao encaixe é necessário alinhar o furo **16**, **24** e **44** e inserir o pino de Nylon **27** que tem um corpo cónico **32**. [11]

Atualmente já existem diferentes modelos desenvolvidos pela empresa Ferrier Coupler Inc como é apresentado na figura 13. Todos os modelos são formados por um componente macho, um componente fêmea, um pino e uma chave para aperto e desaperto do pino. [12]

Figura 13 - Representação dos diferentes modelos desenvolvidos pela Ferrier Coupler Inc.

Ambos os mecanismos apresentam falhas que os tornam inadequados para fazer a ligação entre o encaixe e os restantes componentes protésicos.

No caso da patente US 6972042 B2 podem ocorrer problemas de alinhamento entre os componentes protésicos devido à aplicação do binário de aperto. Este mecanismo também dificulta o seu acionamento na presença de vestuário.

Relativamente a patentes US 5326352 A, o facto de utilizar um pino roscado de origem polimérica é a principal desvantagem deste sistema. Este pino sofrerá grandes níveis de desgaste durante a sua utilização e pode ser facilmente perdido no momento da sua remoção, uma vez que se encontra separado dos restantes elementos da ligação. Por estas razões o sistema não terá um tempo de vida muito longo o que acarreta também problemas financeiros. [9]

Como forma de colmatar estas falhas foi desenvolvido um mecanismo de engate/desengate rápido baseado nos conetores de mangueiras e na patente EP 1772 422.

- **Patente EP 1772 422**

A patente europeia EP 1772 422 apresenta um mecanismo de libertação rápida, para um dispositivo de nivelamento contudo este sistema é útil para uma melhor compreensão do mecanismo desenvolvido neste projeto.

O sistema é constituído uma porção superior **22**, uma inferior **30** e um anel de bloqueio **62**, que por sua vez é constituído por uma câmara superior **64** e uma inferior **66**, separadas por uma porção anelar **68**.

A porção superior **22** inclui um veio **38** que gira em torno do eixo A, e uma luva interna **42** com um interior cónico. A luva de acionamento **46** está ligada ao veio **38** por uma ligação de rosca para uma rotação conjunta durante a utilização.

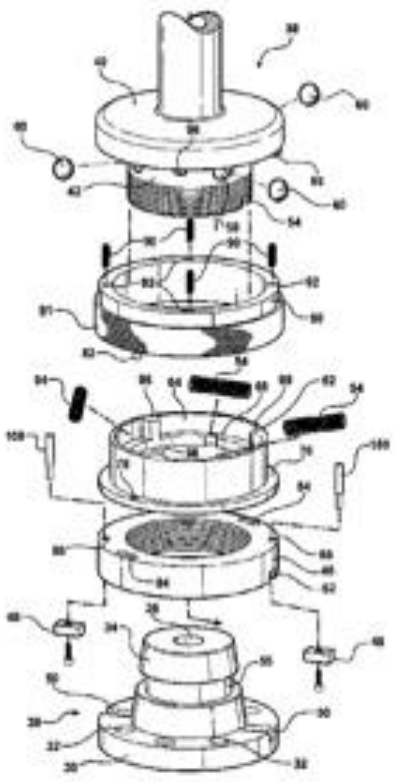


Figura 14 - Vista explodida dos componentes
do mecanismo de libertação rápida.

O mecanismo de travamento bloqueia axialmente o conector **28** no veio **38**. Este mecanismo inclui uma ranhura de bloqueio anelar **56** no corpo cónico **34** e três cavidades **58** na manga interna **42** do veio **38**. Estas cavidades **58** alojam parcialmente as esferas **60**,

tanto no bloqueio como no desbloqueio e são afuniladas para evitar que as esferas **60** as atravessem. Quando o mecanismo está bloqueado as rampas **70** empurram as esferas **60** contra a câmara inferior **66**, e com o objetivo de manter o bloqueio, existem três molas de compressão na câmara superior **64** do anel **62**.

Para que ocorra o desengate é necessário rodar o anel exterior **80**, provocando assim uma rotação no anel de bloqueio **62**. Desta forma as esferas **60** irão deslocar-se ao longo das rampas **70** existentes na câmara inferior **66** até se alojarem nas respetivas cavidades **58**. Permitindo assim a libertação do conetor **28**. [13]

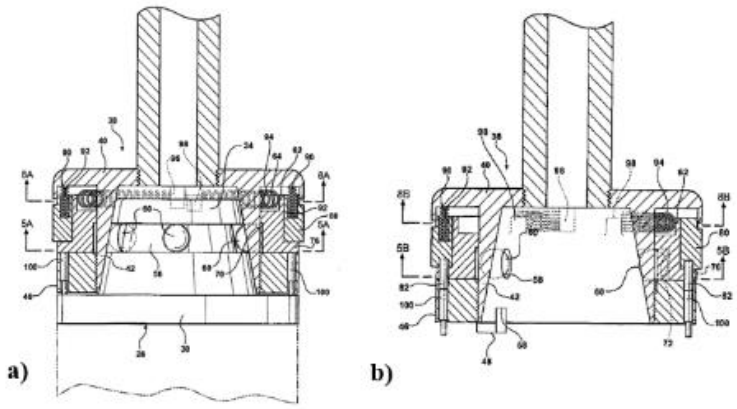


Figura 15 - Vista em corte transversal da porção superior com: o a) mecanismo bloqueado e b) desbloqueado.

- **Mecanismo engate/desengate**

O mecanismo de engate/desengate, desenvolvido no âmbito do curso de mestrado de Cristiana Costa, tem como base os conectores de mangueiras e possui um componente macho, um componente fêmea e um colar. [9] No componente fêmea existem quatro furos, onde serão inseridas três esferas e um parafuso, e um rasgo onde vai encaixar a chaveta do componente macho. Na montagem, o colar agrega-se ao componente fêmea e possui um rasgo lateral com um comprimento de cinco milímetros. Este rasgo, juntamente com o parafuso existente na componente fêmea, irá fazer com que o colar se movimente apenas verticalmente com um deslocamento máximo de cinco milímetros. Este deslocamento é necessário para que as esferas recolham e deem espaço ao componente macho para entrar e encaixar a chaveta no respetivo rasgo. No final do encaixe as esferas voltam à sua

posição inicial e como tal será necessário voltar a mover o colar para que ocorra o desengate.

O mecanismo de ativação é formado por dois botões, um de segurança e um de ativação, uma estrutura superior e outra inferior, duas chapas e molas de compressão, como é representado na figura 16.

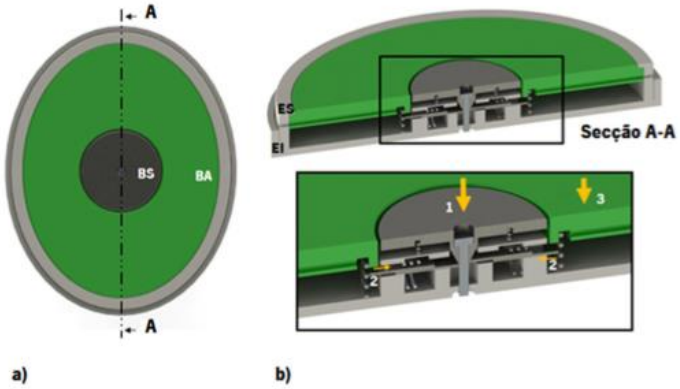


Figura 16 - Modelo virtual do mecanismo de ativação: a) Vista de cima b) Vista em corte. [9]

O objetivo das chapas é impedir o movimento do botão de ativação quando este é acionado antecipadamente. O botão de segurança é o primeiro a ser pressionado para que as chapas recolham e deixem de travar o movimento do botão de ativação.

A ligação entre o mecanismo de ativação e o mecanismo de engate/desengate é feita por um fio de Natureza têxtil (100% poliéster) que, aquando o acionamento do botão de ativação, é tracionado puxando assim o colar no sentido do desengate. Desta forma o mecanismo de ativação tem que se alojar no membro inferior, preferencialmente perto da anca, para facilitar a sua ativação por parte do individuo. [9]

Este foi o sistema escolhido como ponto de partida deste projeto, uma vez que não apresenta problemas de alinhamento e o acionamento pode ser feito na presença de vestuário. Ao tornar este mecanismo eletrónico elimina-se o problema da localização do mecanismo de ativação bem como do espaço que ele ocupa. O objetivo é então gerar uma força no colar através da eletricidade e é nisso que se baseia o eletromagnetismo.

CAPÍTULO 3
ELETROMAGNETISMO

3.1. CONCEITOS BÁSICOS

O conceito de **relutância** ($\Re$) em circuitos magnéticos é idêntico ao conceito de resistência em circuitos elétricos, ou seja, é a capacidade que o circuito tem de se opor à passagem de fluxo magnético. Esta é proporcional ao comprimento do circuito magnético e inversamente proporcional à área de secção transversal e à permeabilidade magnética do meio, como é comprovado na equação 1. [14]

$$\Re = \frac{l}{\mu A} \tag{1}$$

Indutância (L) é a capacidade de uma bobina com N espiras gerar um fluxo Φ com determinada corrente *I*. Como tal, depende principalmente do número de espiras mas também da geometria e do material da bobina como se verifica na equação 2.[14]

$$L = \mathrm{N}\frac{\Phi}{I} = N\frac{NI/\Re}{I} = \frac{N^2}{\Re} = N^2\frac{\mu A}{l} \tag{2}$$

A **permeabilidade magnética** (μ) expressa a relação entre a indução magnética e a força do campo magnético. Esta indica a facilidade com que se induz linhas de fluxo magnético num determinado material, ou seja, quanto maior for a permeabilidade magnética do material maior será o campo magnético produzido. Geralmente os valores tabelados indicam a permeabilidade relativa (μ_r) do material e como tal é necessário dividir esse valor pela permeabilidade magnética do vazio (μ_0) para se obter a permeabilidade magnética do material. [15]

A classificação dos materiais (diamagnético, paramagnético e ferromagnético) é feita de acordo com o valor da permeabilidade relativa.

O **diamagnetismo** é uma forma muito fraca de magnetismo que ocorre apenas quando um campo externo é aplicado. Este provoca um movimento orbital dos momentos magnéticos dipolares no sentido oposto e portanto o campo resultante será inferior. Desta forma os materiais diamagnéticos apresentam uma μ_r inferior à unidade.

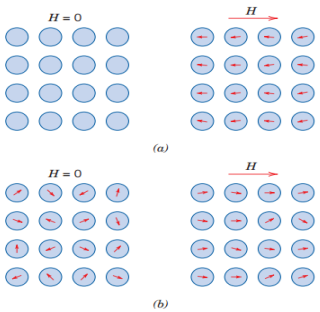


Figura 17 - Configuração do dipolo, com e sem campo magnético, em materiais a) diamagnéticos e b) paramagnéticos.

O **paramagnetismo** caracteriza-se por uma μ_r ligeiramente superior à unidade. Neste tipo de materiais os dipolos magnéticos encontram-se orientados aleatoriamente e não interagem muito com os dipolos adjacentes. Quando aplicado um campo magnético os dipolos alinham-se parcialmente no mesmo sentido do campo, fazendo assim com que o campo aumente ligeiramente.

Tanto os materiais diamagnéticos como os paramagnéticos são considerados materiais não magnéticos uma vez que necessitam de um campo externo para que ocorra magnetização.

O **ferromagnetismo** surge da forte interação entre dipolos vizinhos e caracteriza-se por uma μ_r bastante superior à unidade. Esta interação leva a um alto grau de alinhamento dos dipolos no sentido do campo magnético externo mesmo quando este é fraco. Em alguns casos o alinhamento pode persistir mesmo quando o campo externo é removido. [16]

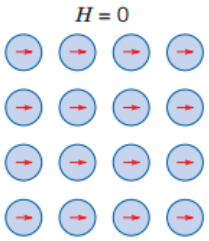


Figura 18 - Alinhamento dos dipolos em materiais ferromagnéticos.

Tabela 1 - Permeabilidade magnética de diferentes materiais

Substância	Classificação	μ_r
Bismuto	Diamagnético	0,999830
Ouro	Diamagnético	0,999964
Mercúrio	Diamagnético	0,999968
Prata	Diamagnético	0,999980
Chumbo	Diamagnético	0,999983
Zinco	Diamagnético	0,999986
Cobre	Diamagnético	0,999991
Água	Diamagnético	0,999991
Vácuo (por definição)	Não-magnético	1
Ar	Paramagnético	1,0000004
Sódio	Paramagnético	1,0000062
Alumínio	Paramagnético	1,000022
Lítio	Paramagnético	1,000044
Neodímio	Paramagnético	1,00034
Vanádio	Paramagnético	1,00038
Paládio	Paramagnético	1,00079
Oxigênio líquido	Paramagnético	1,004
Fe_3O_4	Ferromagnético	100
Cobalto	Ferromagnético	250
Níquel	Ferromagnético	600
Aço	Ferromagnético	2000
Ferro fundido	Ferromagnético	5000
Ferro sílico	Ferromagnético	7000
Ferro puro	Ferromagnético	200.000

3.2. EQUAÇÕES DE MAXWELL

A base teórica do eletromagnetismo é um conjunto de quatro equações denominadas de equações de Maxwell. Estas descrevem como os campos elétricos e magnéticos se relacionam e como variam em função do tempo e da posição no espaço.

A lei de Gauss confirma que toda a partícula carregada cria um campo elétrico. A equação 3 estabelece uma relação entre o fluxo de campo elétrico que passa através de uma superfície fechada com a carga elétrica que existe dentro do volume limitado por esta superfície.

$$\oint E \cdot dA = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \tag{3}$$

A lei de Gauss para o magnetismo afirma que não existem monopolos magnéticos, mas sim dipolos. Um dipolo magnético pode ser visto como um pequeno íman composto por um polo norte e um polo sul.

$$\oint B \cdot dA = 0 \tag{4}$$

A lei de Faraday enuncia que os campos elétricos também podem ser criados por variações de campos magnéticos. A intensidade da força eletromotriz induzida (ε) é igual a variação do fluxo magnético no interior da espira.

$$\oint E \cdot ds = -\frac{d\Phi_m}{dt} \tag{5}$$

A lei de Ampère comprovou que correntes elétricas criam campos magnéticos, ou seja, que a circulação de B ao longo de uma curva C é proporcional à intensidade de corrente I que atravessa a curva.

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \cdot I \tag{6}$$

Maxwell acrescentou que, além das correntes elétricas, os campos elétricos variáveis no tempo também geram campos magnéticos. Assim surgiu a equação 7. [17]

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 \cdot I + \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt} \tag{7}$$

3.3. CAMPO MAGNÉTICO (BOBINA)

Uma bobina é composta por espiras de fio de cobre enroladas em torno de um material. O fio de cobre é coberto por uma camada de verniz de forma a isolar eletricamente as espiras. Ao aplicar uma diferença de potencial na bobina uma corrente irá fluir ao longo das espiras e criar um campo magnético. A figura 19 mostra as linhas de campo magnético numa bobina. Pode-se observar que no interior da bobina as linhas de campo são paralelas ao eixo e muito próximas umas das outras o que revela um campo magnético forte e uniforme. Pelo contrário, no exterior da bobina as linhas de campo são menos densas o que representa um campo magnético fraco. [14][15]

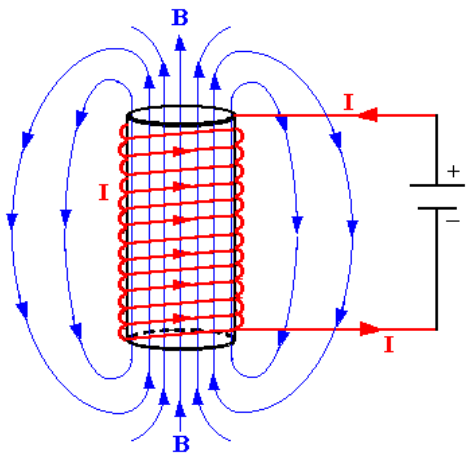


Figura 19 - Representação das linhas de campo numa bobina.

A densidade das linhas de campo também varia com o material do núcleo da bobina, como demonstra a figura 20. A adição do núcleo ferromagnético provoca uma dupla alteração no fluxo magnético. Pode-se observar que o número de linhas de campo aumenta e que estas também se encontram mais concentradas. Tal fenómeno ocorre devido à diferença na permeabilidade magnética dos materiais. [14]

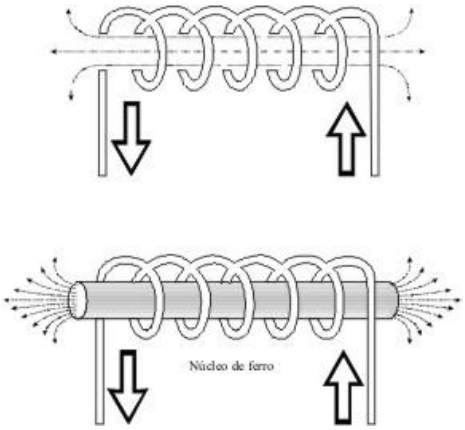


Figura 20 - Representação das linhas de campo numa bobina com núcleo de ar e com núcleo de ferro.

O cálculo do campo magnético numa bobina pode ser feito pela lei de Ampère com a particularidade de existir uma nova variável n que representa a densidade de espiras.

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot I = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{l} \quad (8)$$

A equação 8 comprova que para além da permeabilidade magnética existem outras variáveis que influenciam a magnitude do campo magnético. Quando o objetivo é aumentar este campo várias medidas podem ser tomadas tais como: aumentar a permeabilidade do material, aumentar o número de espiras, aumentar a intensidade da corrente ou diminuir o comprimento da bobina. Desta forma a manipulação do campo magnético torna-se bastante mais simples.

3.4. ELETROÍMANES

Um eletroíman é um tipo de íman em que o campo magnético é produzido pelo fluxo de corrente elétrica. Ao utilizar a eletricidade para produzir força magnética possibilita uma rápida manipulação do campo e consequentemente da força. Esta é a principal vantagem dos eletroímanes em relação aos ímanes permanentes, embora seja necessário um fornecimento contínuo de energia elétrica. [18]

Figura 21 – Eletroímanes.

Um solenoide é um tipo de eletroíman e como tal também converte energia elétrica em energia magnética. Existem solenoides de corrente contínua, de corrente alternada, giratórios, lineares e tubulares, porém neste projeto recorreu-se apenas aos atuadores lineares de corrente contínua.

Os solenoides lineares têm muitas aplicações, incluindo fechaduras, campainhas, comutadores e relés. A principal característica deste tipo de solenoide é a existência de um êmbolo (material ferromagnético) no interior da bobina que se irá comportar como um íman temporário de polaridade oposta à da bobina. Desta forma o êmbolo é puxado para o centro quando aplicada uma corrente elétrica. Quando esta corrente é interrompida é necessário que o êmbolo volte à posição inicial e por essa razão é incorporada uma mola no interior da bobina.

A figura 22 apresenta um esboço de um solenoide linear genérico. [19]

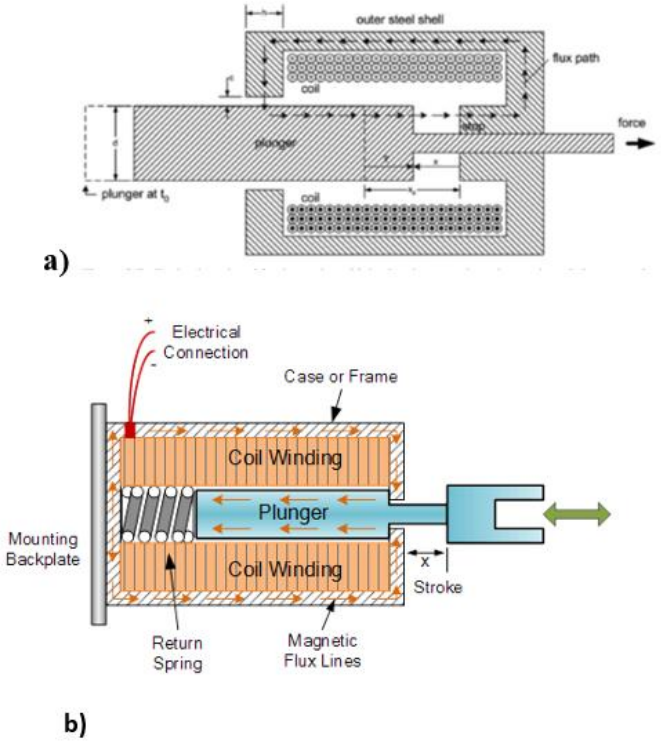


Figura 22 – Representação esquemática de um solenoide linear com função a)"push" e b)"pull"

3.5. FORÇA MAGNÉTICA (SOLENOIDE)

A energia magnética produzida pelo solenoide será convertida em trabalho, associado à força de atração F que move um êmbolo ferromagnético dentro do solenoide ao longo de uma distância x. Esta força é calculada através da primeira derivada de U_B em relação à variável x (equação 9). O sinal negativo indica que a direção da força é no sentido da diminuição da folga, x, como representado na figura 22. [19]

$$F(x) = -\frac{dU_B}{dx} \tag{9}$$

Tal como nos circuitos elétricos, a energia armazenada nos indutores calcula-se da seguinte forma:

$$U_B = \frac{1}{2}LI^2 \tag{10}$$

Onde a variável I corresponde à intensidade da corrente e a variável L ao valor de indutância, cujo cálculo é feito recorrendo à equação 2.

Considerando a intensidade da corrente constante obtém-se a seguinte equação para o cálculo da força magnética: [20]

$$F = -\frac{dU_B}{dx} = \left(-\frac{1}{2}I^2\right)\frac{dL(x)}{dx}$$

$$\frac{dL(x)}{dx} = \frac{((\mu\ A\ N^2)' \times x) - (x' \times \mu\ A\ N^2)}{x^2} = -\frac{\mu\ A\ N^2}{x^2} \qquad (11)$$

$$F = \left(-\frac{1}{2}I^2\right)\left(-\frac{\mu\ A\ N^2}{x^2}\right) = \frac{\mu\ A\ (NI)^2}{2x^2} = \frac{\mu_r\ \mu_0\ A\ (NI)^2}{2x^2}$$

No caso do dispositivo se tratar de um eletroíman, que não um solenoide, esta equação é igualmente válida. Porém nesse caso a variável x representa a distância entre o eletroíman e o material ferromagnético.

A intensidade da corrente é calculada através do quociente da voltagem pela resistência interna da bobina, que por sua vez corresponde ao produto da resistência do fio pelo seu comprimento total.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{R_{fio} \times l_{fio}} \qquad (12)$$

O enrolamento deve ser feito com um fio cujo material seja um ótimo condutor elétrico. Embora a prata seja considerada o melhor material para esta aplicação, o seu custo impede o seu uso em grande escala. Desta forma é utilizado o segundo melhor condutor elétrico, o cobre, cuja resistência se encontra nas tabelas AWG.

Tabela 2 - Valores de resistência do fio de cobre de acordo com o seu diâmetro

AWG	Diam mm	Sect. mm²	Resist. ohm/m	AWG	Diam mm	Sect. mm²	Resist. ohm/m
0000	11.7	107,0	0.000161	19	0,91	0,6530	0.0264
000	10.4	85.0	0.000203	20	0,81	0,5190	0.0333
00	9.26	67.4	0.000256	21	0,72	0,4120	0.0420
0	8.25	53.5	0.000323	22	0,64	0,3250	0.0530
1	7,35	42,4	0.000407	23	0,57	0,2590	0.0668
2	6,54	33,6	0.000513	24	0,51	0,2050	0.0842
3	5,83	26,7	0.000647	25	0,45	0,1630	0.106
4	5,19	21,2	0.000815	26	0,40	0,1280	0.134
5	4,62	16,8	0.00103	27	0,36	0,1020	0.169
6	4,11	13,3	0.00130	28	0,32	0,0804	0.213
7	3,67	10,6	0.00163	29	0,29	0,0646	0.268
8	3,26	8,35	0.00206	30	0,25	0,0503	0.339
9	2,91	6,62	0.00260	31	0,23	0,0415	0.427
10	2,59	5,27	0.00328	32	0,20	0,0314	0.538
11	2,30	4,15	0.00413	33	0,18	0,0254	0.679
12	2,05	3,31	0.00521	34	0,16	0,0201	0.856
13	1,83	2,63	0.00657	35	0,14	0,0154	1.08
14	1,63	2,08	0.00829	36	0,13	0,0133	1.36
15	1,45	1,65	0.0104	37	0,11	0,0095	1.72
16	1,29	1,31	0.0132	38	0,10	0,0078	2.16
17	1,15	1,04	0.0166	39	0,09	0,0064	2.73
18	1,02	0,82	0.0210	40	0,08	0,0050	3.44

O comprimento total do fio pode ser obtido pelo somatório do perímetro do fio em cada camada. Para a primeira camada calcula-se o perímetro com o raio externo do tubo de Nylon. Na segunda camada considera-se o raio igual à soma do raio externo com o diâmetro do fio e assim sucessivamente o que vai resultar na equação 13.

$$
\begin{aligned}
l_{fio\ 1ªcamada} &= 2 \cdot \pi \cdot N_c \cdot r_e \\
l_{fio\ 2ªcamada} &= 2 \cdot \pi \cdot N_c \cdot (r_e + D_{fio}) \\
l_{fio\ 3ªcamada} &= 2 \cdot \pi \cdot N_c \cdot (r_e + 2 \cdot D_{fio}) \\
&\dots \\
l_{fio} &= 2 \cdot \pi \cdot N_c \cdot \sum_{i=0}^{C} r_e + D_{fio} \cdot i
\end{aligned}
\tag{13}
$$

Onde N_c representa o número de espiras por camada e calcula-se através do quociente do comprimento da bobina pelo diâmetro do fio.

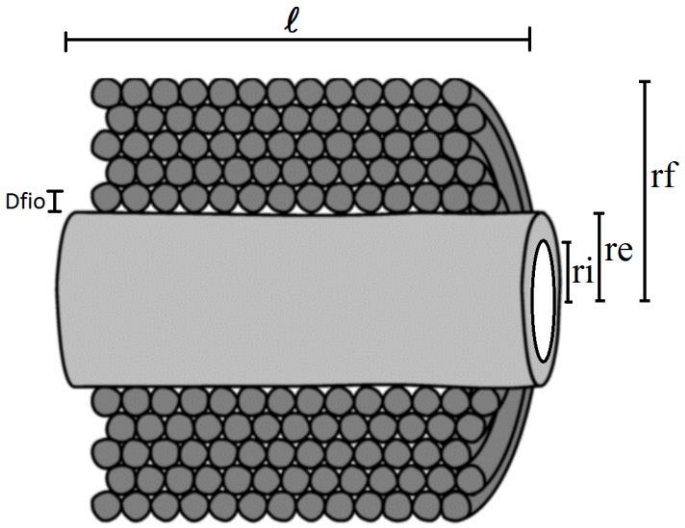


Figura 23 - Representação de uma bobina multicamada.

O número de espiras é calculado segundo a equação 14.

$$N = \frac{\left(D_f - D_e\right) \times N_c}{2 \times D_{fio}} \tag{14}$$

No caso de a bobina ter um núcleo quadrado é necessário ter em atenção duas variáveis - o comprimento do fio e a área da secção. Nas bobinas circulares a área corresponde a πr^2 enquanto que nas quadradas é igual a l_{lado}^2. O comprimento do fio, por sua vez, é calculado segundo a equação 15.

$$l_{fio} = 4 \cdot N_c \cdot \sum_{i=0}^{C} l_{lado\ int} + 2 \cdot D_{fio} \cdot i \tag{15}$$

CAPÍTULO 4

PROJETO

4.1. PRODUÇÃO DOS ADAPTADORES

A primeira fase do projeto consistia em criar um componente que fizesse a ligação entre uma prótese já fabricada e o mecanismo de engate/desengate. Foram concebidos dois adaptadores para incorporar os componentes na prótese. Um deles fazia a ligação entre o componente de fixação superior e o coto, o outro unia o componente de fixação inferior ao restante tubo protésico. Ambos os adaptadores possuíam uma rosca que enroscava no coto ou no tubo protésico, e dois furos onde seria colocados parafusos para fixar os componentes de fixação. A figura 24 ilustra a localização destes componentes no sistema protésico. Os desenhos técnicos encontram-se no Anexo II.

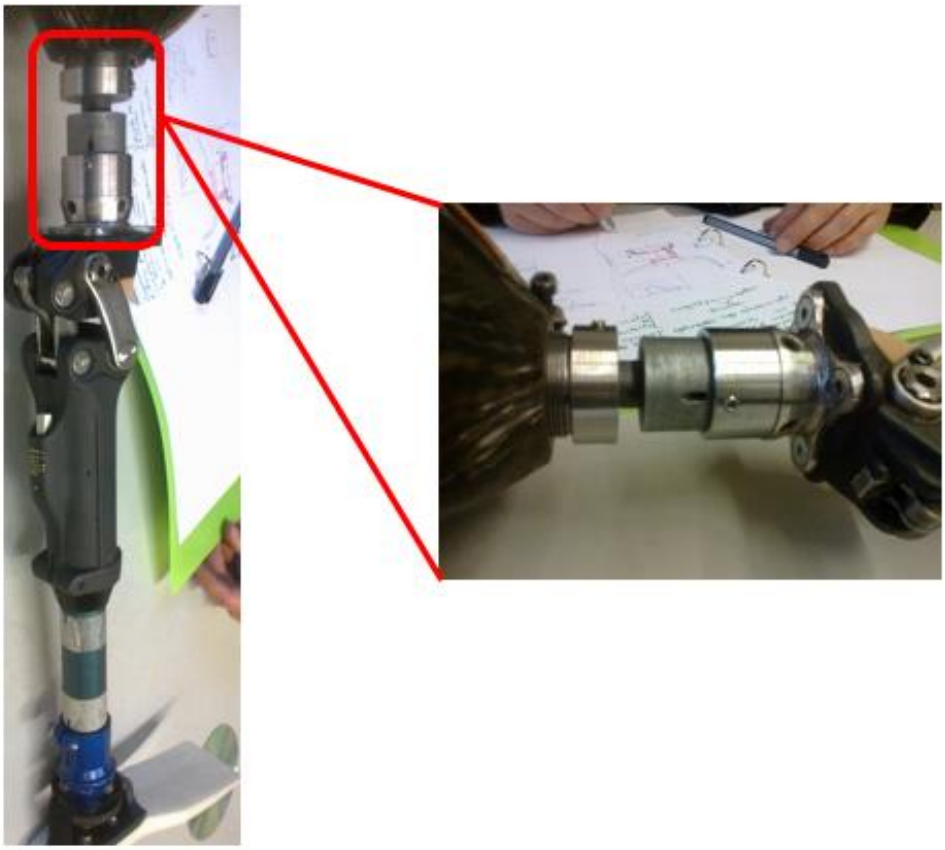


Figura 24 - Representação dos adaptadores concebidos e da sua localização no sistema protésico.

4.2. DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE DESENGATE

O objetivo principal deste projeto era mover o colar através de força magnética e como tal era imprescindível determinar a força necessária para o mover. O valor desta força de desencaixe foi obtido através do software Instron Bluehill onde se detetou um pico de 27 N aos 5mm.

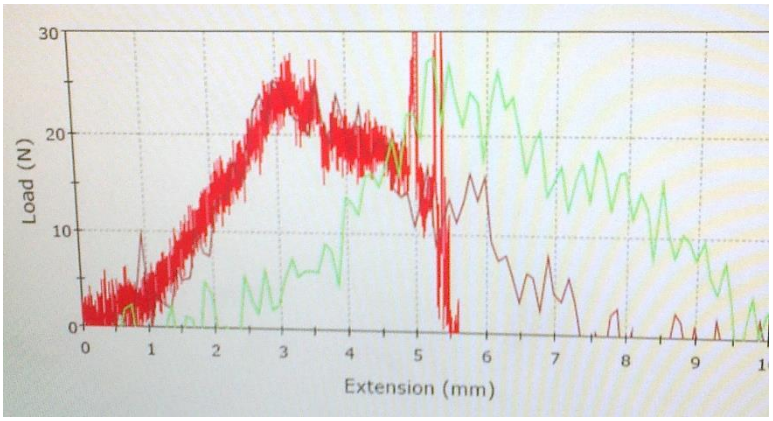


Figura 25 - Gráfico força - deslocamento obtido através do software Instron Bluehill

Uma vez que o objetivo era utilizar um eletroíman cuja fonte de alimentação não excedesse os 9V esta força era demasiado elevada. A solução passou por alterar a mola obtendo-se assim uma força dez vezes inferior.

4.3. DESENVOLVIMENTO DA BOBINA

- **1º Hipótese**

Inicialmente ponderou-se em fazer uma bobina que puxasse diretamente o colar, ou seja, o enrolamento seria colocado em torno do colar e a força magnética puxaria o colar no sentido do desencaixe. Esta ideia foi imediatamente excluída uma vez que a bobina, para atingir a força necessária, teria que ter dimensões muito elevadas.

- **2º Hipótese**

Posteriormente colocou-se a hipótese de utilizar um solenoide (push/pull) existente no mercado. Neste caso os fatores a ter em conta seriam o tamanho do solenoide, a sua relação força-deslocamento e a voltagem necessária para o acionar. Uma vez que o solenoide seria alimentado com pilhas ou com uma bateria de pequenas dimensões a voltagem não deveria exceder os 9V. Quanto ao tamanho, este não deveria ultrapassar o tamanho do encaixe e relativamente à relação força-deslocamento, o solenoide deveria ser capaz de exercer 2.5N num espaço de 5mm. Após uma pesquisa no mercado, verificou-se alguma dificuldade em encontrar um dispositivo com tais especificações, uma vez que a maioria dos solenoides exercem uma força muito elevada apenas num pequeno deslocamento como demonstra a figura 26.

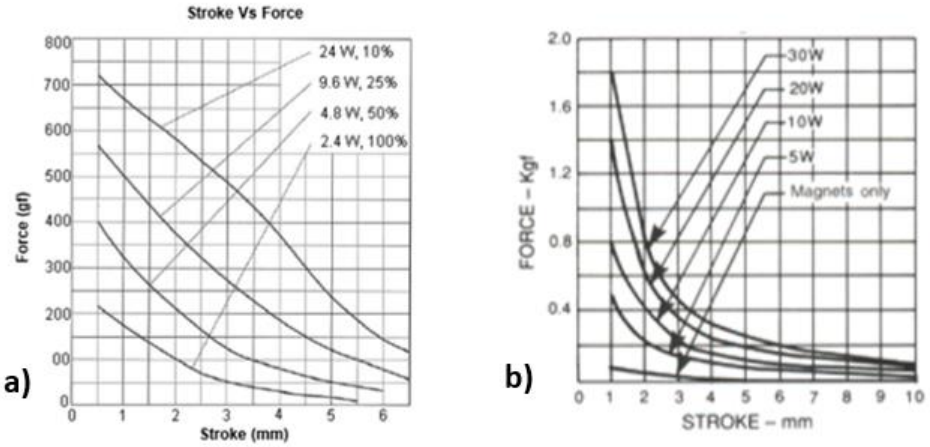


Figura 26 - Gráfico força - deslocamento para solenoides existentes no mercado: a) MCSMO-0630S06STD b) BLP-67-120-610-620 [21][22]

Ainda assim fez-se a experiência com dois solenoides disponíveis no laboratório, o BLP-67-120-610-620 e o MCSMO-0630S06STD para comprovar as curvas força-deslocamento. Como seria de esperar nenhum dos dispositivos teve força suficiente para mover o colar, contudo estes poderiam ser úteis juntamente com um mecanismo multiplicador de força/deslocamento – alavanca – como está representado na figura 27.

Figura 27 – Representação do movimento do colar por intermédio de uma alavanca e um solenoide.

Este mecanismo consiste numa estrutura rígida que gira em torno de um ponto, formando assim dois braços, um onde é aplicada a força (braço de entrada) e outro que levanta o peso pretendido (braço de saída) como é ilustrado na figura 28.

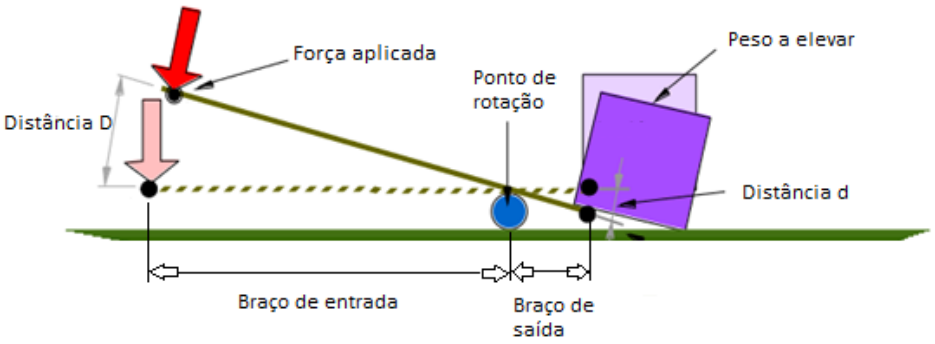


Figura 28 - Mecanismo multiplicador de força/deslocamento - Alavanca.

Se o ponto fixo se encontra no centro do corpo (situação de equilíbrio) então os braços têm o mesmo comprimento e por isso nem a força nem o deslocamento se alteram. Pretende-se então uma situação de vantagem mecânica, ou seja, uma diferença no comprimento dos braços. Se o objetivo for multiplicar a força então o comprimento do braço de entrada deve ser superior ao braço de saída, mas em contrapartida o deslocamento irá diminuir na mesma proporção. [23]

Supondo que:

Braço de entrada = 10 x Braço de saída

Então:

Força de saída = 10 x Força de entrada

Distância D = 10 x Distancia d

Este foi o principal entrave para esta solução, uma vez que era difícil aumentar a força e diminuir o deslocamento na mesma proporção e obter os valores pretendidos.

- **3º Hipótese**

Concluiu-se que os solenoides comercializados não seriam uma solução para o problema e por isso o ideal seria produzir um com os requisitos necessários. Foi concebido um tubo em nylon onde seria enrolado o fio de cobre e um pino em material ferromagnético que se iria mover no interior da bobina de forma a empurrar o colar no sentido do desencaixe.

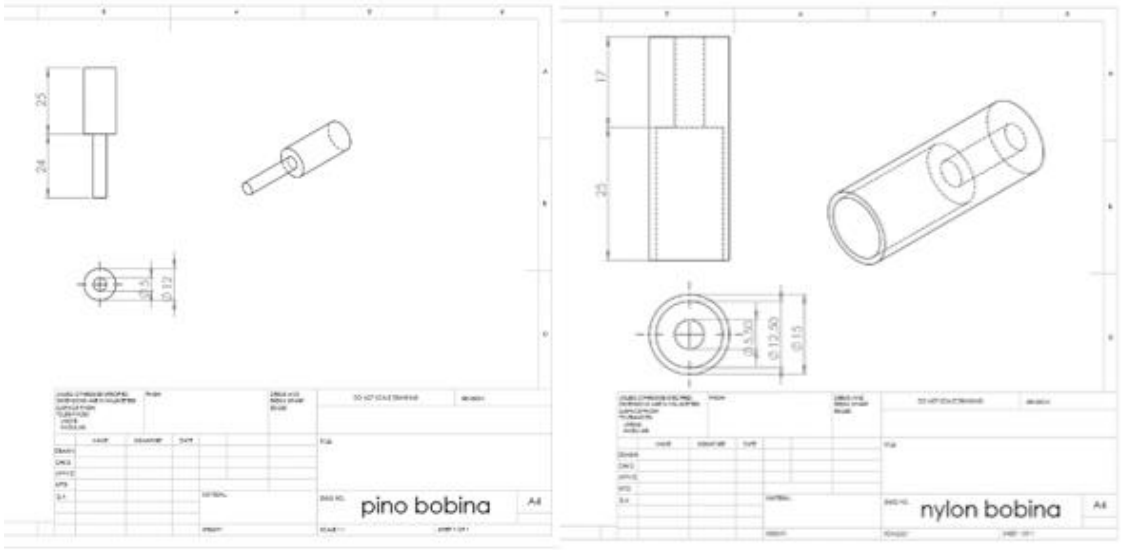


Figura 29 - Desenho técnico do tubo Nylon e do pino produzidos.

Neste caso o maior entrave foi o excesso de ar no interior e em redor da bobina, ou seja, nas zonas onde se observam as linhas de campo (figura 30).

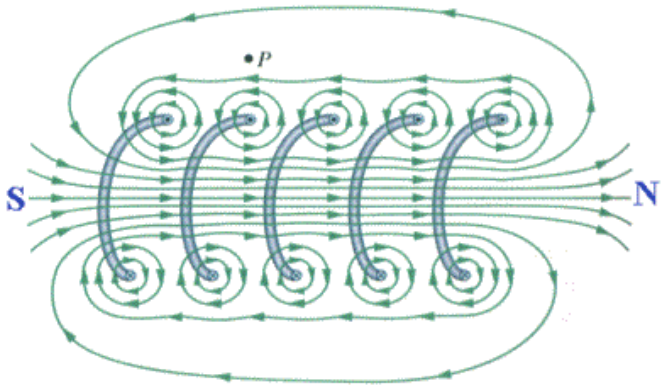


Figura 30 - Representação das linhas de campo de uma bobina.

A permeabilidade do ar é muito inferior à do ferro e por isso o campo magnético diminui drasticamente o que irá influenciar também a força magnética.

- **4ª Hipótese**

Para eliminar este problema optou-se por colocar o diâmetro da bobina uniforme resultando assim um tubo de Nylon com 50mm de comprimento, 12mm de diâmetro interno e 15mm de diâmetro externo. No seu interior foi introduzido material ferromagnético com o mínimo de folga possível para que não houvesse movimento e foi também acrescentada uma chapa em torno da bobina de forma a não se perderem as linhas de campo que circulam no seu exterior (figura 31).

Figura 31 - Bobina fabricada.

Restava então saber quantas espiras deveria ter o enrolamento para atingir uma força magnética de 2,5N.

A grande dificuldade em conceber uma bobina com uma determinada força é o número de variáveis de que esta depende. Para facilitar esta tarefa elaborou-se uma folha de cálculo no Excel onde é possível inserir as variáveis já conhecidas e calcular todas as outras desconhecidas. A tabela 3 apresenta essa folha de cálculo onde os valores das variáveis a cinzento são inseridos e os restantes são automaticamente calculados.

Tabela 3 - Variáveis que influenciam o valor da força magnética

Resistência do fio	(Ω/m)	R_{fio}	**Raio médio da bobina (r_m)**	(m)	$\frac{C \times 0{,}0005 + D_e}{2}$
Diâmetro do fio	(m)	D_{fio}	**Comprimento do fio por volta (l_v)**	(m)	$2 \cdot \pi \cdot r_m$
Raio interno da bobina	(m)	R_i	**Comprimento total de fio (l_{fio})**	(m)	$l_v \cdot N$
Diâmetro externo da bobina	(m)	D_e	**Espiras por camada (N_c)**		$l/0{,}0005$
Comprimento da bobina	(m)	l	**Número de camadas (C)**		N/V_c
Número de espiras		N	**Resistência total (R)**	(Ω)	$l_{fio} \times 0{,}084$
Voltagem (V)	(V)	V	**Intensidade (I)**	(A)	V/R
			Diâmetro externo da bobina c/ fio	(m)	$2 \times C \times 0{,}0005 + D_e$
			Potência	(W)	$V \times I$
Força magnética (para x=5mm)		(N)	$\frac{(I \times N)^2 \times \mu_0 \times A_{secção}}{2 \times g^2}$		

Como se pode verificar na equação 16 tanto o número de espiras como a intensidade da corrente elétrica têm grande influência no valor da força magnética.

$$F = \frac{(I \times N)^2 \times \mu_0 \times A}{2 \times g^2} \quad (16)$$

O objetivo seria então calcular a variável N sabendo que:

$F_{min} = 2{,}5N$

$V = 6v$

$g = 5mm$

$A_{secção} = \pi \cdot R_{int}^2 = 113mm^2$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ N \cdot A^{-2}$

$$2{,}5 \leq \frac{N^2 \times I^2 \times 113 \times 10^{-6} \times 4\pi \times 10^{-7}}{2 \times 0.005^2}$$

$$880281 \leq N^2 \times I^2$$

De acordo com os solenoides comercializados a potência da bobina deve ser pelo menos 5W, para atingir uma força minimamente aceitável. Como se estabeleceu os 6V para a alimentação da bobina, a intensidade da corrente deve ser cerca de 0,83A, de acordo com a equação 17.

$$P = VI \Leftrightarrow I = \frac{P}{V} \quad (17)$$

Desta forma o número mínimo de espiras é 1130 para uma corrente de 0,83A.

Para que o funcionamento da bobina não seja no limite aumentou-se o número de espiras para 1250 que irá resultar num diâmetro externo de 28mm. Foi utilizado um fio de cobre com 0,5mm de diâmetro e uma resistência de 0,084 Ω/m. A tabela 4 apresenta os valores obtidos.

Tabela 4 – Valores obtidos para uma bobina com 50mm de comprimento

Resistência do fio	(Ω/m)	0.084	**Intensidade (I)**	(A)	0.856
Diâmetro do fio	(m)	0.005	**Diâmetro externo da bobina c/ fio**	(m)	0.0275
Raio interno da bobina	(m)	0.006	**Potência**	(W)	5.1357
Diâmetro externo da bobina	(m)	0.015			
Comprimento da bobina	(m)	0.05			
Número de espiras		1250			
Voltagem (V)	(V)	6			
Força magnética (para x=5mm)		(N)	3.2540		

- **6ª Hipótese**

Embora o eletroíman anterior tenha a força necessária, as suas dimensões são muito elevadas quando comparadas às dimensões do encaixe. Por esta razão optou-se por fazer o mesmo procedimento num solenoide mais pequeno e já comercializado - MCSMO-0630S06STD. Tal como no caso anterior, o diâmetro interno não era igual ao longo de toda a bobina e portanto foi necessário uniformizá-lo. Resultou assim um tubo de Nylon com 24mm de comprimento, 7,5mm de diâmetro externo e 6,5mm de diâmetro interno. Em torno desse tubo foi enrolado fio de cobre com diâmetro de 0,2mm e uma

resistência de 0,426 Ω/m. No seu interior foi introduzido material ferromagnético com o mínimo de folga para evitar o movimento.

Foram feitos os cálculos para encontrar o número de espiras e a intensidade da corrente e constatou-se que para alcançar a força pretendida um destes valores seria excessivamente alto. Um número de espiras elevado provocaria um aumento no diâmetro externo da bobina e por outro lado um aumento da corrente iria dificultar a alimentação do solenoide com pilhas.

Outro problema é a relação entre o número de espiras e a intensidade da corrente. O aumento do número de espiras faz com que aumente o comprimento do fio do cobre e consequentemente a resistência da bobina. Uma vez que a voltagem pretendida são 6 Volts, e esta obtém-se pelo produto da resistência pela corrente, se a resistência aumenta então a intensidade da corrente diminui. Esta proporcionalidade inversa entre o número de espiras e a intensidade da corrente é o principal entrave para alcançar a força pretendida.

Tabela 5 – Valores obtidos para o solenoide MCSMO-0630S06STD com núcleo uniforme

Resistência do fio	(Ω/m)	0.426	**Intensidade (I)**	(A)	0.4237
Diâmetro do fio	(m)	0.000226	**Diâmetro externo da bobina c/ fio**	(m)	0.0121
Raio interno da bobina	(m)	0.00325	**Potência**	(W)	2.5419
Diâmetro externo da bobina	(m)	0.0075			
Comprimento da bobina	(m)	0.024			
Número de espiras		1080			
Voltagem (V)	(V)	6			
Força magnética (para x=5mm)		(N)	0.1746		

- **7º Hipótese**

Recorreu-se de novo à bobina produzida (figura 31) reduzindo-lhe o comprimento para 25mm e aumentando a voltagem para 9V. Recalculou-se o número de espiras e a intensidade da corrente de forma a obter uma força elevada. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 6.

Tabela 6 – Valores obtidos para a bobina com 25mm de comprimento

Resistência do fio	(Ω/m)	0.084	**Intensidade (I)**	(A)	2.0210
Diâmetro do fio	(m)	0.005	**Diâmetro externo da bobina c/ fio**	(m)	0.03
Raio interno da bobina	(m)	0.006	**Potência**	(W)	18.1891
Diâmetro externo da bobina	(m)	0.015			
Comprimento da bobina	(m)	0.025			
Número de espiras		750			
Voltagem (V)	(V)	9			
Força magnética (para x=5mm)		(N)	6.5306		

Desta forma resultaria um eletroíman com 25mm de comprimento, 30mm de diâmetro e uma força de 6,5N em 5mm. Obteve-se então um eletroíman com a força necessária e com as dimensões dentro dos limites estabelecidos.

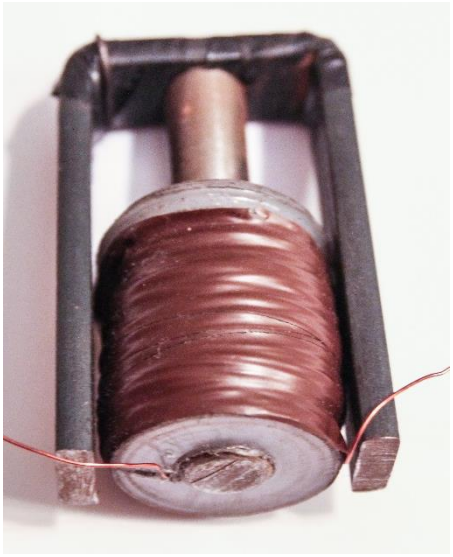


Figura 32 - Segunda bobina produzida.

Para otimizar o funcionamento do eletroíman seria vantajoso produzir um núcleo laminado. Este processo é muito utilizado nos transformadores como forma de eliminar as correntes parasitas e consequentemente a dissipação de calor. O núcleo é então composto por várias chapas com espessura entre 0,25 e 0,5mm. Essas chapas são isoladas pelo próprio óxido de laminação siderúrgica e são prensadas até formarem o núcleo em forma de E.[24] Antes de utilizar as chapas foi necessário verificar que a bobina funcionava da mesma forma com núcleo quadrado. Foi então fabricado o núcleo apresentado na figura 33.

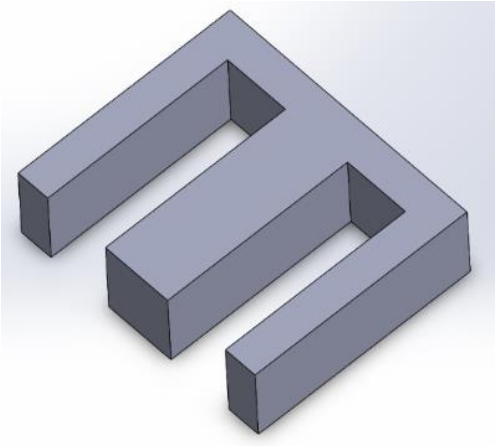


Figura 33 - Modelo virtual 3D do núcleo quadrado da bobina.

A sua altura, largura e comprimento são iguais a 30mm, 40mm e 10mm respetivamente. No caso de se utilizarem chapas com 0.25mm de espessura, serão necessárias 120 chapas cujas dimensões sejam 40x10.

Esta estrutura não permite que o fio de cobre seja enrolado diretamente nela por isso foi necessário utilizar outro núcleo no qual seria enrolado o fio que posteriormente seria transferido para a estrutura da figura 34. O núcleo que servirá de interface deverá ter dimensões ligeiramente maiores para que exista uma folga quando o fio for transferido. Este também deve possuir duas abas removíveis para que o fio não desenrole.

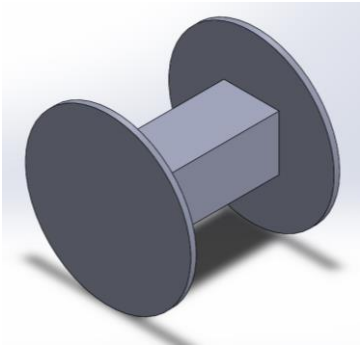


Figura 34 - Núcleo para enrolamento do fio.

O objetivo era manter a força inalterada e por isso era necessário dimensionar novamente a barra de Nylon onde vai ser enrolado o fio de cobre. Desta forma a área da secção, o número de espiras e a intensidade da corrente não se deviam alterar. Um dos fatores que interfere nestas variáveis é o comprimento total do fio e por isso é também necessário que o perímetro exterior da barra de Nylon não se altere.

$$A_{secção\ 1} = A_{secção\ 2} \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow \pi \times R^2 = {l_{ladoint}}^2 \Leftrightarrow \pi \times 6^2 = {l_{lado\ int}}^2 \Leftrightarrow \quad (18)$$
$$\Leftrightarrow l_{lado\ int} \cong 10{,}5mm$$

$$P_1 = P_2 \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow 2 \cdot \pi \cdot R = 4 \cdot l_{lado\ ext} \Leftrightarrow 2 \cdot \pi \cdot 7{,}5 = 4 \cdot l_{lado\ ext} \Leftrightarrow \quad (19)$$

$$\Leftrightarrow l_{lado\ ext} \cong 12mm$$

Optou-se por eliminar o Nylon e fazer o enrolamento diretamente no núcleo ferromagnético o que alterou algumas variáveis como o comprimento do fio e a resistência. O núcleo ficaria então um quadrado com 10mm de lado.

$$A_{secção} = 100\ mm^2$$

$$P = 40\ mm$$

Como:

$$l_{bobina} = 25\ mm$$

$$D_{fio} = 0{,}5\ mm$$

Então cada camada do enrolamento é constituída por 50 espiras. Como tal, obter 750 espiras foram necessárias 15 camadas.

$$l_{fio\ 1ª\ camada} = 4 \times 10 \times 50$$

$$l_{fio\ 2ª\ camada} = 4 \times 11 \times 50$$

$$l_{fio\ 3ª\ camada} = 4 \times 12 \times 50$$

$$l_{fio\ total} = 4 \times 50 \times (10 + 11 + 12 + 13 + \cdots + 23 + 24)$$

$$= 4 \times 50 \sum_{i=0}^{C} 10 + i = 51\ m$$

$$R = R_{fio} \times l_{fio} = 0{,}084 \times 51 = 4{,}284\ \Omega$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{9}{4{,}284} = 2{,}1\ A$$

$$F = \frac{(I \times N)^2 \times \mu_0 \times A}{2 \times g^2} = \frac{750^2 \times 2{,}1^2 \times 100 \times 10^{-6} \times 4\pi \times 10^{-7}}{2 \times 0.005^2} = 6{,}23\ N$$

O cálculo do diâmetro final da bobina dificilmente corresponde ao valor obtido na prática. Teoricamente, se o enrolamento era constituído por 15 camadas e o fio tinha 0,5mm de diâmetro seria de esperar um diâmetro de 25mm (10mm do núcleo + $15 \times 2 \times D_{fio}$). Como já se previa que na prática o diâmetro fosse superior, elaborou-se o núcleo em forma de E com um espaçamento de 30mm. Ainda assim não foi suficiente porque obteve-se um diâmetro de 36mm. A solução passou por retirar algumas espiras até atingir o diâmetro esperado. Resultou então uma bobina com 630 espiras.

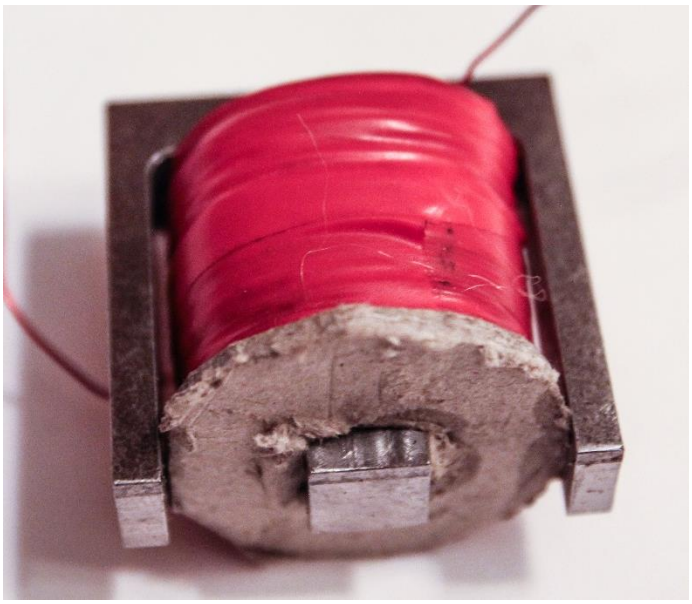


Figura 35 - Bobina concebida com menor comprimento.

A alteração no número de espiras altera o comprimento total do fio e como tal a resistência interna da bobina, a intensidade da corrente e a força magnética também irão sofrer alterações.

A bobina foi alimentada com 9V e recorrendo a um multímetro obteve-se o valor de corrente elétrica – 2,5A. Desta forma, a resistência da bobina é 3,6Ω e a força magnética seria calculada da seguinte forma:

$$F = \frac{(I \times N)^2 \times \mu_0 \times A}{2 \times g^2} = \frac{630^2 \times 2{,}5^2 \times 100 \times 10^{-6} \times 4\pi \times 10^{-7}}{2 \times 0.005^2} = 6{,}23\ N$$

Como se pode verificar, a força magnética mantém-se inalterada.

4.4. ALIMENTAÇÃO DA BOBINA

Finalmente concebida a bobina, o passo seguinte seria encontrar uma forma de a alimentar recorrendo a pilhas ou baterias tento em conta as limitações no tamanho e no peso. Depois de analisado o mercado concluiu-se que não existia nenhuma pilha nem nenhuma bateria de dimensões aceitáveis com 9V e 2,5A. Seria então necessário colocar pilhas ou baterias em série ou em paralelo.

A ligação em série consiste na união do terminal positivo de uma bateria ao terminal negativo de outra, fazendo assim com que a voltagem final seja igual à soma das voltagens de cada bateria. Quanto à capacidade final, esta é equivalente à capacidade de uma das baterias. Se o objetivo for somar a capacidade, em vez da voltagem, então recorre-se a uma ligação em paralelo, onde o terminal positivo e negativo de uma bateria são ligados ao terminal positivo e negativo da outra, respetivamente. Existe ainda a hipótese de juntar uma ligação em série com uma ligação em paralelo, mas neste caso não é vantajoso uma vez que ocuparia muito espaço. [25]

No caso de se utilizar uma bateria, esta deveria ser semelhante a uma bateria de telemóvel que, geralmente, têm 3,7V. Neste caso, uma ligação em série seria inevitável e como tal cada bateria deveria ter uma capacidade de 2,5Ah. Na fase inicial do projeto não se encontravam no mercado baterias deste tipo e como tal esta hipótese foi excluída recorrendo-se assim às pilhas. Atualmente já se pode encontrar baterias com uma capacidade de 3000mAh, 3,7V e cujas dimensões são 84x42,3x5,5. Desta forma poderiam ser utilizadas 3 baterias ligadas em série, ocupando assim um volume de 19.5cm^3.

Relativamente às pilhas, estas deveriam ser recarregáveis, ou seja, de Níquel ou de Lítio. Comparando ambos os tipos concluiu-se que as pilhas de Lítio possuem maior voltagem e maior capacidade, contudo são mais difíceis de encontrar no mercado. As pilhas de Lítio recarregáveis têm geralmente 3,7V e portanto seriam necessárias 3 pilhas

cuja capacidade fosse 2500mAh. Foram encontradas no mercado pilhas UltraFire com 3,6V e 3000mAh. Estas pilhas têm um diâmetro de 17mm e um comprimento igual a 65mm, logo três pilhas ocupariam um volume de 53 cm^3. Foi feita uma ligação em série com estas pilhas obtendo-se assim 11V e 3000mAh como demonstra a figura 36.

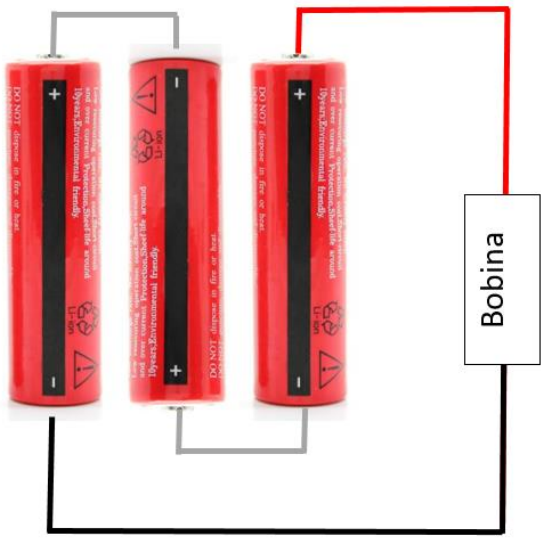


Figura 36 - Ligação em série de três pilhas de Lítio.

Nesta ligação resta apenas acrescentar o interruptor. Optou-se por utilizar os interruptores que apenas mantém o circuito fechado quando são pressionados, evitando assim gastos de energia desnecessários. Outro aspeto importante é a segurança do mecanismo e ao colocar um interruptor esse critério não seria cumprido, pois seria fácil o interruptor ser acionado sem que o individuo assim o pretende-se. A solução passou por utilizar dois interruptores pulsadores.

Figura 37 - Interruptores pulsadores.

Desta forma o circuito só se fecharia quando fossem pressionados os dois interruptores simultaneamente. Seria também vantajoso que estes não tivessem próximos para que a probabilidade se acionar os dois fosse quase nula.

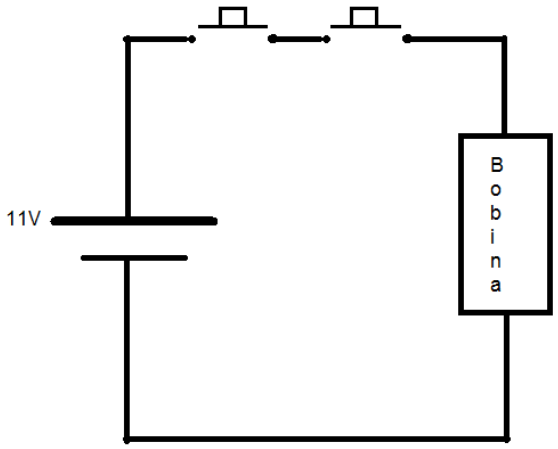


Figura 38 - Esquema da ligação entre as pilhas, a bobina e os interruptores.

4.5. VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA BOBINA

Depois de encontrada a melhor forma de alimentar a bobina era necessário verificar experimentalmente o seu funcionamento.

Recorreu-se ao instron bluehill para fixar a bobina a uma determinada distância de um material magnético. Uma vez que estas distâncias são pequenas e uma variação de meio milímetro interfere bastante com a força, foi útil a utilização deste software para uma medição mais precisa das distâncias. Foi colocada uma chapa com 630g a 1mm da bobina e verificou-se que a mesma exerce uma força suficiente para a atrair.

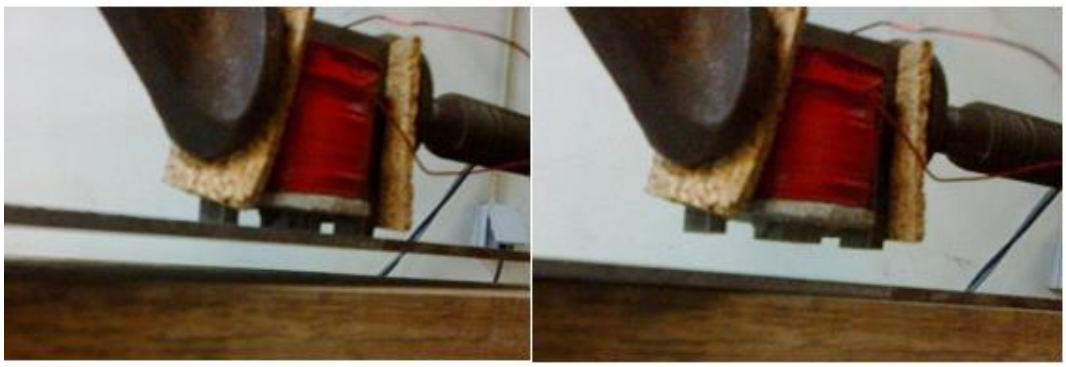


Figura 39 - Representação do ensaio realizado para verificar a relação força-deslocamento da bobina fabricada.

De seguida foi-se aumentando a distância até a bobina deixar de ter força suficiente para atrair a chapa, o que aconteceu aos 3,2mm. Isto significa que a bobina consegue deslocar 3mm uma chapa com 630g. O mesmo procedimento foi feito para 391g, 373g, 285g e 270g onde se obteve deslocamentos de 4,5mm, 5,5mm, 6,5mm e 7mm respetivamente. O gráfico da figura 40 traduz o funcionamento da bobina através da sua relação força-deslocamento

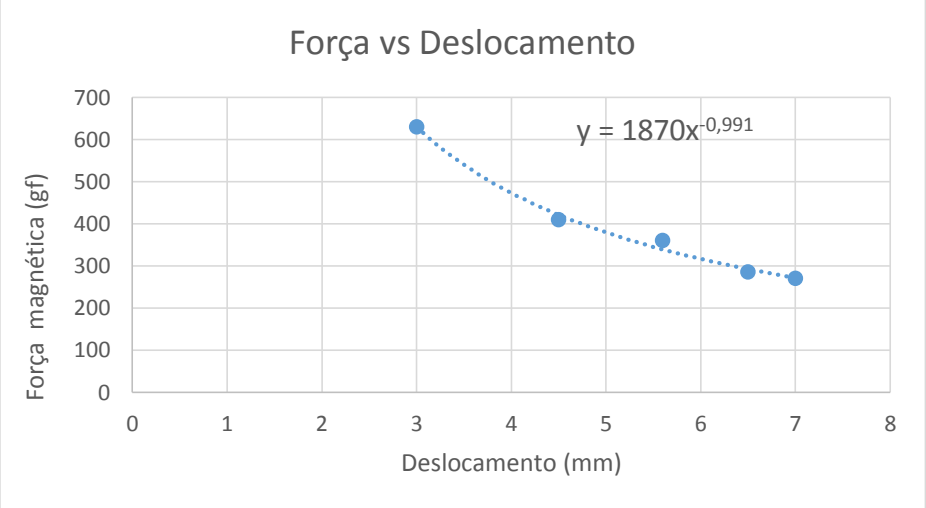


Figura 40 - Gráfico força-deslocamento.

4.6. COMPONENTES FINAIS

Depois de concebida a bobina e de verificar o seu correto funcionamento, era necessário encaixar todos os componentes na prótese. O adaptador feito inicialmente já não seria útil uma vez que o mecanismo agora possui uma bobina. O grande entrave neste projeto é a falta de espaço e por isso seria vantajoso não acrescentar mais adaptadores. Deste forma o que foi projetado foi um aumento da componente de fixação pra que a bobina se alojasse no seu interior como demonstra a figura 41. Os respetivos desenhos técnicos encontram-se no Anexo II.

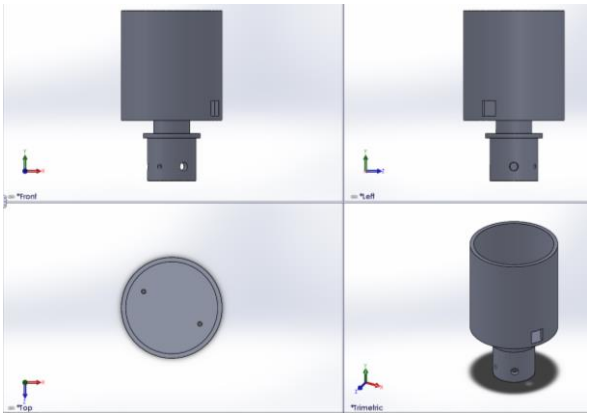


Figura 41 - Modelo virtual 3D do componente de fixação superior adaptado.

Por outro lado era importante que, no caso de avaria, a bobina pudesse ser retirada e fosse utilizado apenas o mecanismo inicial. Nesta situação, ao utilizar o encaixe da figura 41, 83 cm^3 da peça não teriam qualquer funcionalidade e era desvantajoso em termos de espaço e peso. Como tal foi concebido outro encaixe tendo em conta esta situação. O componente de fixação superior seria idêntico ao inicial com uma pequena alteração no diâmetro para que pudesse enroscar diretamente no coto. Uma vez que o diâmetro do coto é 36mm, o diâmetro da componente de fixação também será 36mm. Como a bobina tem um diâmetro de 40mm não seria possível fazer o encaixe com uma só peça. O adaptador, representado na figura 42, é então constituído por duas partes: uma que enrosca no coto; e outra que enrosca no componente de fixação e aloja a bobina no seu interior. Este também possui um furo onde será inserido um pino de forma a impedir a rotação da rosca superior. Na rosca inferior não é necessário nenhum componente adicional, uma vez que a chaveta do mecanismo engate/desengate já impossibilita o movimento de rotação. O desenho técnico deste componente é apresentado no Anexo III.

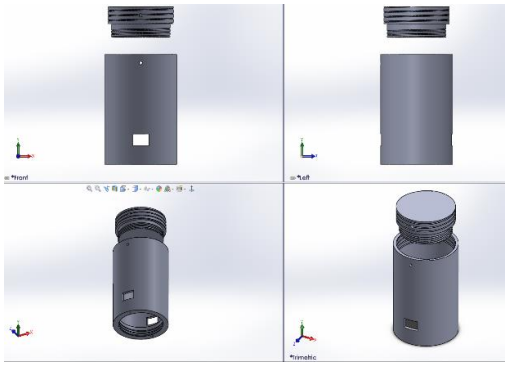


Figura 42 - Modelo virtual 3D do adaptador com um raio interno não uniforme.

A bobina pode ainda ser alterada para um diâmetro de 35mm e neste caso o encaixe pode ser feito por uma única peça, representada na figura 43.

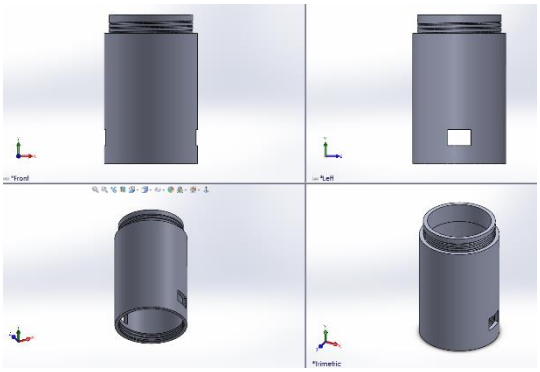


Figura 43 - Modelo virtual 3D do adaptador com raio interno uniforme.

Reunindo todos os componentes do sistema protésico obtém-se a montagem final representada na figura 44. Os desenhos técnicos de todos os componentes encontram-se em Anexo.

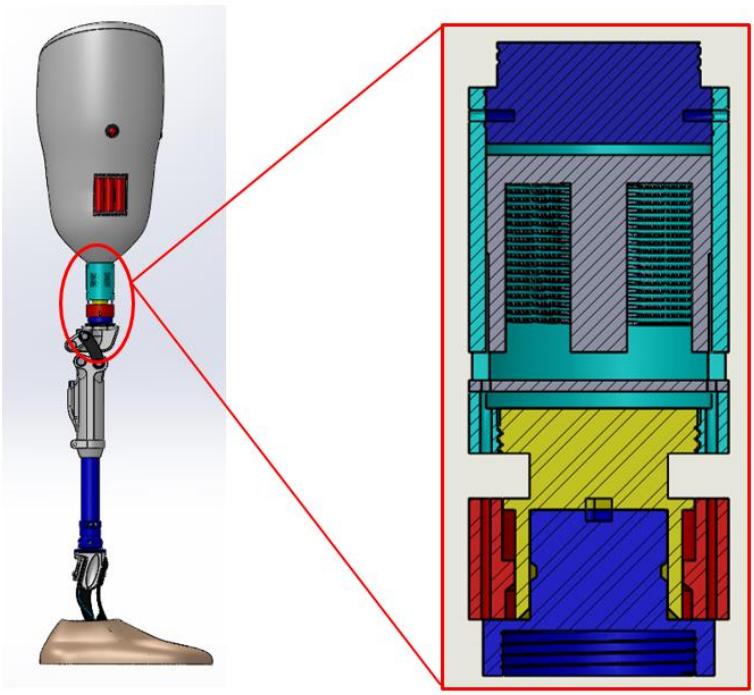


Figura 44 - Montagem final do sistema protésico.

4.7. DISCUSSAO

Este capítulo consistiu essencialmente na conceção da bobina tendo-se verificado uma enorme dificuldade em atingir os requisitos estabelecidos. A criação de uma bobina envolve o controlo de enumeras variáveis que estão relacionadas entre si e como tal não é possível alterar uma variável sem que alguma outra seja também afetada. A bobina que foi possível conceber e que mais se aproximava do objetivo inicial tinha a potência pretendida mas o seu tamanho ficou um pouco aquém do previsto.

Quanto à fonte de alimentação usada, esta também não foi a ideal. Um dos requisitos mais importantes deste projeto é a falta de espaço e portanto pretendia-se que todos os elementos tivessem o menor tamanho possível. Para colmatar este problema inicialmente pensava-se em utilizar pilhas pequenas ou uma bateria de telemóvel por exemplo. Como se verificou, nenhuma dessas hipóteses tinha a potência que a bobina precisava e por isso foi necessário recorrer a pilhas de Lítio. Para além de estas terem um tamanho superior às pilhas normais (AA) ainda foi necessário utilizar três pilhas destas. Haveria também a hipótese de utilizar três baterias de telemóvel mas o custo seria mais elevado e acabaria por ocupar o mesmo volume. Uma forma de minimizar o problema da falta de espaço seria colocar um compartimento no coto onde seria inseridas as pilhas.

O problema que surgiu de seguida foi o local onde deveria ser colocada a bobina. Optou-se por colocá-la por cima do componente sobre o qual a bobina iria atuar. Esta solução também não foi a melhor, uma vez que vai interferir com a altura da prótese no caso de esta não ser ajustável.

Comparando este mecanismo eletrónico com o descrito inicialmente verifica-se algumas vantagens e desvantagens. O facto de a bobina interferir com a altura da prótese é o principal problema deste mecanismo. Por outro lado eliminou-se o mecanismo de ativação que ocupava algum espaço substituindo-o por dois interruptores que podem ser colocados em qualquer parte. Também se prevê que o tempo de vida do mecanismo seja superior, porque, ao contrário do outro, não utiliza materiais que sofram grande desgaste, como o fio de natureza têxtil. Em contrapartida é necessário carregar as pilhas para que o mecanismo dure muito tempo. Este carregamento não deverá ser muito frequente, uma vez que as pilhas apenas são usadas enquanto o circuito se encontra fechado, ou seja, poucos segundos.

CAPÍTULO 5
DIMENSIONAMENTO DO ADAPTADOR

5.1. MATERIAIS

O componente que fará a ligação do coto com o mecanismo de ativação está em contacto com a bobina e como tal deverá ser produzido em material não magnético para não interferir no seu bom funcionamento. De outra forma o campo magnético dissipar-se-ia pelo componente e a força magnética não seria suficiente para ativar o mecanismo. Por outro lado, a resistência mecânica do material também deve ser elevada, uma vez que o componente vai suportar cargas idênticas às do membro inferior. Optou-se então por utilizar aço inoxidável, nomeadamente a série 300 que corresponde aos aços inoxidáveis austeníticos. A esta série pertencem os aços não magnéticos, como o 304 e 316, que se distinguem apenas pela existência ou ausência de Molibdénio. O aço inoxidável 316 contém 3% de Molibdénio o que lhe confere uma maior resistência à corrosão. Por outro lado o seu preço é ligeiramente superior ao do aço inoxidável 304. Uma vez que o componente não vai estar sujeito a grandes agentes corrosivos optou-se por utilizar o aço 304 devido ao seu custo. [26][27]

Tabela 7 - Composição química do aço 304

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Co	Cu
0,060	0,39	1,31	18,09	8,03	0,040	0,0330	0,10	0,07

Tabela 8 - Propriedade do aço 304 e 316

	Tipo 304	**Tipo 316**
Tensão de Cedêcncia (MPa)	215	240
Tensão de Ruptura (MPa)	505	550
Modulo de Elasticidade (GPa)	193-200	193
Dureza (Rockwell B)	70	80

5.2. DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO

A norma internacional ISO 10328:2006 (*Prosthetics - Structural testing of lower limb prostheses - Requirements and test methods)* específica os procedimentos para ensaios estáticos e cíclicos em próteses do membro inferior cuja carga se resume a uma única força F_T. Para a realização dos ensaios é necessário decompor essa força nas suas componentes uniaxiais de compressão e flexão. Relativamente à torção, a norma estabelece cargas que devem ser testadas independentemente, e por essa razão se despreza esta componente na decomposição da força F_T. Esta força de teste F_T varia de acordo como o peso do indivíduo e, como tal, a norma apresenta três níveis padrão de cargas de teste. Neste projeto apenas se considera o nível mais elevado (P5) que corresponde a indivíduos com 100Kg. A tabela 9 apresenta as cargas utilizadas em ensaios estáticos para o nível P5. [9]

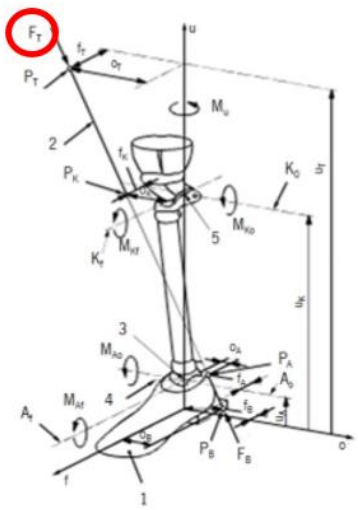


Figura 45 - Representação de uma montagem protésica sujeita a uma carga FT.

Tabela 9 - Forças utilizadas nos ensaios estáticos para o nível P5

F_T = 4480 N	F_C = 4319 N
	M_f = 632 N·m
	M_T = 50 N·m

O dimensionamento do componente é feito como se de uma viga encastrada livre se tratasse. Embora esta aproximação não seja a mais correta, uma vez que o comprimento do componente não é muito superior à sua largura, facilita bastante o seu dimensionamento.

A primeira etapa do dimensionamento é calcular as tensões nos pontos críticos. Neste caso, tanto a força de compressão como a força de torção são uniformes ao longo de toda a peça. Por outro lado o momento fletor é maior em pontos mais distantes do ponto de aplicação da força. Desta forma o ponto crítico encontra-se na zona de encastramento, e como tal, será nesse ponto que se irão calcular as tensões normais. Considera-se uma secção circular cujo diâmetro interno e externo são 40mm e 44mm respetivamente.

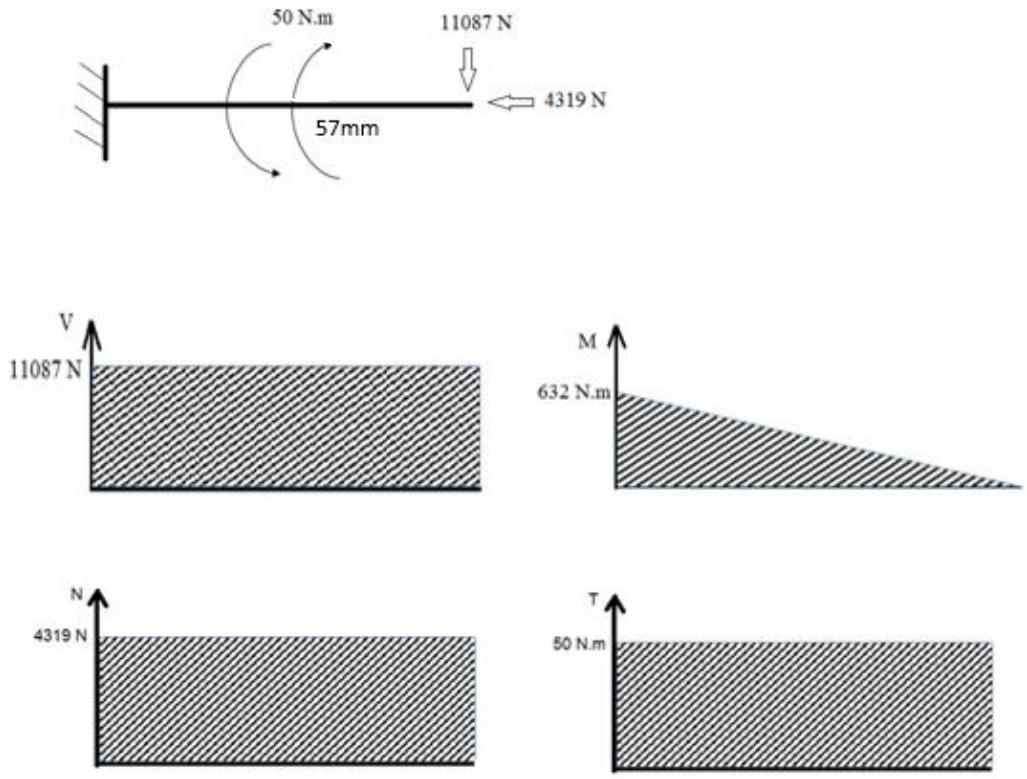


Figura 46 - Representação das forças aplicadas na peça e dos diagramas de esforços.

$$\sigma_f = \frac{M_f \times y}{I} = \frac{632 \times 0.022}{\frac{\pi(0{,}022^4 - 0{,}02^4)}{4}} = 238\ MPa \tag{20}$$

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{4319}{\pi \times (0{,}022^2 - 0{,}02^2)} = 16\ MPa \tag{21}$$

$$\tau = \frac{M_t \times b}{I_p} = \frac{50 \times 0.022}{\frac{\pi(0.022^4 - 0.02^4)}{2}} = 9430642\ Pa = 9{,}4\ MPa \quad (22)$$

A segunda etapa consiste em determinar as tensões principais

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_c + \sigma_f}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_c - \sigma_f}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (23)$$

$$= \frac{16 + 238}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{16 - 238}{2}\right)^2 + 9{,}4^2}$$

$$\sigma_1 = 239\ MPa$$

$$\sigma_2 = 16\ MPa$$

$$\sigma_3 = 0\ MPa$$

No final é necessário adotar um critério de falha para verificar a segurança do componente. [28] Os principais critérios de falha para materiais dúcteis são o critério de Tresca e de Von Mises. Neste projeto será utilizado o critério de Von Mises, para facilitar uma posterior comparação com os resultados obtidos no Solidworks.

$$\frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2(\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}} \leq \sigma_{ced} \quad (24)$$

$$\frac{\sqrt{(239 - 16)^2 + (239 - 0)^2(0 - 16)^2}}{\sqrt{2}} = 231\ MPa$$

Como se pode verificar a tensão equivalente de Von Mises é superior à tensão de cedência do material e como tal é necessário alterar a espessura do componente. Uma vez que a bobina se vai alojar no interior do componente o seu raio interno não se pode alterar. Desta forma o que irá variar será o seu raio externo. O gráfico da figura 47 representa a relação entre o raio externo do componente e a tensão equivalente de Von Mises (azul).

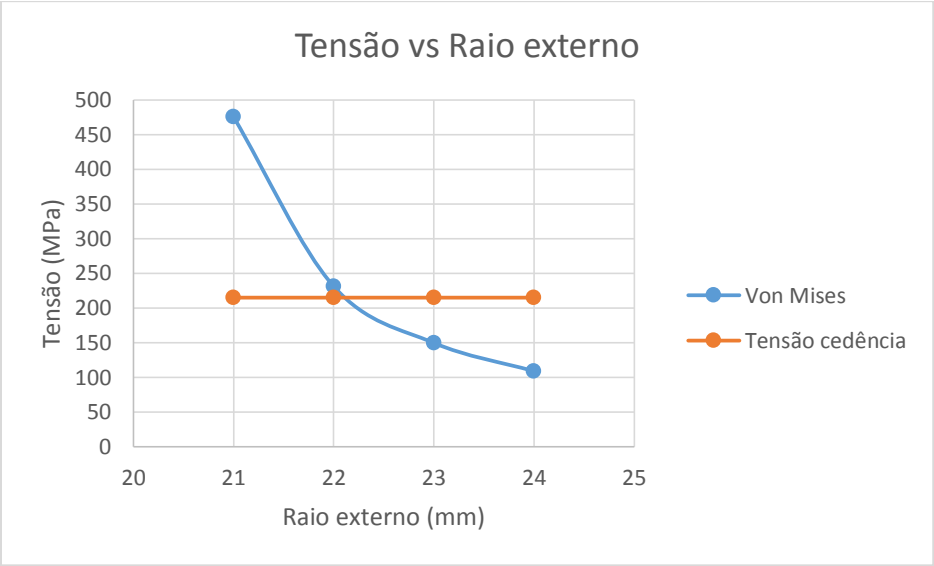


Figura 47 - Gráfico tensão - raio externo.

Através da interseção das duas retas é possível determinar o raio externo mínimo que confere segurança ao componente. Conclui-se então que a partir dos 22,2 mm a tensão equivalente de Von Mises é inferior à tensão de cedência do material, o que lhe concede segurança. Tal facto está também comprovado na tabela 10 que apresenta as tensões obtidas no componente com um raio externo de 23mm.

Tabela 10 - Tensões obtidas no componente com diâmetro externo de 23mm

σ_c (MPa)	10,6	σ_1 (MPa)	154,7
σ_f (MPa)	154,4	σ_2 (MPa)	10,4
τ (MPa)	6,1	σ_3 (MPa)	0
Von Mises (MPa)		149,8	
Tensão cedência (MPa)		215	

5.3. ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Depois do dimensionamento analítico é importante fazer um dimensionamento computacional para posterior comparação. Para o efeito foi feita uma análise de elementos finitos no Solidworks de forma a obterem-se as tensões equivalentes de Von Mises bem como os níveis de deformação.

Como a norma refere, o componente deve suportar uma torção de 50N.m. Uma vez que a torção é feita ao nível do furo, a força aplicada será:

$$M_t = F \times b \Leftrightarrow 50 = F * \left(R_i + \frac{R_e - R_i}{2}\right) \Leftrightarrow F = \frac{50}{0.021}\ F = 2381\ N \quad (25)$$

Quanto ao momento fletor, este é máximo na zona de encastramento e é igual a 632 N.m. Para obter a força aplicada basta dividir o momento pelo comprimento do componente.

$$M_{fmax} = F \times b \Leftrightarrow 632 = F * 0.057 \Leftrightarrow F = 11087\ N \quad (26)$$

A força de compressão e de flexão foram aplicadas na tampa do encaixe, enquanto que a força que provoca a torção foi aplicada no furo onde será colocado um pino de forma a evitar a rotação. O encastramento foi feito na zona inferior onde se vai localizar a rosca. Apesar da ligação se fazer por intermédio de uma rosca, esta está desprovida de movimento de rotação devido à chaveta existente no mecanismo de engate/desengate.

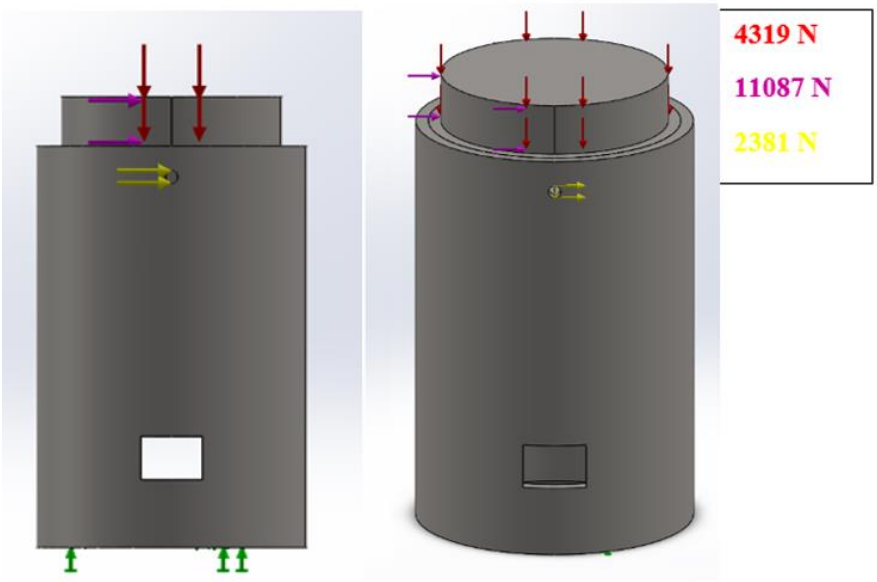


Figura 48 - Representação das forças aplicadas para análise de elementos finitos.

As tensões equivalentes de Von Mises e os deslocamentos obtidos no Solidworks estão representados na figura 49.

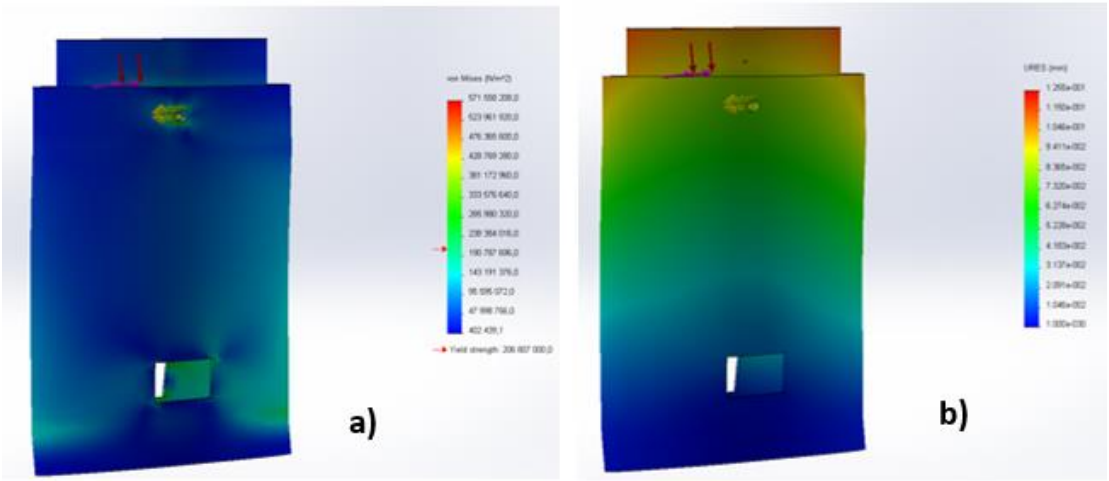


Figura 49 – Análise de elementos finitos para um raio externo de 22mm: a) Distribuição das tensões equivalentes b) Distribuição das deformações.

No dimensionamento analítico concluiu-se que o ideal seria aumentar o raio externo para 23 mm. Como forma de comprovar esse resultado fez-se também uma análise de elementos finitos para esta situação. Os resultados encontram-se na figura 50.

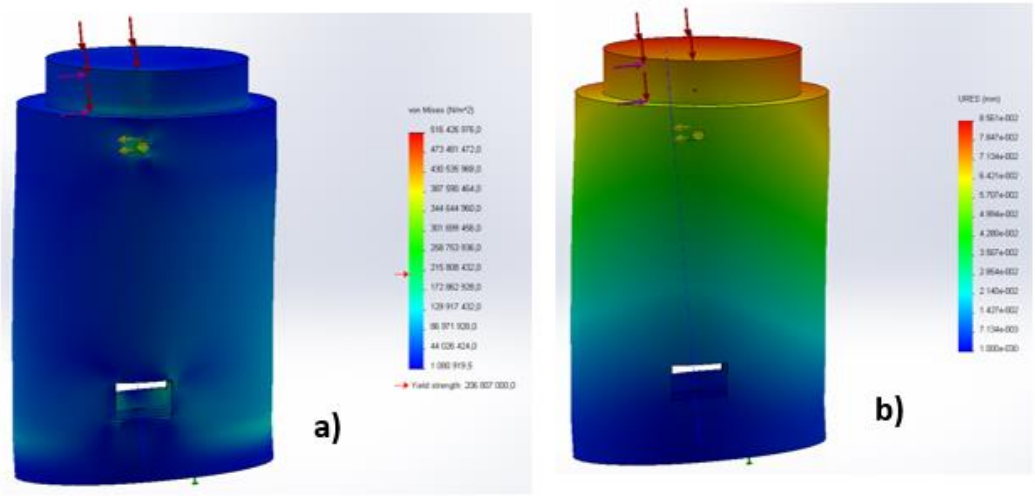


Figura 50 - Análise de elementos finitos para um raio externo de 23mm: a) Distribuição das tensões equivalentes b) Distribuição das deformações.

Os resultados obtidos analiticamente e no Solidworks encontram-se na tabela 11. Estes correspondem à zona de encastramento, onde se verificou tensões mais elevadas. Os resultados apresentam uma ligeira diferença uma vez que, analiticamente, a estrutura foi aproximada a uma viga encastrada livre.

Tabela 11- Tensões de Von Mises obtidas na zona crítica

Raio (mm)	Solidworks (MPa)	Analítico (Mpa)
22	250	231
23	149	170

Outro componente importante é o pino que será introduzido no furo com o objetivo de impedir a rotação dos componentes. Este pino estará sujeito a tensões de corte e como tal é necessário fazer o seu dimensionamento para evitar a rotura. Sabendo a tensão de cedência ao corte e a força que será aplicada no pino é possível determinar o raio mínimo do furo segundo a equação 28.

$$\tau_{ced} \geq \frac{F}{A} \tag{27}$$

Uma vez que a tensão se cedência ao corte é metade da tensão de cedência do material então: [29]

$$\frac{\sigma_{ced}}{2} \geq \frac{F}{A} \quad \Leftrightarrow \tag{28}$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{215 \times 10^6}{2} \geq \frac{2381}{\pi R^2} \quad \Leftrightarrow$$

$$R \geq 2.6\ mm$$

Conclui-se então que o furo deve ter no mínimo 4.8mm de diâmetro. Depois de definida a geometria é possível obter as tensões de contacto recorrendo à equação 30.[30]

$$\sigma_{cont} = \frac{F}{A} = \frac{2381}{t \cdot d} = \frac{2381}{0.0065 \times 0.0048} = 76\ MPa \tag{29}$$

$$\sigma_{cont} \leq \sigma_{ced} \Leftrightarrow \frac{F}{A} \leq \sigma_{ced} \Leftrightarrow \frac{2381}{t \times d} \leq 215 \times 10^6$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow t \times D \geq 11 \times 10^{-6}$$

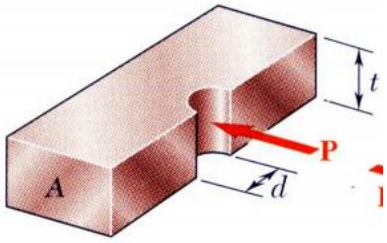


Figura 51 - Representação das variáveis para o cálculo da tensão de contacto.

No dimensionamento analítico do componente verificou-se que o raio interno mínimo deveria ser 23 mm portanto a espessura mínima seria 3mm.

$$D \geq \frac{11 \times 10^{-6}}{0{,}003} \Leftrightarrow D \geq 3.6mm$$

Reunindo as condições da equação 29 e da equação 30 conclui-se que o diâmetro do furo e, consequentemente, do pino deverá ser superior a 5.2mm de forma a resistir às tensões de corte e de contacto.

5.4. DISCUSSÃO

Como se pode observar, os resultados obtidos no dimensionamento analítico são semelhantes aos obtidos por análise de elementos finitos. Na figura 49 observa-se que na zona inferior da peça a tensão equivalente de Von Mises ultrapassa ligeiramente a tensão admissível do material. Isto ocorre porque é nessa zona que o momento fletor atinge o seu valor máximo – zona crítica. Analiticamente também se verifica que nessa zona a tensão equivalente (231MPa) é superior à tensão de cedência do material (215MPa).

Relativamente aos deslocamentos, a norma valida os componentes cuja deformação não exceda os 5mm. Como se verifica na figura 49b os deslocamentos obtidos não chegam a atingir o milímetro o que significa que está em conformidade com os requisitos.

Depois de comprovado que a espessura usada na peça não seria a ideal para suportar aquelas cargas foi necessário determinar o raio externo que concedesse uma maior estabilidade à peça. Conclui-se então, analiticamente, que o raio externo mínimo seria de 23mm. A figura 50 demonstra a análise de elementos finitos para uma peça com uma espessura de 3mm e de facto não se observa nenhuma zona cuja tensão equivalente seja superior à tensão admissível.

Por fim, foi necessário determinar o diâmetro do pino para evitar a rotura do mesmo. Concluiu-se assim, que o diâmetro mínimo do furo deveria ser 5.2mm.

CAPÍTULO 6
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

A importância de dispositivos como o desenvolvido na presente dissertação prende-se com o número de amputações a nível mundial e com a dificuldade que estes indivíduos têm em realizar determinadas atividades.

O mecanismo desenvolvido neste projeto permite que o individuo faça a substituição do sistema protésico com o mínimo esforço possível. Em termos de custo, este pode ficar ligeiramente mais caro mas este problema é compensado com o aumento do tempo de vida do dispositivo.

A bobina utilizada, bem como a fonte de alimentação (pilhas de Lítio) superaram um pouco as dimensões pretendidas, o que faz com que este mecanismo apenas possa ser utilizado em próteses ajustáveis. No entanto esta situação não é relevante devido ao facto deste tipo de prótese ser cada vez mais usual.

O indivíduo pode ainda optar por utilizar o mecanismo mecânico, bastando para isso retirar o componente de interface entre os componentes de fixação e o sistema protésico. Neste caso seria o próprio individuo a mover o colar que provoca o engate/desengate.

Por fim, com a análise de elementos finitos e dimensionamento analítico concluiu-se que os componentes resistiam às forças solicitadas, cumprindo assim os requisitos da norma internacional ISO 10328:2006 (*Prosthetics - Structural testing of lower limb prostheses - Requirements and test methods).*

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro, essencial para o progresso e solidez do projeto, destaca-se:

- A realização de ensaios estáticos e ciclos
- A validação em campo do sistema.
- A validação do sistema para diferentes níveis de atividade física
- O melhoramento das dimensões da fonte de alimentação
- Conceção e desenvolvimento de um revestimento para o sistema

CAPÍTULO 7
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Estêvão, R. (2009). *Desenvolvimento de uma Prótese Transtibial Endoesquelética*. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro.

[2] World Health Organization (2004). *The Rehabilitation of People with Amputations*. USA.

[3] Brigham and women's hospital (2011) *Standard of Care: Lower Extremity Amputation*. USA.

[4] Ottobock HealthCare GmbH. *Amputation types*. Acedido a 3 de Dezembro em: http://professionals.ottobock-export.com/cps/rde/xchg/ottobock_export_en/hs.xsl/229.html

[5] Stanby, G. (2007). *Amputation*. Acedido a 3 de Dezembro em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263931906700588

[6] Ossur Brasil. *Catálogo de próteses Össur*. Acedido a 3 Dezembro em: http://www.ossur.com.br/

[7] Hagelstein, S. (2012). *Mechanical Leg*. Acedido a 3 de Dezembro em: https://grabcad.com/library/mechanical-leg

[8] Ossur Brasil. *Níveis de impacto.* Acedido a 3 Dezembro em: http://www.ossur.com.br/?PageID=13742

[9] Costa, C. (2013) *Desenvolvimento de dispositivos protésicos para aplicação em doentes com amputação da perna*. Tese de Mestrado. Universidade do Minho.Braga.

[10] Benson, R. M. (2005). *Quick-Release Tube Clamp For Modular Lower Limb Prosthetic Systems and Method Thereof*. US. Acedido a 3 de Dezembro em: http://www.google.com/patents/US6972042

[11] Ferrier, L. (1994). *Self aligning and quick coupling device for a prosthesis*. US. Acedido a 3 de Dezembro em: https://www.google.com/patents/US5326352

[12] Ferrier Couples Inc. (2007). *Ferrier Couplers*. Acedido a 3 de Dezembro em: https://www.google.com/patents/US5326352

[13]Brown, M. (2007). *Capping device with quick release mechanism*. Acedido a 3 de Dezembro em: http://www.google.com/patents/CA2562342A1?cl=en

[14] Bureau of Naval Personnel. (2002). *Curso completo de eletricidade básica*. Brasil. Hemus. Acedido a 3 de Dezembro em: http://books.google.pt/

[15] Faria, R. N. (2005*) Introdução ao magnetismo dos materiais*. São Paulo. Livraria da Física. Acedido a 3 de Dezembro em: http://books.google.pt/

[16] Askeland D. *Science and Engineering of Materials.* 6ª ed. Canada. SI Edition. ISBN: 978-0-495-66802-2

[17] Luiz, A. (2008) *Eletromagnetismo, Teoria e problemas resolvidos*. 1ª ed. São Paulo. Livraria da Física. ISBN: 978-85-7861-010-4

[18] Shu'aibu, D. *Design, Development and Testing of an Electromagnet for magnetic levitation system*. Nigeria. Acedido a 3 de Dezembro em: http://www.academia.edu/9265533

[19]Alber, L. E. (2012). *Aerospace Engineering on the Back of an Envelope*. USA. Springer. ISBN: 978-3-642-22536-9

[20] Eccles, W. (2011) *Pragmatic Electrical Engineering: Fundamentals*. Morgan & Claypool. ISBN: 9781608456680

[21] RS Components. *Series 67 Latching Solenoid*. Acedido a 3 de Dezembro em: http://pt.rs-online.com

[22] Multicomp. *Techinal data sheet*. Acedido a 3 de Dezembro em: http://pt.farnell.com/solenoids-linear

[23] Lawson, J. (2001). *Simple Machines*. Canadá. Portage & Main Press. ISBN: 1-894110-77-3

[24] Alves, M. (2003). *ABC das máquinas elétricas*. Porto. Acedido a 4 Dezembro em: http://pt.scribd.com/doc/203736861

[25] Power ps sonic, *Connecting Batteries in Series or Parallel*. Acedido a 4 Dezembro em: http://www.power-sonic.com/images/powersonic/literature

[26] Nielsen, D. (2006). *Practical Handbook of Environmental Site Characterization and Ground-Water*. 2ª ed. USA. CRC-Press. ISNB: 1-56670-598-4.

[27] CSI Designs. *Stainless Steel Selection Guide*. Acedido a 4 Dezembro em: http://www.csidesigns.com

[28] Peixinho, N. (2008). *Mecânica dos Materiais*. Universidade do Minho. Braga.

[29] Oberg, E. (2000) *Machinery's Handbook.* 26ª ed. NY. Industrial press inc. ISBN:0-8311-2625-6

[30] Correia, V. (2011) *Mecânica dos Materiais*. Acedido a 4 Dezembro em: http://www.enautica.pt/publico/professores

ANEXOS

ANEXO I

ISO 10328: 2006

Em anexo constam os dados dirigidos pela norma internacional(ISO 10328:2006 - Prosthetics – Structural testing of lower limb prostheses- Requirements and test methods), sobre as forças de teste e os requisitos que as amostras devem respeitar no sentido de apresentarem conformidade. Esta força de teste varia de acordo como o peso do indivíduo e, como tal, a norma apresenta três níveis padrão de cargas de teste. Neste projeto apenas se considera o nível mais elevado (P5) que corresponde a indivíduos com 100Kg.

Tabela 12 - Força de teste normalizadas para o nível P5

Procedimento de teste e força de teste (N)			**Tipo de teste e nível, P_x e condição de carga (I e II)**	
			I	**II**
Ensaios estáticos e cíclicos	Força de estabilização	F_{stab}	50	
	Pré-carga	F_{pc}	1024	920
Ensaios estáticos	Força de prova	F_p	2240	2013
	Força limite	$F_{L\ Limite\ inferior}$	3360	3019
		$F_{L\ Limite\ superior}$	4480	4025

Tabela 13 - Momentos de torção referentes ao teste estático de torção

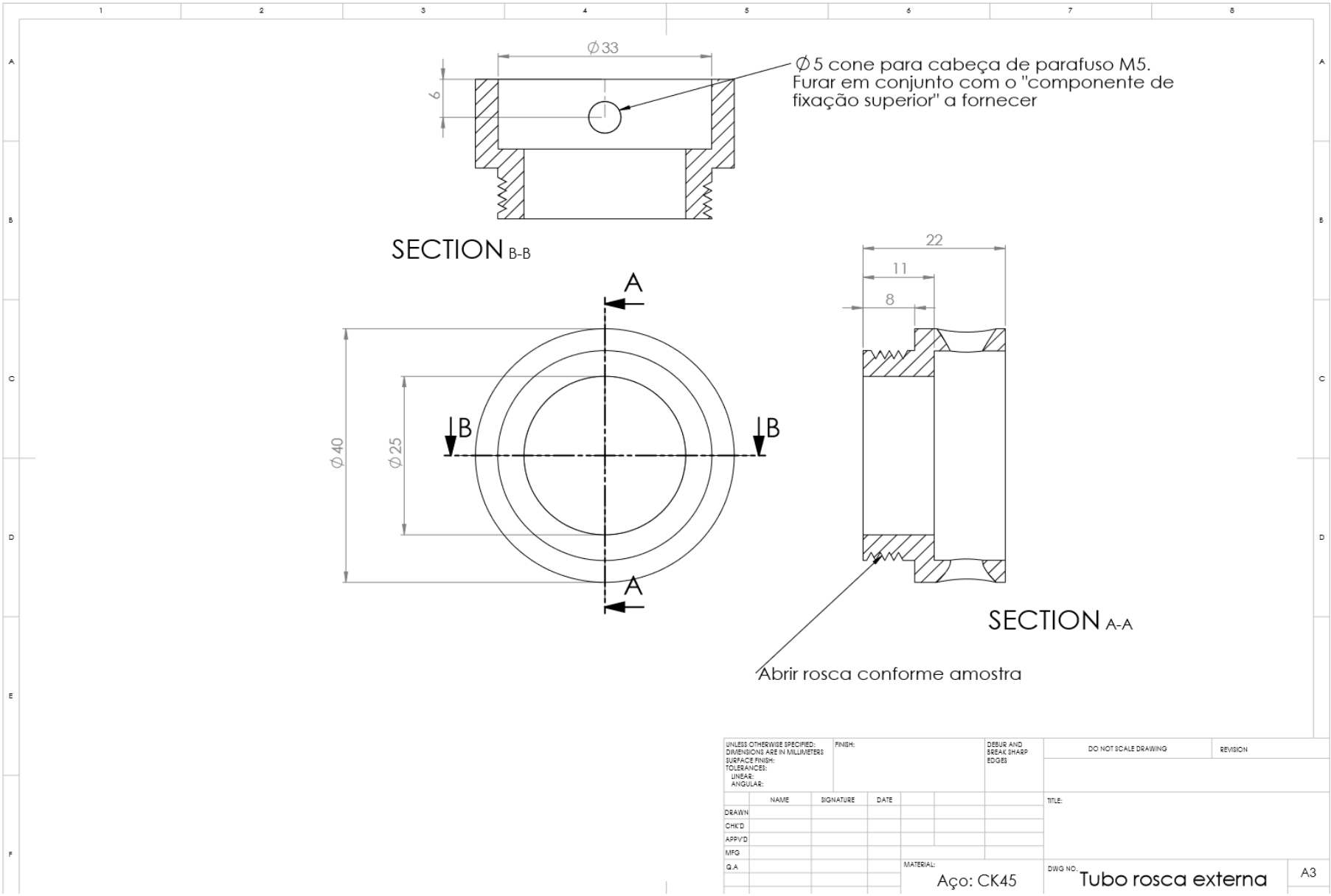
Nível de teste	**Momento de torção de configuração, M_{CONF}**	**Momento de torção de estabilização, M_{STAB}**	**Momento de torção máximo, M_{MAX}**
P5	3 N.m	1N.m	50 N.m

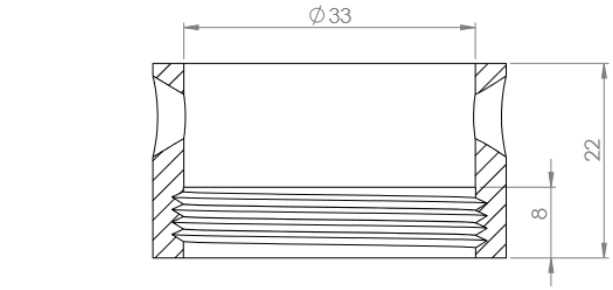
Tabela 14 - Organização dos requisitos de teste conforme enunciado pela norma

Tipos de ensaios	**Requisitos**
Estáticos de prova	A amostra deve ser capaz de suportar F_p durante 30±3s, e o valor da deformação permanente não deverá exceder os 5 mm multiplicado pela razão: [(ut-ub)atual/ (ut-ub)especificados], para valores de amostras com um comprimento superior a 650 mm.
Estáticos limite	A amostra deve suster $F_{L\ Limite\ inferior}$ ou $F_{L\ Limite\ superior}$ sem falha estrutural da amostra.
Estático de torção	A amostra deve suportar M_{MAX} durante 30±3s, e o deslocamento angular relativo $\Delta_{\theta 1}$ e $\Delta_{\theta 2}$ não deve exceder os 3°.
Cíclicos	A amostra deve resistir à força cíclica, Fc(t), durante determinados ciclos prescritos, e F_p durante 30±3s.

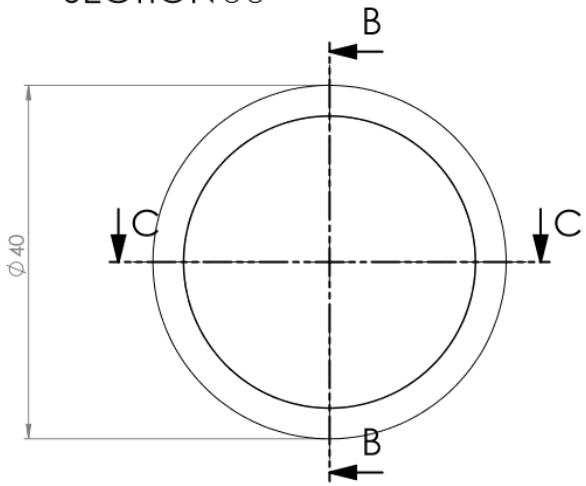
ANEXO 2
DESENHOS TÉCNICOS

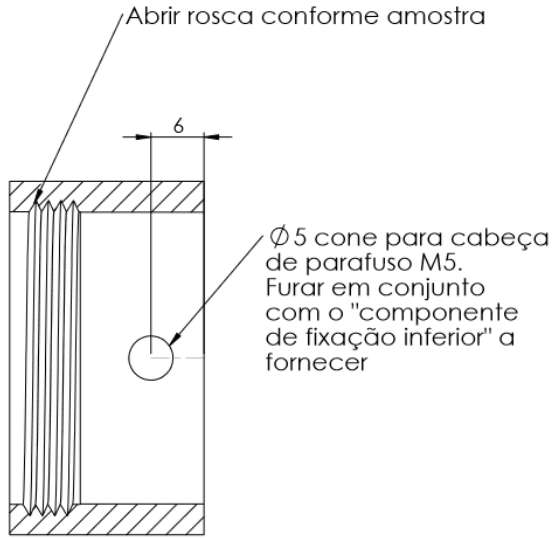
Em anexo constam os desenhos técnicos de cada um dos componentes constituintes do sistema. Encontram-se também anexados componente do mecanismo que foi usado como ponto de partida, uma vez que sofreram algumas alterações.


Ø33
6
Ø 5 cone para cabeça de parafuso M5.
Furar em conjunto com o "componente de fixação superior" a fornecer
SECTION B-B
A
B
B
A
Ø40
Ø25
22
11
8
SECTION A-A
Abrir rosca conforme amostra
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:
FINISH:
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES
DO NOT SCALE DRAWING
REVISION
NAME
SIGNATURE
DATE
DRAWN
CHK'D
APPV'D
MFG
Q.A
TITLE:
MATERIAL:
Aço: CK45
DWG NO.
Tubo rosca externa
A3



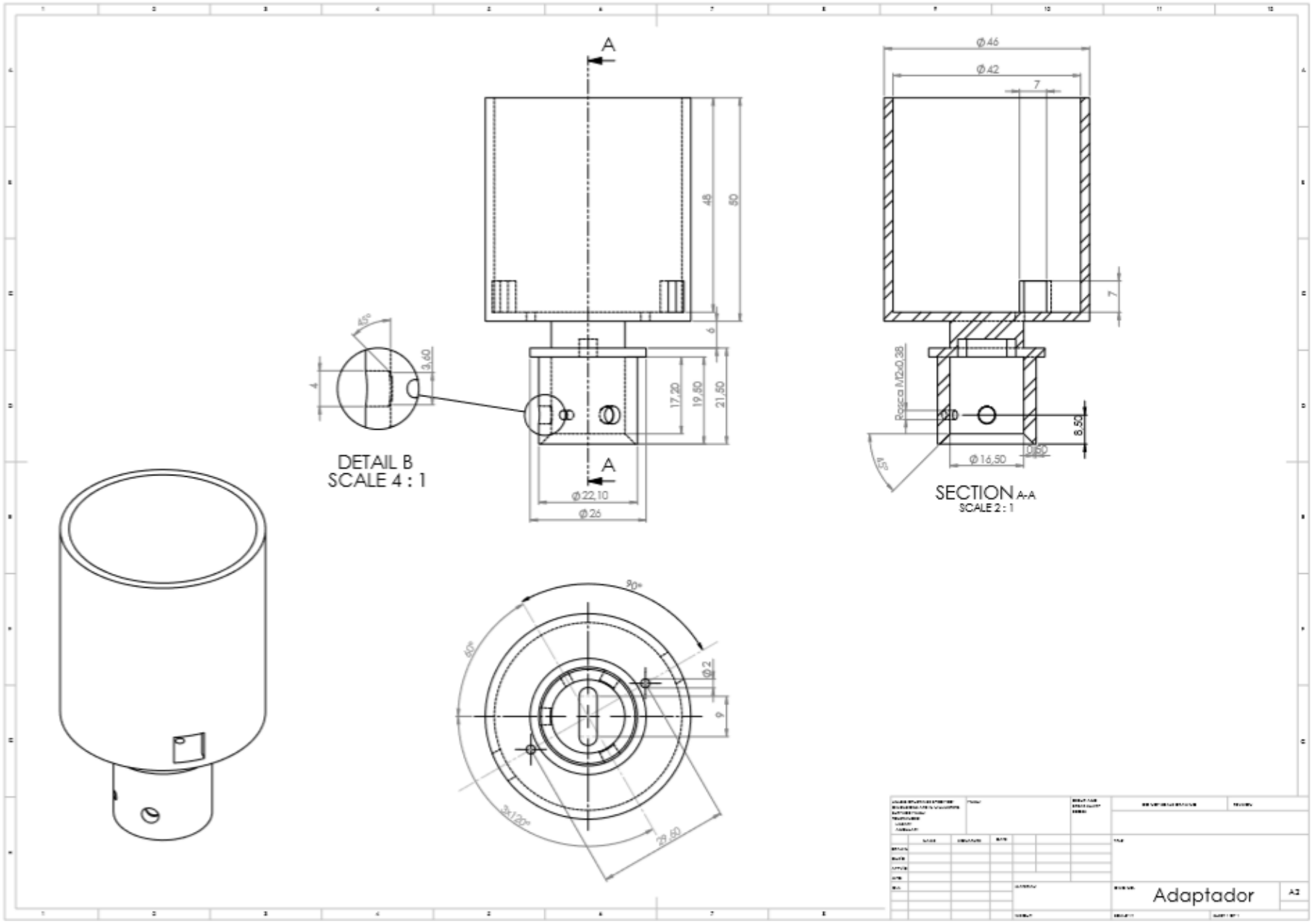
SECTION C-C

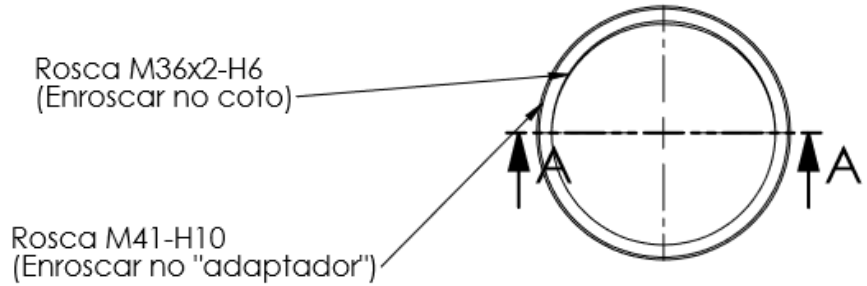


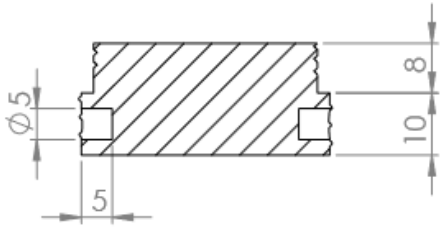


SECTION B-B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN							
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL: Aço: CK45		DWG NO. Tubo rosca interna	A3
				WEIGHT:		SCALE:2:1	SHEET 1 OF 1

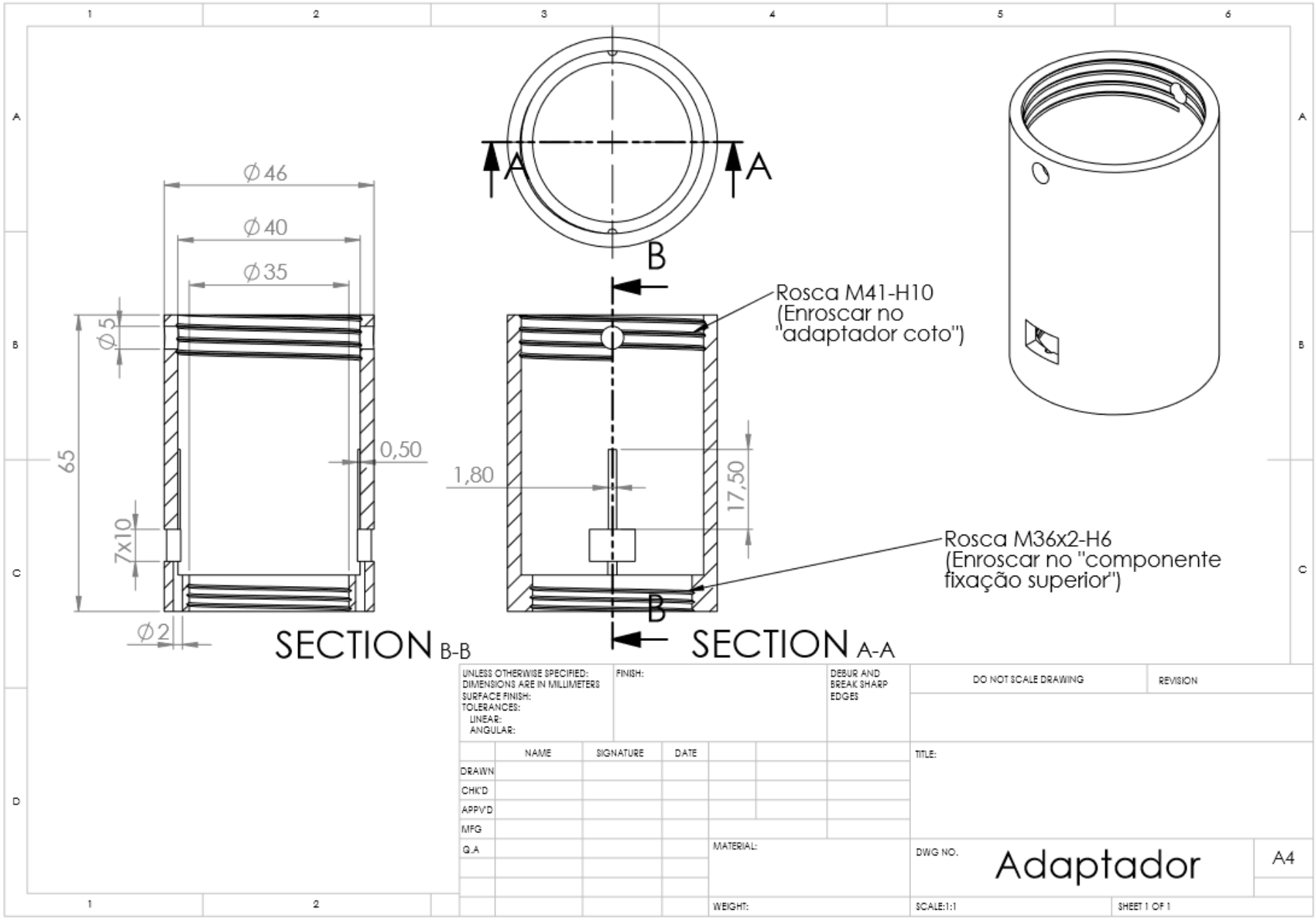

A
48
60
6
17,20
19,80
21,80
45°
3,60
4
DETAIL B
SCALE 4 : 1
Ø22,10
Ø26
A
Ø46
Ø42
7
7
Rosca M2x0,38
8,50
Ø16,50
SECTION A-A
SCALE 2 : 1
90°
60°
Ø2
9
3x120°
29,60
Adaptador
A2

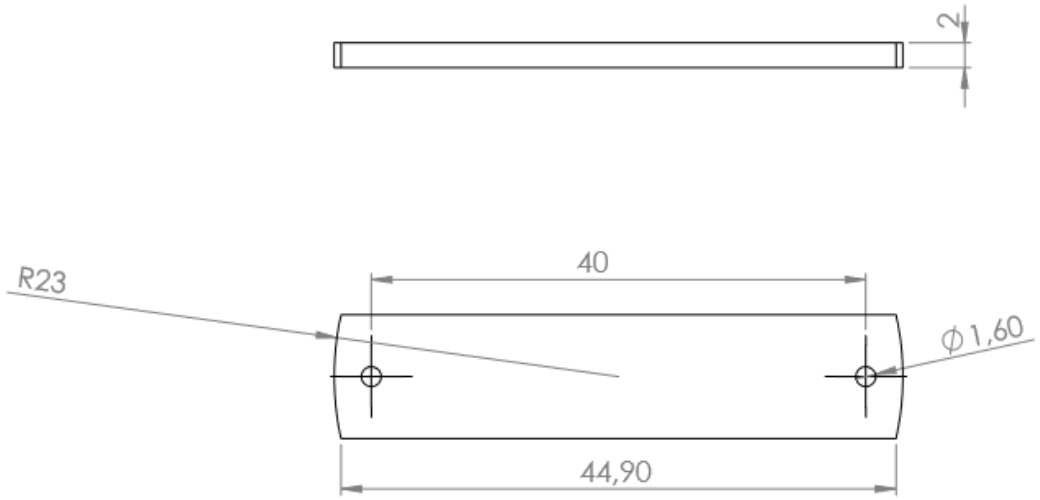




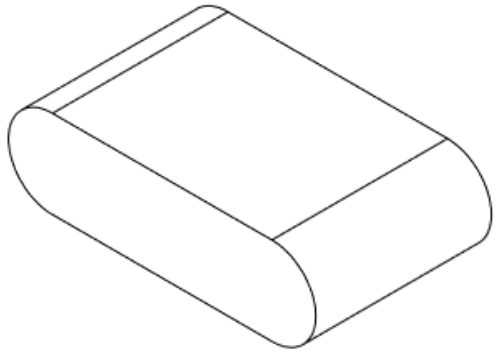
SECTION A-A

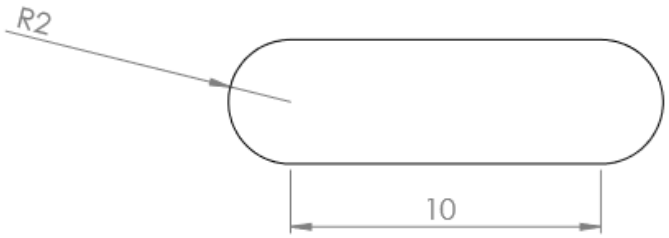
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:			DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN							
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL:		DWG NO. Adaptador coto	A4
				WEIGHT:		SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1


Ø46
Ø40
Ø35
Ø5
65
0,50
7x10
Ø2
A
A
B
B
Rosca M41-H10
(Enroscar no
"adaptador coto")
1,80
17,50
Rosca M36x2-H6
(Enroscar no "componente
fixação superior")
SECTION B-B
SECTION A-A
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:
FINISH:
DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES
DO NOT SCALE DRAWING
REVISION
NAME
SIGNATURE
DATE
DRAWN
CHK'D
APPV'D
MFG
Q.A
MATERIAL:
WEIGHT:
TITLE:
DWG NO.
Adaptador
A4
SCALE:1:1
SHEET 1 OF 1

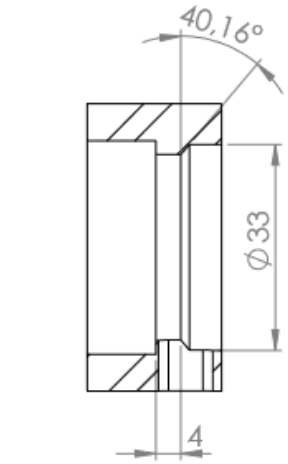


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:			DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN							
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL:		DWG NO. Chapa	A4
				WEIGHT:		SCALE:2:1	SHEET 1 OF 1

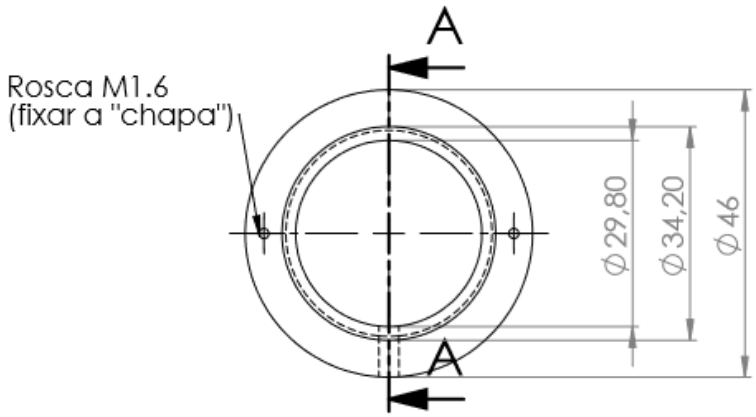


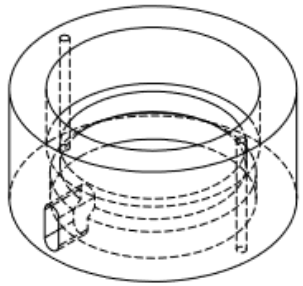


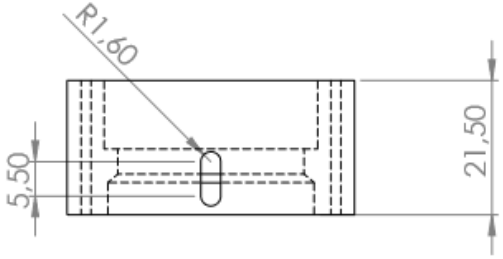
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:				DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE:	
DRAWN								
CHK'D								
APPV'D								
MFG								
Q.A				MATERIAL:			DWG NO. Chaveta	A4
				WEIGHT:			SCALE:5:1	SHEET 1 OF 1



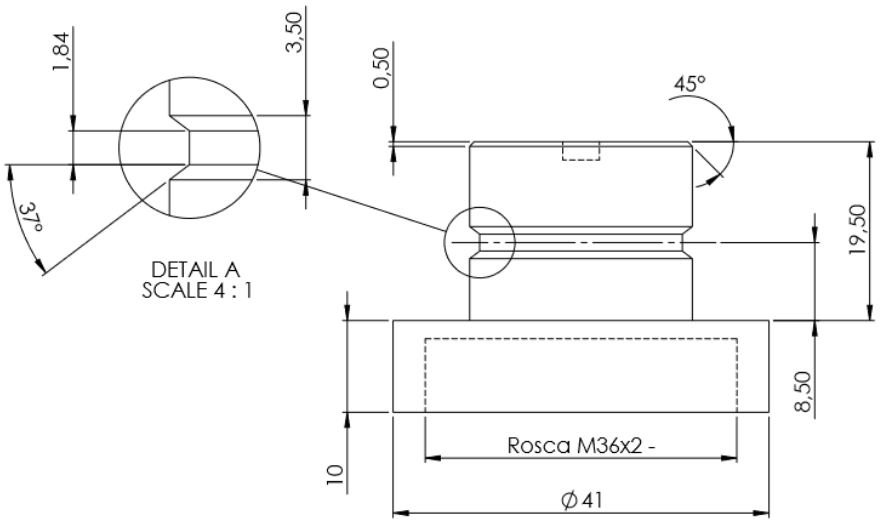
SECTION A-A

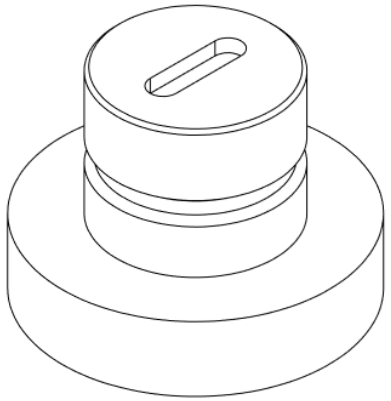


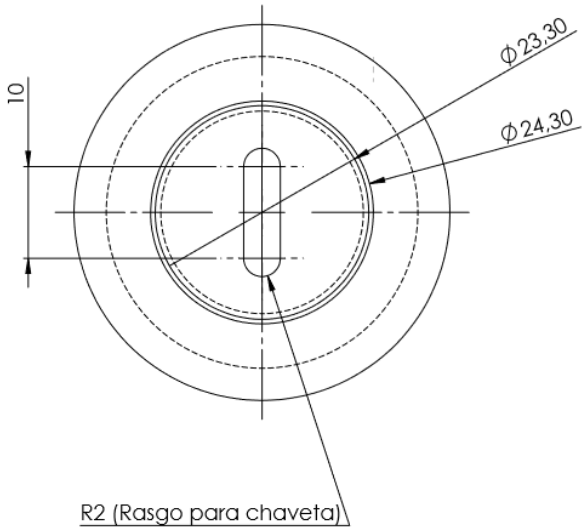




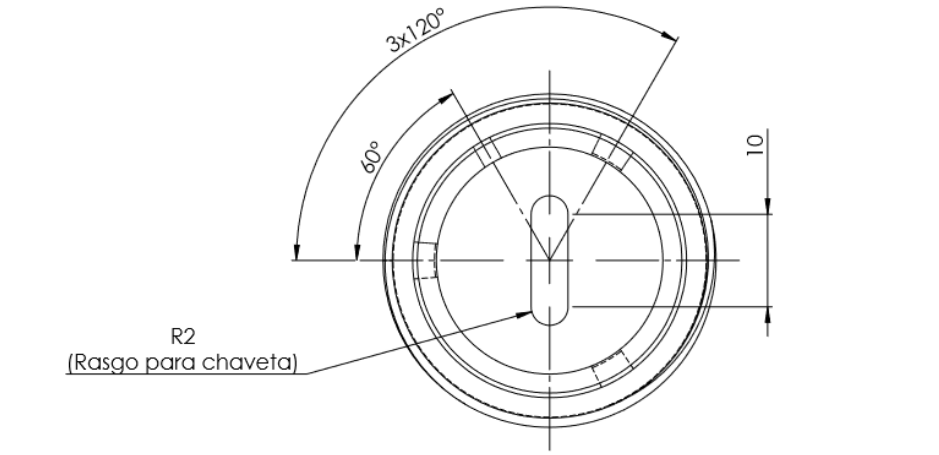
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:			DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING / REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:
DRAWN						
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A				MATERIAL:		DWG NO. Colar / A4
				WEIGHT:		SCALE:1:1 / SHEET 1 OF 1

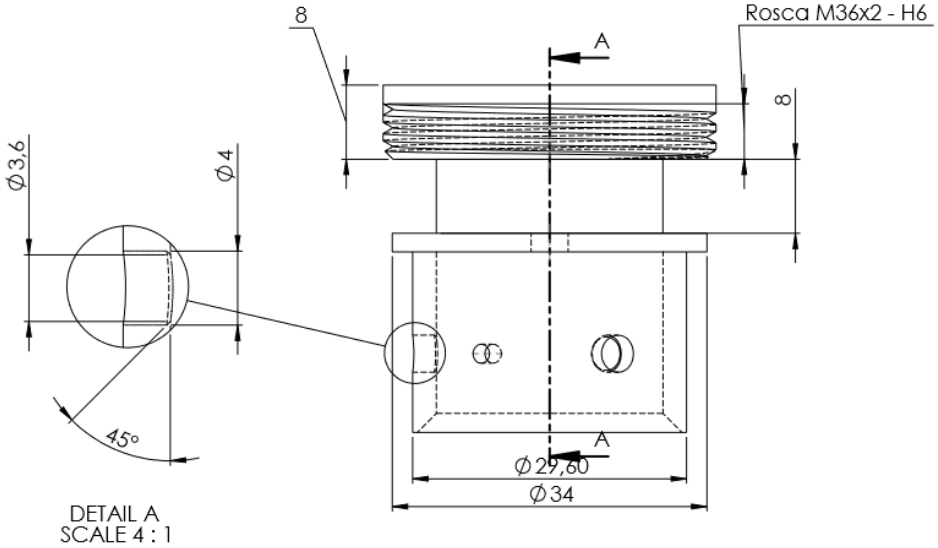




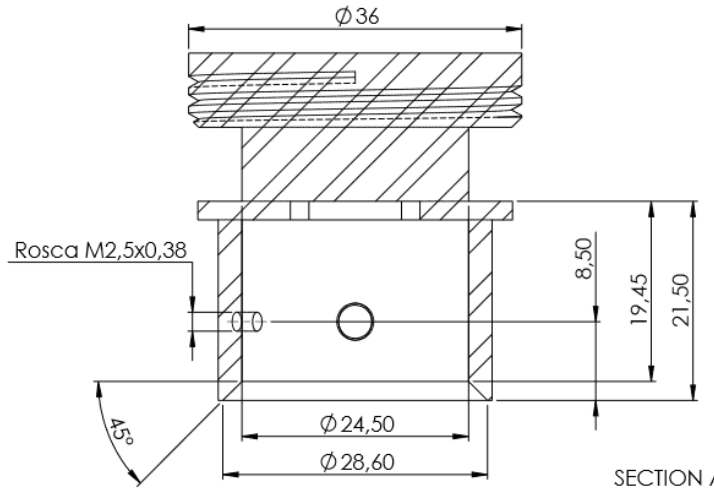


TÍTULO:	
MATERIAL: Ticp Grau 4	NOME DO COMPONENTE: Componente de fixação inferior
A4	
QUANTIDADE:1	ESCALA:2:1 FOLHA AXII.134



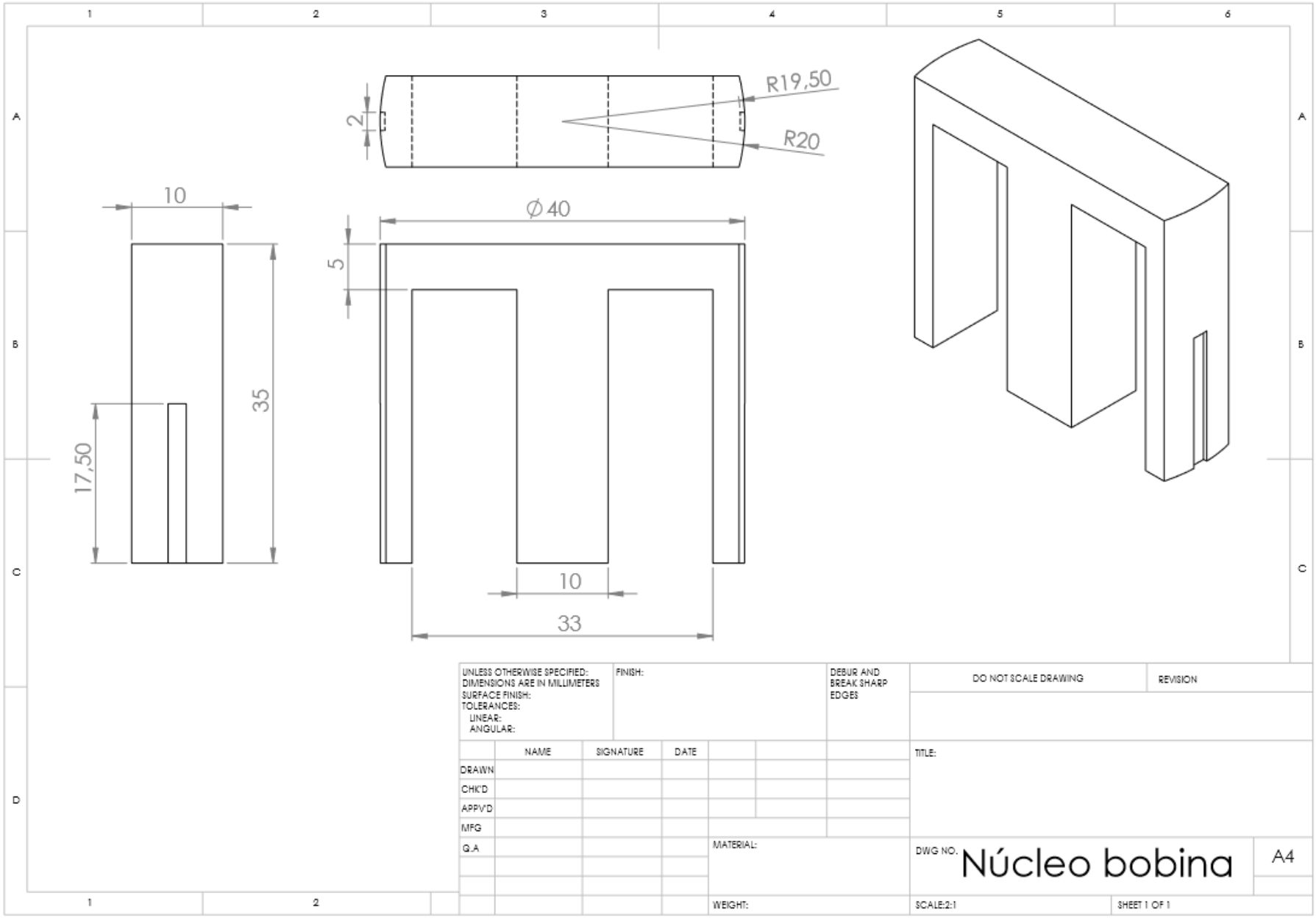


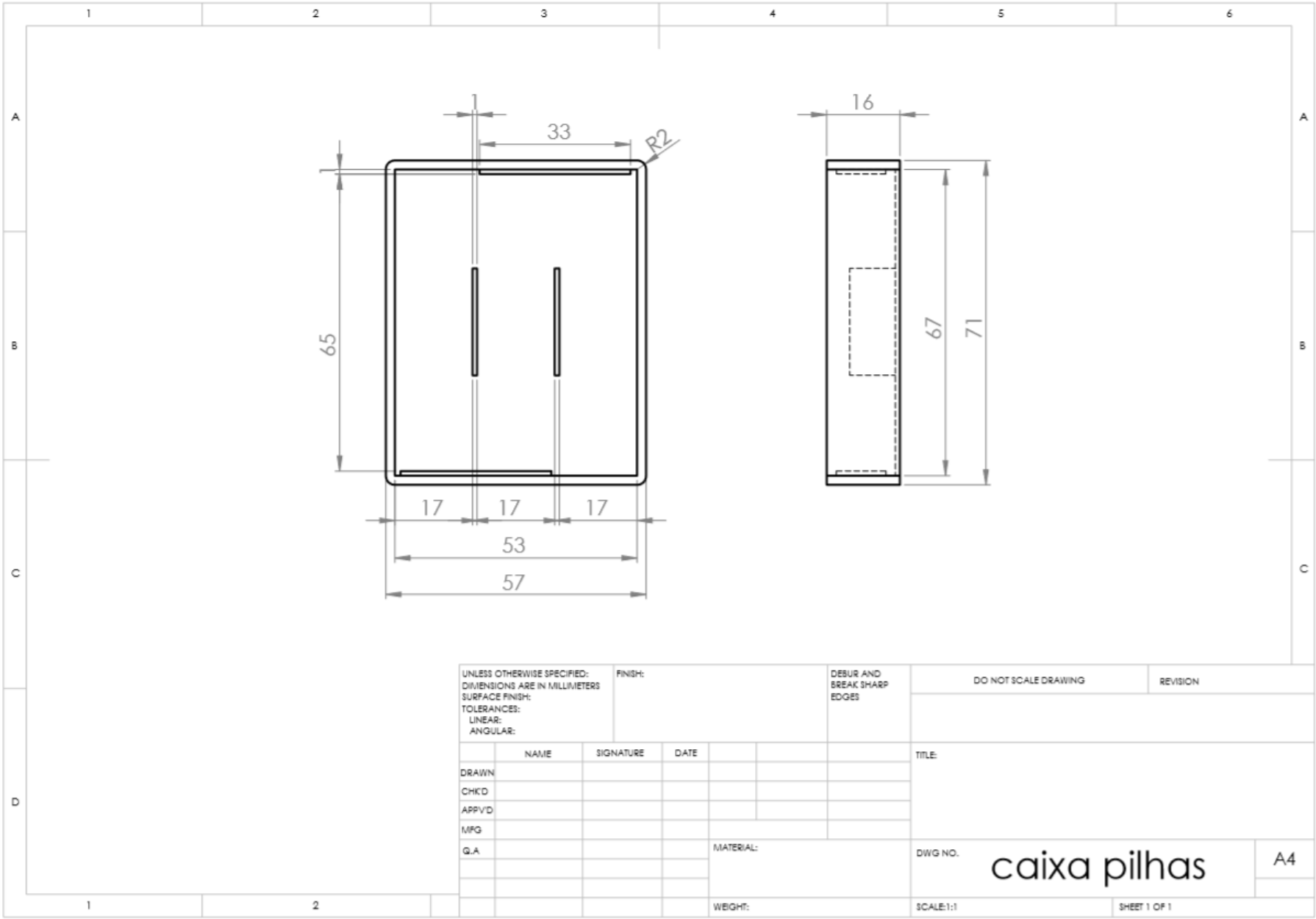
DETAIL A
SCALE 4 : 1



SECTION A-A

TÍTULO:		
MATERIAL:	NOME DO COMPONENTE: Componente de fixação superior	A4
QUANTIDADE:1	ESCALA:2:1 FOLHA	AXII.131


1
2
3
4
5
6
A
B
C
D
R19,50
R20
2
10
Ø40
5
35
17,50
10
33
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:
FINISH:
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES
DO NOT SCALE DRAWING
REVISION
NAME
SIGNATURE
DATE
DRAWN
CHK'D
APPV'D
MFG
Q.A
MATERIAL:
WEIGHT:
TITLE:
DWG NO.
Núcleo bobina
A4
SCALE:2:1
SHEET 1 OF 1


1
33
R2
65
17
17
17
53
57
16
67
71
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:
FINISH:
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES
DO NOT SCALE DRAWING
REVISION
NAME
SIGNATURE
DATE
DRAWN
CHK'D
APP'V'D
MFG
Q.A
MATERIAL:
WEIGHT:
TITLE:
DWG NO.
caixa pilhas
A4
SCALE:1:1
SHEET 1 OF 1