

# **Comando de uma Máquina de Ensaios de Resistência à Torção de Juntas Adesivas**

*Sérgio Miguel Oliveira Costa*

**Relatório do Projeto Final / Dissertação do MIEM**

Orientadores:

Prof. António Mendes Lopes

Inv. Carlos Moreira da Silva

Prof. Lucas F.M. da Silva



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Fevereiro 2015



*Tenho em mim todos os sonhos do mundo...*



## Resumo

O Grupo de Adesivos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ADFEUP, pretende obter um dispositivo capaz de realizar ensaios de juntas adesivas estruturais à torção, de forma a utilizar os resultados como uma mais-valia para investigação nesta área.

O projeto da máquina foi dividido em três partes, uma que visa a automatização, outra que trata do projeto mecânico (realizadas em anos anteriores), sendo a terceira a construção mecânica e a implementação do controlo, retratadas nesta dissertação.

Para a construção, foram adquiridos vários componentes, como acoplamentos, rolamentos, guias, entre outros e foram desenvolvidas melhorias e alterações em muitas partes relativamente à solução inicial.

A máquina é controlada por um computador. No que diz respeito ao controlo, foi utilizado o software *Matlab*® *Simulink*®, sendo a interface gráfica baseada no *Matlab*® *GUIDE*.

A máquina consegue efetuar quatro testes diferentes de ensaios à torção, sendo fáceis de programar através de uma interface gráfica.



## Abstract

The Adhesives Group of the University of Porto (ADFEUP) intends to get a device to test adhesive joints in torsion in such a way that the results can be used as an added-value in research.

The machine's project was divided into three parts, which are described in this dissertation. The first one is related to the automatization, the second one deals with the mechanical project (done in previous years) and the third one is the mechanical construction and the control implementation.

In order to build the machine, many components were purchased such as couplings, bearings, guides as well as improvements and changes were developed in many parts comparatively to the initial solution.

The machine is controlled by a computer. As far as control is concerned, *Matlab*® *Simulink*® software was used, being the graphic interface based on the *Matlab*® *GUIDE*.

The machine is able to run four different types of torsion tests, all of them easy to program through a graphic interface.



## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus orientadores, Professor António Mendes Lopes, Professor Lucas F. M. da Silva e Investigador Carlos Moreira da Silva, que ajudaram-me na concretização desta dissertação, tendo tido a disponibilidade total.

Quero agradecer também aos meus pais e amigos, pelo apoio transmitido desde o primeiro dia.

Ao Sr. Joaquim, pela ajuda e disponibilidade demonstradas no esclarecimento de dúvidas relacionadas com o quadro elétrico.

A eles, o meu obrigado.

Sérgio Miguel Oliveira Costa



## Índice de conteúdos

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| Resumo .....                                        | v   |
| Abstract .....                                      | vii |
| Agradecimentos.....                                 | ix  |
| Índice de conteúdos .....                           | xi  |
| 1. Introdução .....                                 | 1   |
| 1.1 Contextualização .....                          | 1   |
| 1.2 Objetivos gerais.....                           | 1   |
| 1.3 Metodologia .....                               | 2   |
| 1.4 Estruturação da dissertação .....               | 2   |
| 2. Pesquisa bibliográfica .....                     | 3   |
| 2.1 Máquinas de torção comerciais.....              | 3   |
| 2.2 Torsiómetro da FEUP .....                       | 5   |
| 2.4 Ensaio de torção de juntas de adesivos .....    | 6   |
| 3. Princípio de funcionamento mecânico .....        | 7   |
| 3.1 Cadeia cinemática .....                         | 7   |
| 3.1.1 - Transdutor de binário.....                  | 10  |
| 3.1.2 - Embraiagem de garras.....                   | 11  |
| 3.1.3 - Acoplamento torcionalmente rígido.....      | 16  |
| 3.1.4 - Rolamentos.....                             | 19  |
| 3.1.5 - Veios de ligação bucha – acoplamento.....   | 20  |
| 3.1.6 - Buchas.....                                 | 23  |
| 3.1.7 - Provete.....                                | 23  |
| 3.1.8 - Contrapeso.....                             | 24  |
| 3.1.9 - Servomotor e redutor.....                   | 25  |
| 3.2 Base .....                                      | 28  |
| 3.3 Apoios.....                                     | 30  |
| 3.3.1 - Apoio – transdutor.....                     | 30  |
| 3.3.2 - Apoio – bucha superior.....                 | 32  |
| 3.3.3 - Apoio – bucha inferior.....                 | 33  |
| 3.3.4 - Apoio – redutor.....                        | 34  |
| 3.4 Carro móvel .....                               | 35  |
| 3.5 Mesa de suporte .....                           | 36  |
| 3.6 Guias e mangas de deslizamento.....             | 37  |
| 3.7 Contrapeso de equilíbrio das partes móveis..... | 38  |
| 3.8 Detalhes do projeto mecânico .....              | 40  |
| 3.8.1 – Simulação da embraiagem de garras.....      | 40  |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| 3.8.2 - Procedimento para alinhamento dos centros.....       | 43  |
| 3.9 – Resultado final da montagem .....                      | 44  |
| 4. Automatização do sistema .....                            | 45  |
| 4.1 – Estudo do Sistema Físico e Modelo do Sistema.....      | 45  |
| 4.1.1 – Controlo do sistema.....                             | 55  |
| 4.1.2 – Controlador de posição I-PD.....                     | 56  |
| 4.1.3 - Controlador de binário I-PD.....                     | 61  |
| 4.2 - Componentes principais da máquina .....                | 65  |
| 4.2.1 – Placa de aquisição de dados e actuação mecânica..... | 66  |
| 4.2.2 - Placa de leitura de <i>encoders</i> .....            | 67  |
| 4.2.3 – Transdutor de binário.....                           | 69  |
| 4.2.4 - Quadro elétrico.....                                 | 70  |
| 4.3 - <i>Software</i> de comando.....                        | 75  |
| 4.3.1 - Funcionamento da máquina.....                        | 75  |
| 4.3.2 - Diagrama de estados.....                             | 79  |
| 4.3.3 – Aspetos importantes da programação.....              | 82  |
| 5. Interface gráfica e programa experimental .....           | 83  |
| 5.1 – Realização dos ensaios.....                            | 83  |
| 5.2 – Adesivo seleccionado e processo de cura .....          | 91  |
| 5.3 – Fabrico dos provetes .....                             | 91  |
| 5.4 – Programa de testes .....                               | 92  |
| 6. Conclusões.....                                           | 95  |
| Referências .....                                            | 97  |
| Anexo A: Parte superior da embraiagem.....                   | 99  |
| Anexo B: Parte inferior da embraiagem .....                  | 103 |
| Anexo C: Mola.....                                           | 107 |
| Anexo D: Tampa.....                                          | 111 |
| Anexo E: Luneta.....                                         | 115 |
| Anexo F: Topo superior .....                                 | 119 |
| Anexo G: Topo inferior .....                                 | 123 |
| Anexo H: Chapa .....                                         | 127 |
| Anexo I: Apoio bucha superior .....                          | 131 |
| Anexo J: Apoio bucha inferior .....                          | 135 |
| Anexo K: Apoio redutor .....                                 | 139 |
| Anexo L: Mesa de suporte .....                               | 143 |
| Anexo M: Esquemas elétricos.....                             | 147 |
| Anexo N: Interface gráfica.....                              | 157 |

## Lista de figuras

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Máquina de torção da <i>Instron</i> ® [2].....                                                              | 3  |
| Figura 2 - Máquina de torção da <i>MTS</i> ® .....                                                                     | 4  |
| Figura 3 – Torsiómetro da FEUP .....                                                                                   | 5  |
| Figura 4 – Representação de um teste de uma junta em anel [6] .....                                                    | 6  |
| Figura 5 - Representação de um teste de uma junta sólida [6] .....                                                     | 6  |
| Figura 6 – Máquina em vista tridimensional .....                                                                       | 8  |
| Figura 7 – Identificação de componentes .....                                                                          | 9  |
| Figura 8 – Fotografia do transdutor de binário [7] .....                                                               | 10 |
| Figura 9 – Pormenor da ligação acoplamento-transdutor.....                                                             | 11 |
| Figura 10 – Pormenor da embraiagem de garras .....                                                                     | 12 |
| Figura 11 – Parte superior da embraiagem de garras .....                                                               | 12 |
| Figura 12 - Parte inferior da embraiagem de garras .....                                                               | 13 |
| Figura 13 – Esquema representativo da distribuição de tensões de corte na parte superior da embraiagem de garras ..... | 13 |
| Figura 14 – Representação 2D da parte superior da embraiagem de garras.....                                            | 14 |
| Figura 15 – Dimensões da mola (mm) .....                                                                               | 15 |
| Figura 16 – Fotografia da mola .....                                                                                   | 15 |
| Figura 17 – Fotografia das duas partes da embraiagem de garras.....                                                    | 16 |
| Figura 18 – Acoplamento <i>ARPEX RS-6 Series 78-6</i> [8] .....                                                        | 16 |
| Figura 19 – Desenho de definição do acoplamento.....                                                                   | 17 |
| Figura 20 - Desenho de definição do acoplamento .....                                                                  | 18 |
| Figura 21 – Conjunto do carro móvel (mm).....                                                                          | 19 |
| Figura 22 – Rolamento FAG 2208-TVH e esquema representativo [9].....                                                   | 19 |
| Figura 23 – Vista em pormenor do veio de ligação inferior.....                                                         | 20 |
| Figura 24 - Vista em pormenor do veio de ligação superior .....                                                        | 21 |
| Figura 25 – Fotografia dos dois veios maquinados .....                                                                 | 21 |
| Figura 26 – Vista em pormenor da tampa (versão anterior) [2] .....                                                     | 22 |
| Figura 27 - Vista em pormenor da tampa (versão atual) .....                                                            | 22 |
| Figura 28 - <i>Proxxon</i> ®, PD400 [11] .....                                                                         | 23 |
| Figura 29 – Contrapeso em <i>Solidworks</i> [2] .....                                                                  | 24 |
| Figura 30 - Servomotor <i>Parvex NX 310EAPR7301</i> .....                                                              | 25 |
| Figura 31 – Redutor planetário <i>Parvex GE3N216R0401</i> .....                                                        | 25 |
| Figura 32 – Luneta em <i>Solidworks</i> .....                                                                          | 26 |
| Figura 33 – Acoplamento rígido da marca Huco [14].....                                                                 | 26 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 34 – Fotografia da ligação servomotor - redutor.....                        | 27 |
| Figura 35 – Base parte da frente [2] .....                                         | 28 |
| Figura 36 – Base parte de trás [2].....                                            | 28 |
| Figura 37 – Solução final – Base.....                                              | 29 |
| Figura 38 – Placa Topo Superior.....                                               | 30 |
| Figura 39 – Placa Topo Inferior .....                                              | 30 |
| Figura 40 – Veio de posicionamento [2] .....                                       | 31 |
| Figura 41 – Pormenor da ligação do transdutor ao apoio [2] .....                   | 31 |
| Figura 42 – Fotografia do apoio - transdutor.....                                  | 32 |
| Figura 43 – Fotografia do apoio bucha superior .....                               | 32 |
| Figura 44 – Foto do apoio bucha inferior .....                                     | 33 |
| Figura 45 – Apoio – Redutor (solução inicial) [2] .....                            | 34 |
| Figura 46 – Fixação do Apoio – Redutor (solução inicial) [2].....                  | 34 |
| Figura 47 – Fixação do Apoio – Redutor – Solução Final .....                       | 35 |
| Figura 48 - Fotografia do apoio redutor .....                                      | 35 |
| Figura 49 - Fotografia do carro móvel.....                                         | 36 |
| Figura 50 – Fotografia da mesa. ....                                               | 36 |
| Figura 51 – Representação dos esquadros da <i>Bosch</i> em <i>Solidworks</i> ..... | 37 |
| Figura 52 – Guia veio apoiado aberto [17].....                                     | 37 |
| Figura 53 – Manga SKF LBCT 16 [17] .....                                           | 38 |
| Figura 54 – Esquema do contrapeso.....                                             | 38 |
| Figura 55 – Fotografia do contrapeso de equilíbrio das partes móveis .....         | 39 |
| Figura 56 – Condições de fronteira e carregamento na embraiagem de garras.....     | 41 |
| Figura 57 – Malha da embraiagem de garras .....                                    | 41 |
| Figura 58 – Distribuição de tensões de von Mises (MPa).....                        | 42 |
| Figura 59 – Deslocamento resultante segundo x, y e z (mm).....                     | 42 |
| Figura 60 – Desenho da montagem para centragem.....                                | 43 |
| Figura 61 – Fotografia da parte superior da bucha.....                             | 44 |
| Figura 62 – Fotografia das duas buchas de fixação.....                             | 44 |
| Figura 63 – Representação de toda a cadeia cinemática da máquina .....             | 46 |
| Figura 64 – Substrato com dimensões normalizadas (mm).....                         | 49 |
| Figura 65 – Ligação do servomotor ao provete.....                                  | 51 |
| Figura 66 – Deformação segundo o eixo x.....                                       | 52 |
| Figura 67 – Modelo do sistema físico completo .....                                | 53 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 68 – Modelo do sistema físico aproximado .....                                                            | 54 |
| Figura 69 – Esquema do controlador I-PD .....                                                                    | 55 |
| Figura 70 – Modelo simplificado para a obtenção dos ganhos no controlador .....                                  | 56 |
| Figura 71 – Diagrama de blocos do controlador de posição I-PD, para o cálculo dos ganhos .....                   | 56 |
| Figura 72 – Gráfico ampliado do erro de posição do servomotor .....                                              | 59 |
| Figura 73 – Gráfico ampliado do erro de posição do servomotor com o ajuste final dos ganhos do controlador ..... | 59 |
| Figura 74 – Gráfico de rotação do servomotor no teste de relaxação .....                                         | 60 |
| Figura 75 – Gráfico do erro de rotação do servomotor no teste de relaxação .....                                 | 60 |
| Figura 76 – Diagrama de blocos do controlador de binário I-PD .....                                              | 61 |
| Figura 77 – Gráfico do erro de binário com os ganhos do controlador inicial .....                                | 63 |
| Figura 78 – Gráfico ampliado do erro de binário com o último ajuste dos ganhos do controlador. ....              | 63 |
| Figura 79 – Gráfico total do erro de binário no teste de fluência com oscilação .....                            | 63 |
| Figura 80 – Gráfico total do erro de binário no teste de fluência com ganhos finais .....                        | 64 |
| Figura 81 – Representação do funcionamento da máquina .....                                                      | 65 |
| Figura 82 – Placa de aquisição de dados PCI-DAS1602-12 [27] .....                                                | 66 |
| Figura 83 – Fotografia das duas placas de terminais .....                                                        | 66 |
| Figura 84 - Placa de <i>encoders</i> PCI-QUAD04 [29] .....                                                       | 67 |
| Figura 85 – Fotografia da placa de 50 pinos .....                                                                | 68 |
| Figura 86 - Transdutor de binário estático da <i>Lorenz</i> [7] .....                                            | 69 |
| Figura 87 – Fotografia dos relés utilizados .....                                                                | 70 |
| Figura 88 – Fotografia dos contactores utilizados .....                                                          | 70 |
| Figura 89 – Fotografia do relé térmico .....                                                                     | 71 |
| Figura 90 – Fotografia do disjuntor .....                                                                        | 71 |
| Figura 91 – Fotografia do filtro .....                                                                           | 72 |
| Figura 92 – Fotografia da fonte de tensão .....                                                                  | 72 |
| Figura 93 – Fotografia da placa de circuito impresso .....                                                       | 73 |
| Figura 94 – Representação do quadro elétrico .....                                                               | 74 |
| Figura 95 – Fotografia frontal do quadro elétrico .....                                                          | 74 |
| Figura 96 – Fotografia lateral quadro elétrico .....                                                             | 74 |
| Figura 97 – Fotografia do painel de comando e monitorização .....                                                | 75 |
| Figura 98 – Lógica elétrica da alimentação do <i>drive</i> .....                                                 | 76 |
| Figura 99 – Lógica elétrica do estado da <i>drive</i> .....                                                      | 77 |
| Figura 100 – Lógica elétrica para a alimentação do servomotor .....                                              | 77 |
| Figura 101 – Lógica para controlo do travão do servomotor .....                                                  | 78 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Figura 102 – Saídas digitais .....                              | 78 |
| Figura 103 – Entradas digitais .....                            | 79 |
| Figura 104 – Diagrama de estados até ao controlo manual .....   | 80 |
| Figura 105 – Diagrama de estados no decorrer de um teste .....  | 81 |
| Figura 106 – Janela principal.....                              | 84 |
| Figura 107 – Janela para escolha dos testes .....               | 85 |
| Figura 108 – Janela controlo manual.....                        | 86 |
| Figura 109 – Controlo de Binário.....                           | 86 |
| Figura 110 – Janela de alerta, provete partido.....             | 87 |
| Figura 111 – Janela correspondente ao teste de relaxamento..... | 88 |
| Figura 112 – Janela de alerta de Binário Máximo Atingido .....  | 89 |
| Figura 113 – Controlo manual.....                               | 89 |
| Figura 114 – Janela de alerta, botão de emergência .....        | 90 |
| Figura 115 – Provetes .....                                     | 91 |
| Figura 116 – Molde para fabricar as juntas adesivas.....        | 92 |
| Figura 117 – Amarras .....                                      | 92 |
| Figura 118 – Aperto do parafuso.....                            | 92 |
| Figura 119 – Resultado final .....                              | 92 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Propriedades do Acoplamento <i>ARPEX RS-6 Series 78-6</i> [8] .....         | 17 |
| Tabela 2 – Valores máximos de desalinhamento permitidos [8].....                       | 17 |
| Tabela 3 – Dimensões do acoplamento tipo NEN - <i>ARPEX RS-6 Series 78-6</i> [8] ..... | 18 |
| Tabela 4 - Dimensões do acoplamento tipo BEB - <i>ARPEX RS-6 Series 78-6</i> [8] ..... | 18 |
| Tabela 5 – Características do rolamento [9] .....                                      | 20 |
| Tabela 6 – Características do acoplamento rígido HUCO [14].....                        | 27 |
| Tabela 7 – Dados relevantes do adesivo.....                                            | 48 |
| Tabela 8 – Dados de cada substrato .....                                               | 49 |
| Tabela 9 – Dados do servomotor .....                                                   | 50 |
| Tabela 10 – Dados do redutor.....                                                      | 50 |
| Tabela 11 – Dados dos componentes de acoplamento entre o redutor e o provete .....     | 51 |
| Tabela 12 - Dados do transdutor de binário .....                                       | 52 |
| Tabela 13 – Programa experimental .....                                                | 93 |



## **1. Introdução**

O primeiro capítulo desta dissertação tem o objetivo de introduzir o tema, fazer a contextualização do trabalho e definir os objetivos a atingir.

### **1.1 Contextualização**

Tem sido levado adiante pelo Grupo de Adesivos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ADFEUP, o desenvolvimento de trabalhos de investigação que levam à caracterização das propriedades dos adesivos. [1]

É então do interesse do ADFEUP o desenvolvimento de uma máquina para ensaios à torção de juntas adesivas. Apesar da existência no mercado de máquinas capazes de promoverem ensaios de torção, estas não são de fácil acesso por questões económicas, o que levou o ADFEUP a interessar-se pelo desenvolvimento de um dispositivo experimental de ensaios de torção que permitisse determinar a resistência ao corte de adesivos.

Desta forma, e como se trata de um trabalho que envolve várias áreas, o projeto dividiu-se em três dissertações. O estudo da solução mecânica foi considerado tema de dissertação na opção de Projeto num ano anterior. A conceção e automatização, tema de dissertação na opção de Automação do ano passado. A construção da solução mecânica e implementação do controlo é o objetivo do presente trabalho. [2] [3]

### **1.2 Objetivos gerais**

O objetivo desta dissertação é a construção da máquina para ensaios de torção de juntas adesivas e a implementação do seu controlo. Para isso é preciso realizar um conjunto de etapas, como a seleção de material e componentes, recolha de orçamentos e realização de diversas alterações ou melhorias no projeto.

Um dos objetivos principais é o de a máquina ser capaz de medir o binário aplicado e a deformação angular sofrida pelo adesivo estrutural, quando este está sujeito a um de quatro tipos de testes: teste em controlo de deslocamento angular, teste em controlo de binário, teste de relaxamento e teste de fluência.

### 1.3 Metodologia

Numa primeira etapa efetuou-se uma pesquisa sobre máquinas de torção comerciais e ensaios de torção de juntas adesivas. Executadas estas duas pesquisas obteve-se o conhecimento necessário para compreender a caracterização mecânica dos adesivos estruturais e que máquinas existem no mercado para estudarem este tipo de adesivos.

Na construção da máquina, a maior preocupação é garantir a ausência de esforços na junta adesiva. Como solução, optou-se por utilizar alguns componentes essenciais.

Utilizou-se o *Solidworks 2013*®, uma aplicação tridimensional e de análise para auxiliar a modelação de toda a máquina. Este permitiu trazer uma noção real da aparência do dispositivo, verificando assim a viabilidade da construção dos componentes.

Para garantir o funcionamento da máquina de uma forma simples, foi desenvolvido uma interface gráfica na aplicação *GUIDE* do *Matlab*®, que faz a comunicação entre a interface e o modelo de controlo.

### 1.4 Estruturação da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. De acordo com os objetivos presentes, pretende-se detalhar com precisão todo o projeto em si.

No primeiro capítulo, é feita uma introdução ao tema, expondo os objetivos gerais da dissertação e uma contextualização do trabalho.

No capítulo dois, de pesquisa bibliográfica, faz-se uma abordagem aos ensaios de torção e apresentam-se algumas máquinas comerciais para este tipo de ensaios.

No terceiro capítulo aborda-se o princípio de funcionamento da máquina, detalhando todas as peças que a constituem.

No quarto capítulo apresentam-se todos os componentes principais e faz-se uma descrição do funcionamento da máquina através de diagramas de estados.

No quinto capítulo, é apresentada toda a interface gráfica e a fabricação dos provetes.

Por fim, no último capítulo, apresenta-se um resumo das conclusões relativas ao trabalho realizado na presente dissertação.

## 2. Pesquisa bibliográfica

Este capítulo reflete a pesquisa bibliográfica que foi feita de início. Mostra alguns modelos de máquinas de torção que existem no mercado e explica o ensaio de torção de juntas de adesivos.

### 2.1 Máquinas de torção comerciais

Depois de se ter realizado uma pesquisa bibliográfica, verificou-se a existência no mercado de uma grande variedade de fabricantes de máquinas para ensaios de torção, entre eles distinguem-se três fabricantes principais, *Zwick®*, *Instron®* e a *MTS®*.

Estes três fabricantes não dão acesso aos preços das máquinas para ensaios à torção, mas estima-se que não ficam abaixo dos 40 mil euros.

Estes fabricantes têm desenvolvido estas máquinas com o objetivo de aplicação em áreas de investigação, como testes de plásticos, testes de fio de aço, teste de material biomédico, parafusos, molas, etc... [2]

A Figura 1 apresenta uma máquina de ensaios à torção, onde as características principais são [2]:

- Capacidade máxima de binário: 225 Nm
- Velocidade máxima do teste: 120 rpm



Figura 1 – Máquina de torção da *Instron®* [2]

Estas máquinas que estão disponíveis no mercado, foram desenvolvidas com o intuito de serem utilizadas para uma vasta gama de aplicações. Com isto, para aumentar os proveitos comerciais, os fabricantes desenvolveram máquinas capazes de alterar a célula de carga consoante o binário que se pretende aplicar num teste.

Estas máquinas possuem algumas características que podem ser vantajosas para o estudo de ensaios à torção de adesivos estruturais. Elas apresentam uma grande rigidez torsional e baixo atrito na parte móvel e a opção de aplicação de cargas axiais nos provetes.

Do ponto de vista de resolução na medição do ângulo de rotação do provete o modelo da *Instron* oferece 0,002°. Este valor está muito abaixo do valor de resolução para a máquina desta dissertação. Além disso, estas máquinas dispõem de um espaço suficientemente grande para o manuseamento do provete, sendo que um modelo da *MTS* trás incorporado um sistema de carga axial, ao qual permite realizar testes com uma carga de compressão ou tração constante (Figura 2).

Os resultados mostrados para a deformação angular dos provetes são baseados numa calibração, que, de alguma forma, compensa a deformação dos componentes que constituem a cadeia cinemática.

Os fabricantes destas máquinas não dizem se garantem o alinhamento perfeito de toda a cadeia cinemática, o que permitira um teste puramente de torção, sem influência de forças externas (influenciaria os resultados).

Estas máquinas são equipadas com um display, normalmente táctil. Neste display, são introduzidos os dados relativos ao teste a efetuar. Geralmente é possível realizar testes de fluência e testes típicos de rotura. As máquinas possuem diferentes tipos de garras, para servir diferentes tamanhos e geometrias de provetes. Dispõem de diferentes gamas de transdutores de binário, de modo a poderem ser trocados para diferentes testes.



Figura 2 - Máquina de torção da *MTS*®

Tendo em conta os preços das máquinas de ensaios à torção, foi pensado construir uma máquina capaz de satisfazer as necessidades específicas que o ADFEUP necessita, isto é, uma solução construtiva torcionalmente rígida e que consiga “aliviar” o provete de cargas indesejadas.

## 2.2 Torsiómetro da FEUP

No início dos anos 90, foi desenvolvida na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, uma máquina com o objetivo de medir a resistência de rolhas de cortiça à torção.

O equipamento foi considerado como referência para a norma ISO que estava a ser elaborada, tendo feito parte da comissão o investigador, Fernando Oliveira, pessoa que foi responsável pela sua construção.

O projeto era totalmente mecânico, mas foi sofrendo alterações para permitir instalar vários sensores de binário.

Este equipamento (Figura 3) teve um grande êxito, tendo sido vendidos vários exemplares para empresas na área das cortiças.



Figura 3 – Torsiómetro da FEUP

Como se consegue ver na imagem, a máquina dispõe de duas garras, que apertam a rolha com um sistema de alavanca manual.

A atuação mecânica é feita a partir de um moto-reductor, ao qual foi adicionado um andar extra de redução. Assim, uma plataforma está fixa, enquanto a plataforma do moto-reductor tem um grau de liberdade, em translação, para se conseguir retirar e colocar as rolhas e eliminar o efeito da redução no comprimento do provete, sem introduzir cargas de tração.

## 2.4 Ensaios de torção de juntas de adesivos

Para o ensaio de juntas de adesivos utilizam-se provetes cilíndricos maciços ou em tubo, constituídos por duas metades (substrato) com uma junta de adesivo, topo a topo (ver Figura 4 e Figura 5). Existe a possibilidade de serem utilizados provetes com apenas adesivo.

Para estes ensaios a resistência ao corte do material é determinada através de um momento torsor aplicado ao provete, colado através de uma junta de adesivo, topo a topo. Neste ensaio, teoricamente, evitam-se concentrações de tensões no provete, ao contrário do que se sucede em outros testes, apurando-se melhores resultados. [5]

A utilização de ensaios com provetes cilíndricos de secções tubulares é mais vantajosa do que em secções circulares, porque reduz a variação da tensão de corte no adesivo, como se sabe esta varia em função do raio [6]. Por outro lado, existe uma grande dificuldade na produção de provetes cilíndricos de secções tubulares e o erro de alinhamento é significativo.

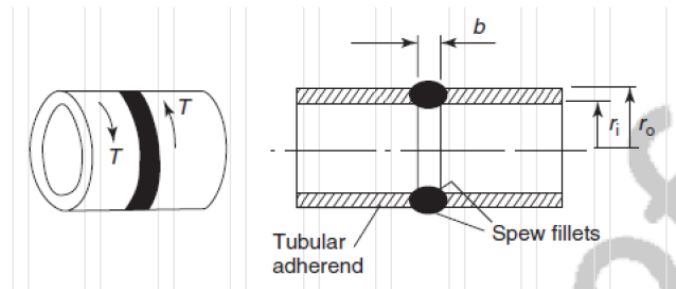


Figura 4 – Representação de um teste de uma junta em anel [6]

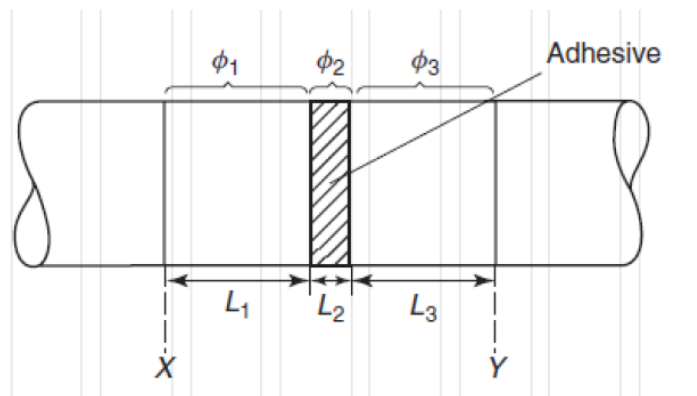


Figura 5 - Representação de um teste de uma junta sólida [6]

### **3. Princípio de funcionamento mecânico**

Neste capítulo é apresentada a solução final alcançada para a máquina de ensaios de torção desenvolvida anteriormente e com as alterações que foram introduzidas. Apresentam-se as condicionantes que levaram a essas alterações e a vantagem na sua utilização para a medição experimental da resistência ao corte de adesivos estruturais. [2]

Ao longo do projeto ocorreram alguns problemas, que serão referidos neste ponto do trabalho, assim como a solução encontrada para contornar os mesmos.

A primeira abordagem deste capítulo será a de toda a cadeia cinemática, continuando depois com uma explicação lógica de cada componente da solução.

Do ponto de vista do controlo, é importante que a cadeia cinemática, seja o mais rígido possível, para que os diferentes modos de vibração não influenciem o controlo do sistema. Pretendendo-se assim que o elemento a ser testado tenha a menor rigidez da cadeia cinemática, de forma a ser possível escolher e ajustar um controlador.

#### **3.1 Cadeia cinemática**

De seguida, na Figura 6 e Figura 7, apresenta-se a solução final numa vista tridimensional e numa vista de corte 2D, para mostrar componentes que não são perceptíveis na vista 3D. Serão apontadas em cada caso, as diferenças entre as duas versões e a razão de ser das alterações introduzidas.

### 3. Princípio de funcionamento mecânico

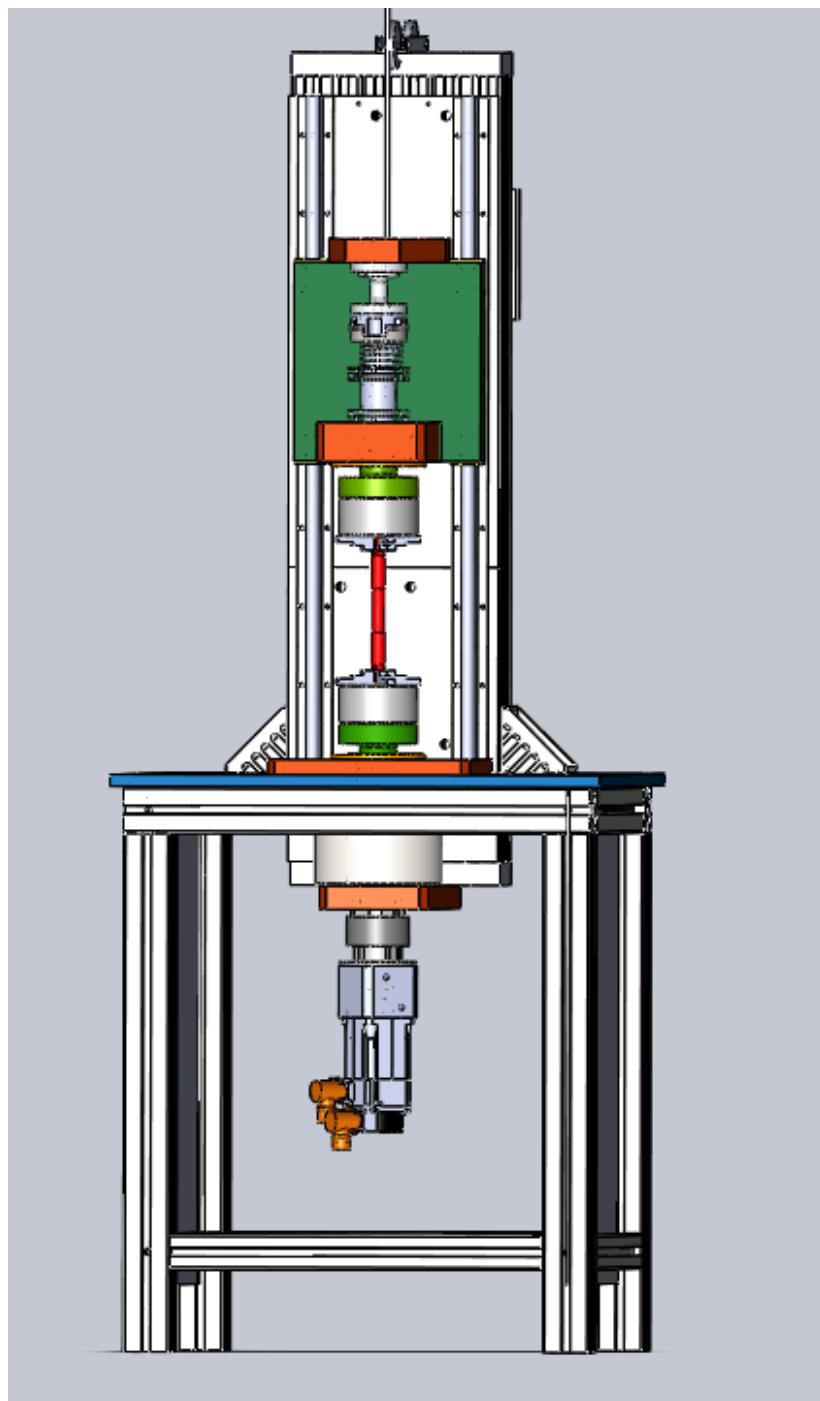
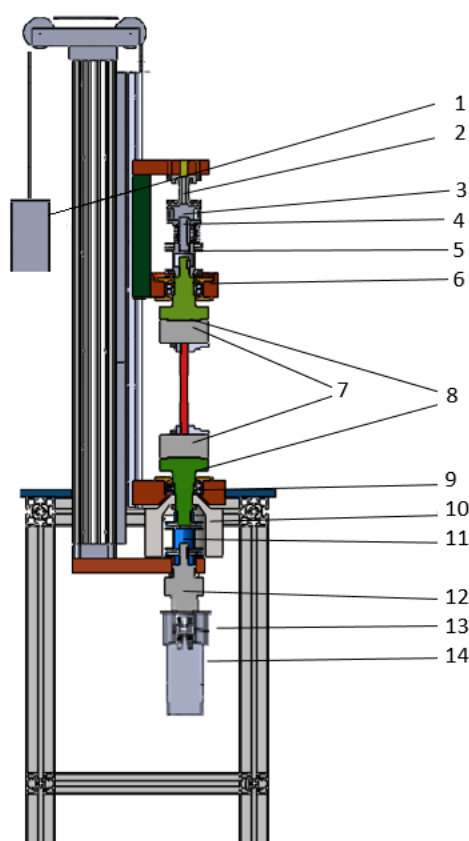


Figura 6 – Máquina em vista tridimensional



|    |                                          |
|----|------------------------------------------|
| 1  | Contrapeso do carro                      |
| 2  | Transdutor de binário                    |
| 3  | Embraiagem de garras                     |
| 4  | Veio de ligação acoplamento - embraiagem |
| 5  | Acoplamento torcionalmente rígido curto  |
| 6  | Rolamentos oscilantes de esferas         |
| 7  | Buchas de fixação                        |
| 8  | Veios de ligação buchas - acoplamentos   |
| 9  | Rolamentos oscilantes de esferas         |
| 10 | Contrapeso                               |
| 11 | Acoplamento torcionalmente rígido longo  |
| 12 | Redutor epicicloidal                     |
| 13 | Luneta e acoplamento                     |
| 14 | Servomotor                               |

Figura 7 – Identificação de componentes

Como se descreveu num dos capítulos anteriores, as máquinas comerciais de ensaios à torção apresentam, geralmente, bancas de eixo horizontal. No entanto, com a escolha de rolamentos oscilantes de esferas e acoplamentos torcionalmente rígidos, utilizados com vista a evitar desalinhamentos na cadeia cinemática, iriam originar-se tensões no adesivo se estivessem na horizontal, pois iria haver uma flexão do provete originado pelo peso dos componentes. Assim resolveu-se optar por uma solução vertical.

Desenhou-se o modelo tridimensional de todas as peças para poder ter-se uma noção espacial de todos os componentes quando montados no conjunto final.

### 3.1.1 - Transdutor de binário

O transdutor de binário escolhido foi um sensor estático da marca *Lorenz®* DF-30.

Como o binário é teoricamente constante ao longo de toda a cadeia cinemática, existindo apenas perdas por atritos nos rolamentos (coeficiente de atrito estático,  $\mu_e=0,0008$ ), as deformações por ele sofridas seriam as mesmas, colocado em qualquer posição do sistema. Devido aos cabos de ligação elétrica posicionados no transdutor é conveniente que este não esteja sujeito a grandes rotações. O encastramento no apoio do transdutor, através de parafusos, foi a solução encontrada.

As suas características são [7]:

- Linearidade: 0.2%
- Sensibilidade: 1.0 mV/V
- Binário máximo: 100 Nm
- Tensão de alimentação: 2 V.... 12 V
- Temperatura de serviço: -15°C a +55°C

Na Figura 8, apresenta-se o transdutor.



Figura 8 – Fotografia do transdutor de binário [7]

### 3.1.2 - Embraiagem de garras

Na dissertação anterior, a máquina foi projetada sem este elemento, ficando a ligação como se mostra na Figura 9.

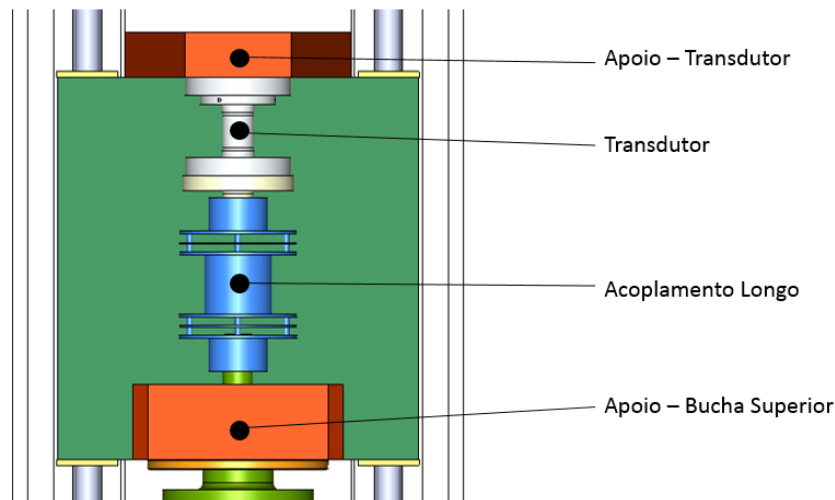


Figura 9 – Pormenor da ligação acoplamento-transdutor

Existia um acoplamento rígido, longo, ligado a uma das flanges do transdutor e este era fixado com seis parafusos.

O problema surge na fixação do provete nas buchas, pelo facto de o redutor ter uma razão de transmissão muito elevada (216:1), aliado ao atrito existente no mesmo e à resistência imposta pelo servomotor e que levam a que a transmissão seja virtualmente irreversível. Uma vez que na parte superior da máquina (lado do transdutor de binário) não existe qualquer liberdade de rotação, seria impossível montar um provete com topos em quadra.

Assim, a solução para resolver este problema consiste em abrir a cadeia cinemática, quando se está a montar o provete e depois quando se vai iniciar o teste voltar a unir. Para isso projetou-se uma embraiagem de garras.

Para introduzir a embraiagem de garras, teve que se substituir o acoplamento torcionalmente rígido longo, por um acoplamento rígido curto (ver próxima secção), para haver espaço suficiente para a embraiagem.

A flange que fixava o transdutor deixa de existir, sendo a própria embraiagem que se fixa no transdutor.

### 3. Princípio de funcionamento mecânico

A Figura 10 apresenta o pormenor da embraiagem de garras.

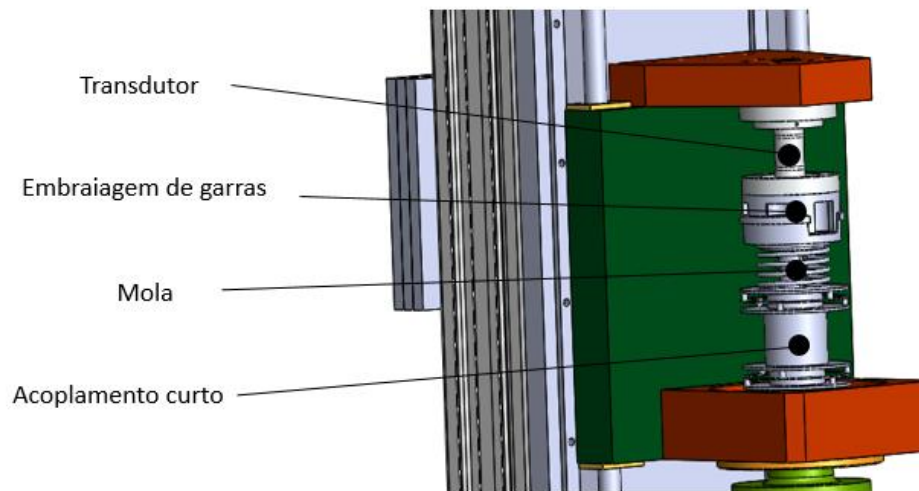


Figura 10 – Pormenor da embraiagem de garras

Como se observa na figura anterior, a embraiagem é dividida em duas partes. A parte de cima está fixada ao transdutor por parafusos CHC ISO 4762-M8x50-8.8 e a parte de baixo engrena no dente trapezoidal e desliza sobre um veio através de uma mola.

A Figura 11 e Figura 12 apresentam as duas partes da embraiagem de garras.

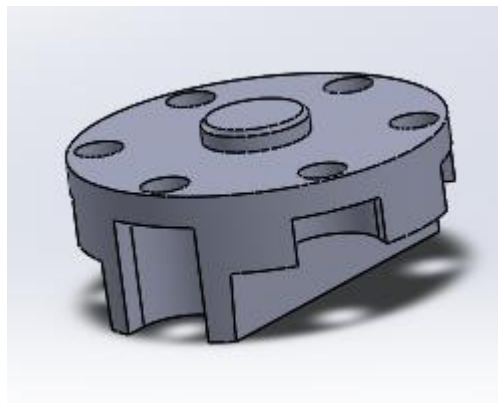


Figura 11 – Parte superior da embraiagem de garras

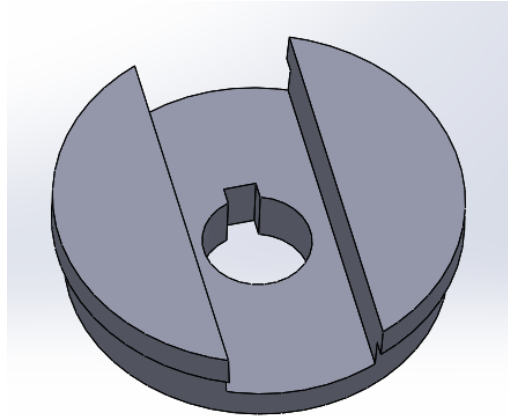


Figura 12 - Parte inferior da embraiagem de garras

A parte superior apresenta um ressalto que serve de centragem ao transdutor e um dente trapezoidal com inclinação de  $5^\circ$ , que vai engrenar na parte inferior da embraiagem.

A parte inferior da embraiagem desliza sobre um veio com chaveta e está engrenado no dente da embraiagem superior.

Entre a embraiagem de garras e o acoplamento, existe uma mola, que garante a manutenção do fecho da cadeia cinemática. A mola é comprimida quando se desengrena a parte inferior da superior. Assim permite a libertação da cadeia cinemática e é possível a montagem do provete.

Depois de fixado o provete, o movimento de rotação do eixo levará a um novo engrenamento da embraiagem.

Para projetar a embraiagem, foram feitos alguns cálculos que serão explicados de seguida.

Uma vez que a atuação será manual, limitou-se a 150 N a força necessária para separar a parte inferior da embraiagem da superior, e permitindo transmitir um binário máximo de 70 Nm.

Quando aplicado o binário, a distribuição de tensões fica como se observa na Figura 13.

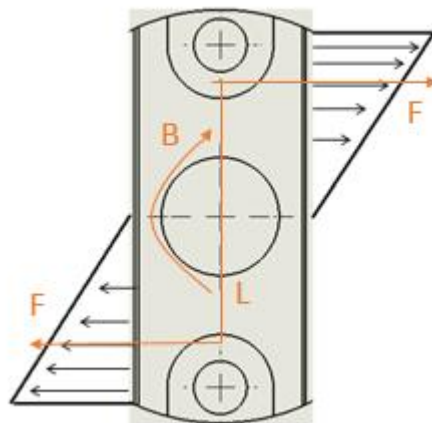


Figura 13 – Esquema representativo da distribuição de tensões de corte na parte superior da embraiagem de garras

### 3. Princípio de funcionamento mecânico

Sabendo que:

$$T = F \cdot L \quad (1)$$

onde:

$T$  = Binário (Nm)

$F$  = Força (N)

$L$  = Braço (m)

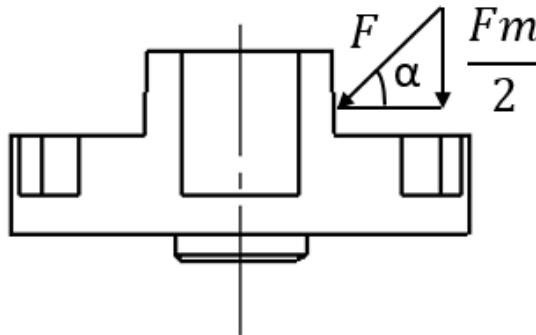


Figura 14 – Representação 2D da parte superior da embraiagem de garra  
calcula-se o valor de  $\alpha$ . O resultado foi  $2.5^\circ$ , o que significa que a inclinação entre dentes tem de ter  $5^\circ$ , para que seja possível transmitir o binário sem cedência da mola (ver Figura 14)

Para o cálculo da mola, calculou-se a rigidez que se precisava e através de uma folha de cálculo fizeram-se várias iterações até descobrir as características adequadas. [8]

Para o cálculo da rigidez, sabendo que se pretende que a parte inferior da embraiagem desça 15 mm com uma força máxima de 150 N, como

$$\frac{F}{\Delta x} = K \quad (2)$$

tem-se que a rigidez mínima que é necessário é de 10000 N/m.

As características da mola são:

- Material: corda de piano DIN 17223.
- Rigidez: 10280 N/m
- Força máxima: 244 N
- Deslocamento máximo possível: 33 mm

As dimensões da mola estão representadas na Figura 15.

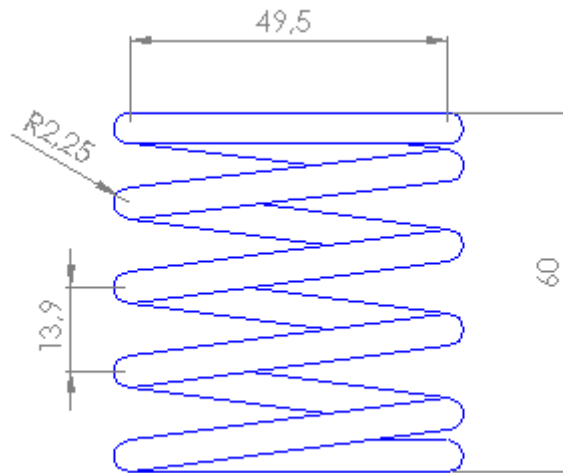


Figura 15 – Dimensões da mola (mm)

Os desenhos da embraiagem e da mola encontram-se nos anexos A, B e C

A Figura 16 e Figura 17 apresentam as fotografias da mola e as duas partes da embraiagem de garras maquinadas.



Figura 16 – Fotografia da mola

### 3. Princípio de funcionamento mecânico



Figura 17 – Fotografia das duas partes da embraiagem de garras

#### 3.1.3 - Acoplamento torcionalmente rígido

Sem estes acoplamentos a ligação ao transdutor ou ao redutor seria rígida, impedindo o efeito desejado. Eles servem para acomodar desalinhamentos de centragem na montagem da máquina, quando está a decorrer um teste.

Estes acoplamentos só têm efeito se usarem rolamentos oscilantes de esferas, pois estes rolamentos têm a capacidade de se ajustarem.

A solução encontrada foi a gama ARPEX da *Siemens® FLENDER Couplings* [8].

Na Figura 18 apresenta-se o acoplamento escolhido. A escolha teve como base o catálogo de acoplamentos e considerou-se o binário máximo a que está submetido o componente, para ensaios estáticos. Este acoplamento é construído em aço de alta qualidade sendo os diafragmas em aço duro inoxidável, CrNi. [8]

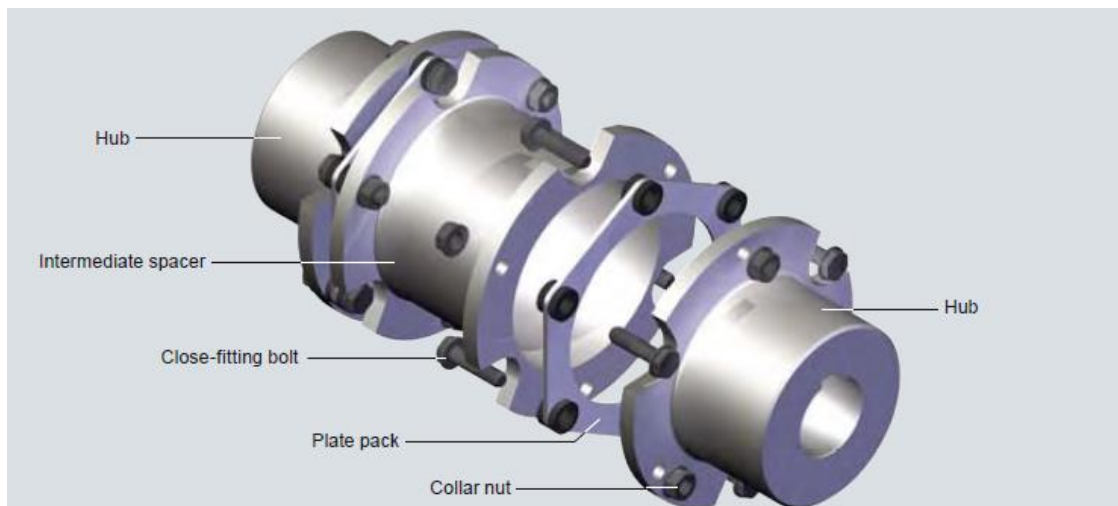


Figura 18 – Acoplamento ARPEX RS-6 Series 78-6 [8]

Na tabela 1 e tabela 2 apresenta-se as características deste tipo de acoplamento, tanto as propriedades do mesmo, como os valores máximos de desalinhamento permitidos.

Tabela 1 – Propriedades do Acoplamento *ARPEX RS-6 Series 78-6* [8]

| DA   | T <sub>max</sub><br>[Nm] | T <sub>max</sub><br>Fadiga<br>[-] | ±ΔKa<br>[mm] | ±ΔKw<br>[-] | ±ΔKr<br>[mm] | K<br>[MNm/rad] |
|------|--------------------------|-----------------------------------|--------------|-------------|--------------|----------------|
| 78-6 | 320                      | 85                                | 1,1          | 0,7°        | 12,1         | 0,05           |

Os valores ΔKa, ΔKw e ΔKr são máximos e não podem ocorrer ao mesmo tempo.

Tabela 2 – Valores máximos de desalinhamento permitidos [8]

| Ângulo de desalinhamento permitido ±ΔKw   |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,0°                                      | 0,1° | 0,2° | 0,3° | 0,4° | 0,5° | 0,6° | 0,7° |
| Desalinhamento axial permitido ±ΔKa em mm |      |      |      |      |      |      |      |
| 1,10                                      | 0,94 | 0,79 | 0,63 | 0,47 | 0,31 | 0,16 | 0,00 |

Estes acoplamentos fletem sempre o seu eixo, sendo que continuam torcionalmente rígidos, sofrendo poucas deformações, quando é aplicado um momento torsor.

Na Figura 19 é apresentado o desenho definição do acoplamento rígido do tipo NEN e na tabela 3, as dimensões do mesmo.

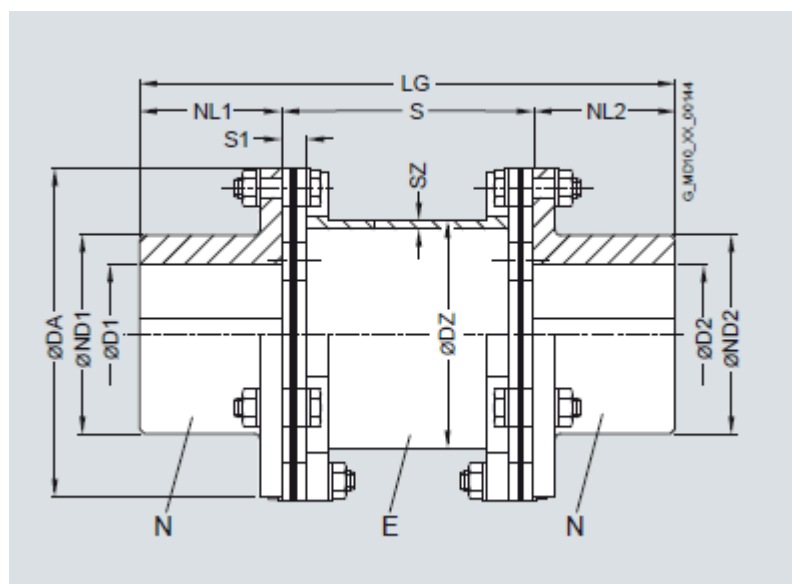


Figura 19 – Desenho de definição do acoplamento tipo NEN ARPEX RS-6 Series 78-6 [8]

Tabela 3 – Dimensões do acoplamento tipo NEN - ARPEX RS-6 Series 78-6 [8]

| D1 <sub>máx</sub><br>mm | D2 <sub>máx</sub><br>mm | ND1<br>mm | ND2<br>mm | DZ<br>mm | SZ<br>mm | NL1/NL2<br>mm | S1<br>mm | S<br>mm | J<br>kgm <sup>2</sup> | LG<br>mm |
|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|----------|----------|---------------|----------|---------|-----------------------|----------|
| 28                      | 28                      | 39        | 39        | 45       | 2,5      | 30            | 8        | 55      | 0,001                 | 115      |

Como se colocou a embraiagem de garras entre o transdutor e o acoplamento, optou-se por trocar o acoplamento longo por um acoplamento curto, mas da mesma série, o que leva a novas dimensões no acoplamento, que serão apresentadas na tabela 4. As características são as mesmas do acoplamento do tipo NEN. Na realidade trata-se do mesmo conjunto, organizado por forma diferente (Figura 20).

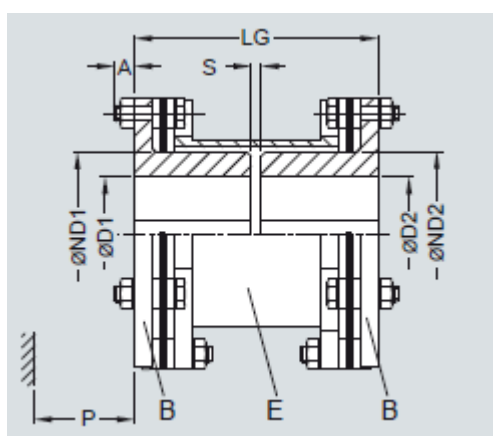


Figura 20 - Desenho de definição do acoplamento  
tipo BEB - ARPEX RS-6 Series 78-6 [8]

Tabela 4 - Dimensões do acoplamento tipo BEB - ARPEX RS-6 Series 78-6 [8]

| D1 <sub>máx</sub><br>mm | D2 <sub>máx</sub><br>mm | ND1<br>mm | ND2<br>mm | P<br>mm | A<br>mm | S<br>mm | J<br>kgm <sup>2</sup> | LG<br>mm |
|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|---------|---------|---------|-----------------------|----------|
| 28                      | 28                      | 39        | 39        | 29      | 8       | 9       | 0,001                 | 69       |

A vantagem desta alteração é que se consegue colocar a embraiagem de garras, sem aumentar o comprimento do carro móvel, como é possível ver na figura seguinte. O acoplamento do tipo NEN (longo) tinha um comprimento de 115 mm e com esse comprimento era impossível colocar a embraiagem entre o acoplamento e o transdutor de binário sem aumentar o carro móvel.

A solução encontrada, foi alterar o acoplamento para o tipo BEB, como referido anteriormente (ver Figura 21).

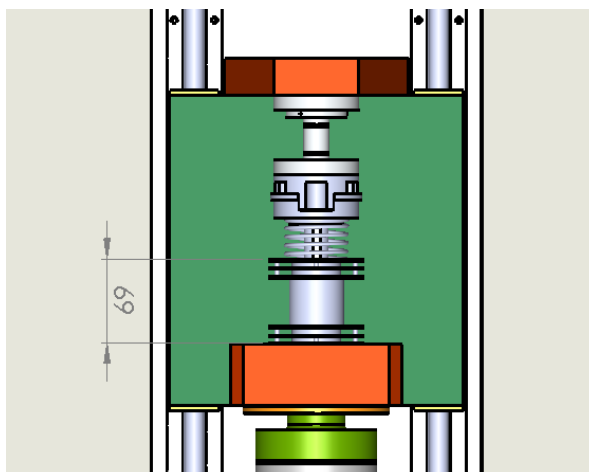


Figura 21 – Conjunto do carro móvel (mm)

### 3.1.4 - Rolamentos

Os veios de ligação das buchas aos acoplamentos torcionalmente rígidos têm que permitir mais que um grau de liberdade, para que o veio possa corrigir a sua posição durante a realização de um teste e se houver um desalinhamento possível entre os extremos do provete. Esta função impede que apareçam outros esforços no adesivo, que não os de torção.

Optou-se pela utilização de rolamentos oscilantes de esferas. Estes rolamentos permitem a oscilação de aproximadamente  $4^\circ$  em relação à posição desejada.

Os esforços que vão ocorrer nos rolamentos são de tipo axial, originado pelos pesos dos componentes. O dimensionamento dos rolamentos foi apenas condicionado pelo veio de ligação, que possui um diâmetro de 40 mm.

Foram escolhidos rolamentos da FAG com a referência 2208-TVH (Figura 22).

Na Tabela 5 são apresentadas as características dos rolamentos:



Figura 22 – Rolamento FAG 2208-TVH e esquema representativo [9]

Tabela 5 – Características do rolamento [9]

| d  | D  | B  | m    |
|----|----|----|------|
| mm | mm | mm | kg   |
| 40 | 80 | 23 | 0,51 |

### 3.1.5 - Veios de ligação bucha – acoplamento

Foram projetados dois veios para a ligação entre a bucha e o acoplamento. Estes veios acabam por ter geometrias diferentes, porque existe a necessidade de acoplar um contrapeso no veio que se situa na parte inferior da bucha. O centro de massa do conjunto veio-bucha situa-se acima do rolamento, tornando-se instável e a introdução do contrapeso visa fazer deslocar o centro de massa abaixo do centro de rotação do rolamento. [2]

A Figura 23 apresenta a vista em pormenor do veio de ligação inferior.

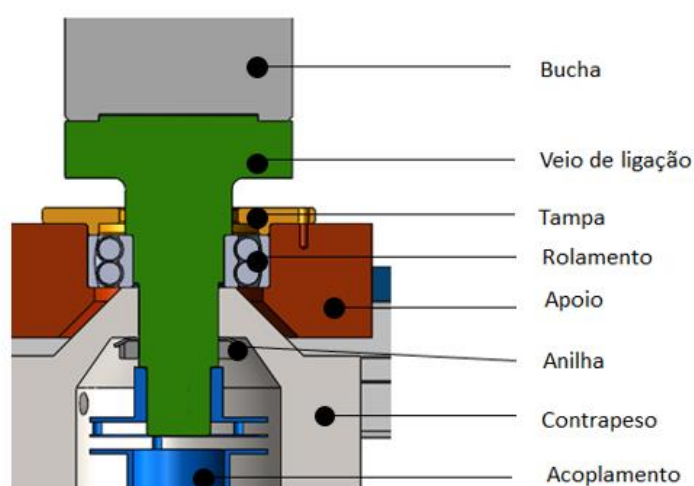


Figura 23 – Vista em pormenor do veio de ligação inferior

A ligação com a bucha é feita por ligação aparafusada com 4 parafusos M8, existindo um ressalto de centragem na mesma.

O contrapeso rosca no veio, como se pode ver na figura, ficando assim preso em posição com ajuda de uma anilha dentada e uma porca FAG, aproveitando o mesmo para prender o rolamento.

A ponta do veio permite fazer a ligação com o acoplamento torcionalmente rígido, estando essa mesma ponta escatelada para alojar uma chaveta para transmitir o binário, essa chaveta é designada por chaveta paralela A 8 x 11 x 18 ISO/R 773. [10]

A Figura 24 apresenta a vista em pormenor do veio de ligação superior.

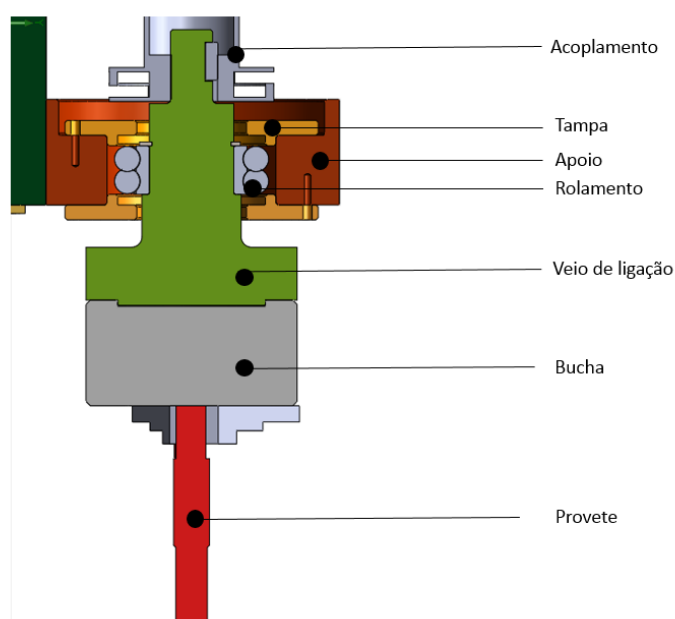


Figura 24 - Vista em pormenor do veio de ligação superior

A ligação com a bucha é feita da mesma maneira que o veio de ligação inferior. Para que o rolamento ficasse devidamente posicionado, decidiu-se utilizar um anel elástico, criando um rasgo no veio. A ligação com o acoplamento é feita da mesma forma, mas utilizando uma chaveta paralela A 6 x 6 x 18 ISO/R 773. [10]

Ambas as chavetas são produzidas em aço DIN Ck45 e os veios em aço de construção com norma DIN Ck45. Possui uma tensão limite elástica de valor igual ou superior a 320 MPa.

A Figura 25, apresentam os dois veios maquinados.



Figura 25 – Fotografia dos dois veios maquinados

### 3. Princípio de funcionamento mecânico

As tampas e os apoios foram corrigidos. A tampa assentava metade no rolamento e outra metade no apoio, como é possível ver na Figura 26.

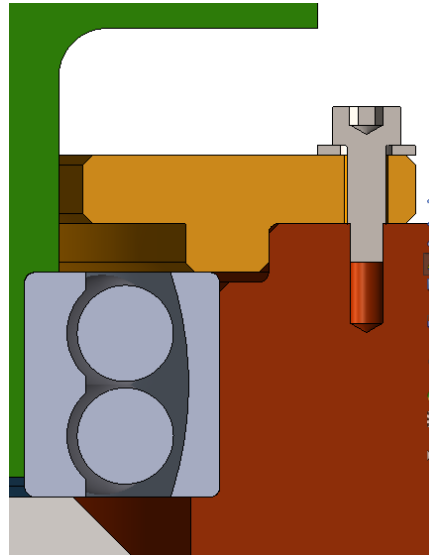


Figura 26 – Vista em pormenor da tampa (versão anterior) [2]

Para o rolamento ficar melhor posicionado o diâmetro interno da tampa e do apoio diminuiu. Na Figura 27, consegue-se ter uma melhor ideia da correção que foi feita.

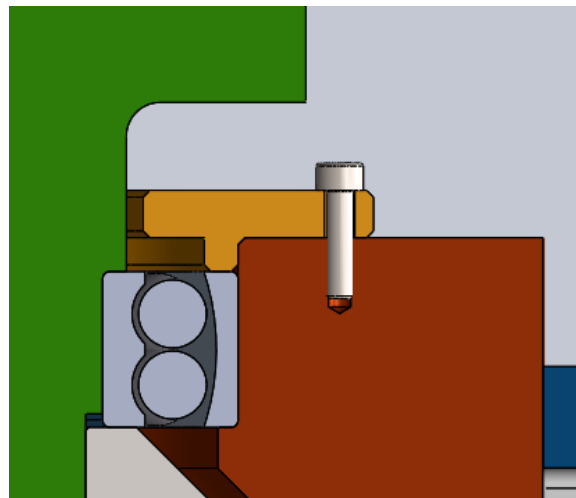


Figura 27 - Vista em pormenor da tampa (versão atual)

No anexo D, encontra-se o desenho corrigido das tampas.

### 3.1.6 - Buchas

Para a escolha das buchas tiveram-se em atenção determinadas condições: o preço, o afastamento máximo e mínimo dos grampos e a capacidade das mesmas impedirem deslizamento do provete, transmitindo eficazmente o binário de ensaio.

Como já foi referido várias vezes nesta dissertação a geometria dos provetes pode ser diversa. Assim, optou-se por uma bucha com quatro grampos de aperto. Nestas condições garante-se a fixação entre grampos e provete, quando aplicado um binário.

A bucha escolhida, PD400 da *Proxxon*® (Figura 28), possui uma massa de 3,1 kg, largura de 50 mm de abertura dos dentes, diâmetro 70 mm e profundidade de 3 mm da flange de centragem, diâmetro exterior 100 mm e 4 grampos. [11]



Figura 28 - *Proxxon*®, PD400 [11]

### 3.1.7 - Proвете

Como já referido anteriormente, os ensaios de torção são realizados com dois tipos de provetes. A sua geometria e as suas dimensões são normalizadas, existindo a possibilidade destas variarem.

Para que fosse possível ter dimensões do provete diferentes, foi idealizado um carro móvel (secção 3.4) na parte superior da máquina, que permitisse variar o afastamento entre buchas e assim acomodar diferentes comprimentos do provete.

Os provetes podem variar entre os 100 mm e os 150 mm e os diâmetros entre os 10 mm e 30 mm, como foi referenciado anteriormente.

### 3.1.8 - Contrapeso

O contrapeso foi a solução mais simples e eficaz para evitar a instabilidade na parte inferior da cadeia cinemática, originada pelo peso do veio de ligação e do peso da bucha, estando o centro de massa desse conjunto acima do rolamento oscilante de esferas.

Assim, na dissertação anterior, projetou-se um contrapeso capaz de desviar a posição de centro de massa, garantido o alinhamento na vertical da bucha inferior. [2]

Como existia falta de espaço entre o apoio do redutor e o apoio do rolamento para inserir o contrapeso, teve-se que estudar uma configuração que fosse possível. Assim, criou-se uma cavidade para poder alojar o acoplamento no seu interior, com um diâmetro conveniente para evitar o contacto, quando houvesse deformações.

O contrapeso possui um furo para que seja possível aceder ao parafuso sem cabeça, que atua sobre a face superior da chaveta do veio de ligação, mantendo a posição do acoplamento. Foi colocada uma anilha de espaçamento, na face de aperto do contrapeso, para garantir que o furo esteja alinhado com a chaveta aquando da montagem (Figura 29).

Maquinou-se o contrapeso e o material adotado para a construção foi o aço DIN CK45.

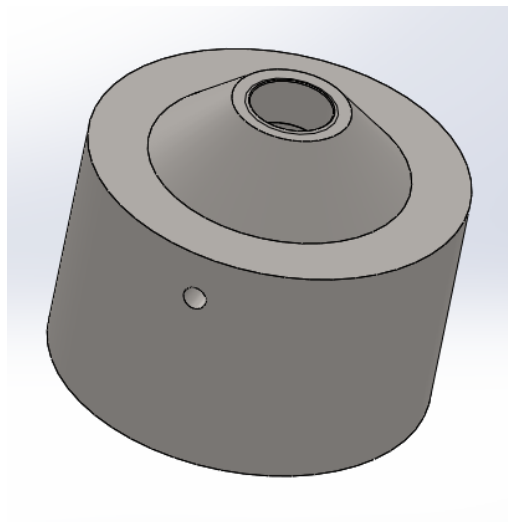


Figura 29 – Contrapeso em *Solidworks* [2]

### 3.1.9 - Servomotor e redutor

Tanto o servomotor como o redutor foram escolhidos na dissertação anterior.

O servomotor escolhido foi da marca *Parvex NX 310EAPR7301* [12] e o redutor planetário *Parvex GE3N216R0401* [13].

De seguida são apresentadas as características do servomotor e do redutor planetário.

- Servomotor *Parvex NX 310EAPR7301*
  - Binário em contínuo a baixa velocidade – 2 Nm;
  - Binário máximo (pico) – 6,6 Nm;
  - Veio cilíndrico com chaveta paralela;
  - Velocidade de rotação quando alimentado a 230 V – 2300rpm.
- Redutor planetário *Parvex GE3N216R0401*
  - Binário máximo – 80 Nm;
  - Veio de saída com chaveta paralela A ISO/R 773 6 x 6 x 25-St;
  - Redução 216:1 – três andares.

Nas Figuras 30 e 31 são apresentados o servomotor e o redutor.



Figura 30 - Servomotor *Parvex NX 310EAPR7301*



Figura 31 – Redutor planetário *Parvex GE3N216R0401*

### 3. Princípio de funcionamento mecânico

A ligação do motor ao redutor é feita através de um acoplamento rígido da marca HUCO [14] que está no interior de uma luneta. O redutor é posicionado através de uma flange e está preso por parafusos no apoio.

A luneta foi desenvolvida em *Solidworks* como mostra a Figura 32.

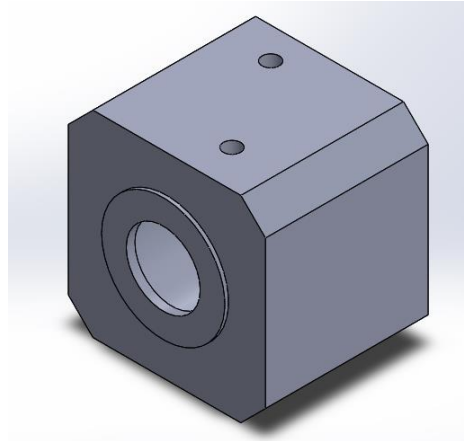


Figura 32 – Luneta em *Solidworks*

A luneta tem dois furos na parte superior, para que se consiga fazer o aperto do acoplamento rígido nos veios. O desenho de definição é apresentado no anexo E.

O acoplamento rígido é representado na Figura 33.



Figura 33 – Acoplamento rígido da marca Huco [14]

A Tabela 6 apresenta as características do acoplamento rígido escolhido. [14]

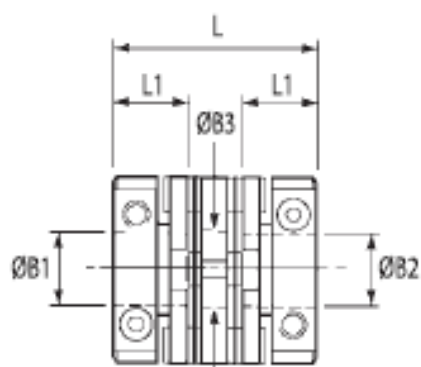


Tabela 6 – Características do acoplamento rígido HUCO [14]

| L<br>mm | L1<br>mm | ØB1<br>mm | ØB2<br>mm | ØB3<br>mm | J<br>kgm <sup>2</sup> x<br>10 <sup>-3</sup> |
|---------|----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------------------------|
| 48.5    | 17       | 16        | 16        | 17.5      | 2220                                        |

A Figura 34 apresenta o servomotor ligado ao redutor através da luneta.

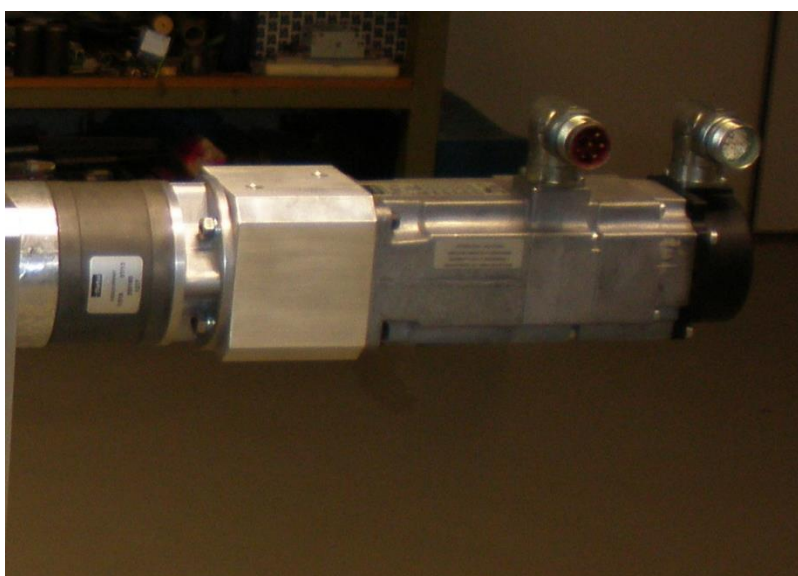


Figura 34 – Fotografia da ligação servomotor - redutor

### 3.2 Base

A base suporta toda a cadeia cinemática da máquina. Inicialmente optou-se por uma solução recorrendo a dois perfis UPN 80 soldados a uma chapa, como está representado na Figura 35. [15]

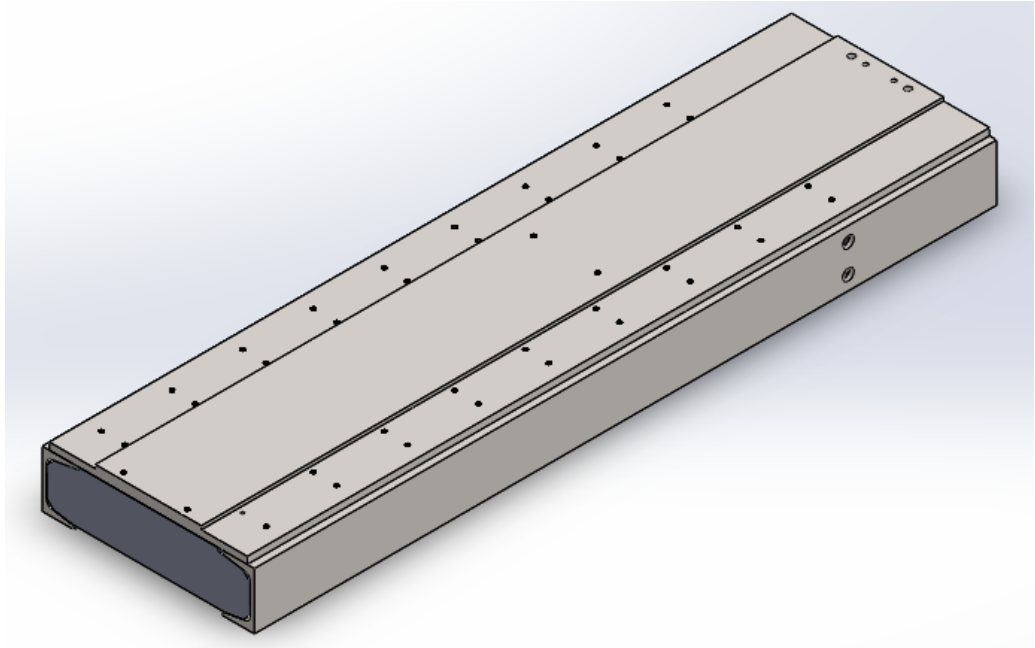


Figura 35 – Base parte da frente [2]

As nervuras seriam soldadas aos perfis UPN e à chapa (Figura 36) e depois seria maquinada de acordo com as tolerâncias e dimensões indicadas no respetivo desenho técnico. Ter-se-ia que garantir planeza na zona de assentamento das guias lineares.

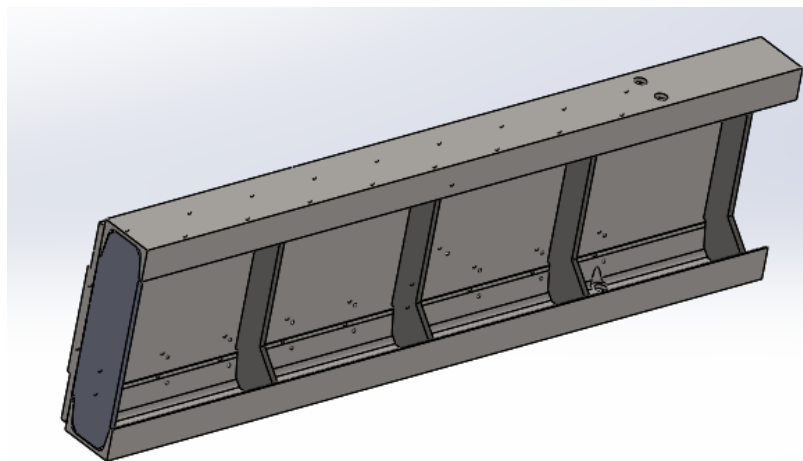


Figura 36 – Base parte de trás [2]

Na FEUP não era possível fazer a soldadura para a união das costelas nos perfis de construção e na chapa. Ter-se-ia que recorrer a uma empresa externa, ficando o projeto mais caro e despendendo mais tempo.

Com este problema, sugeriu-se alterar a construção da base, tendo como objetivo principal uma solução viável e económica.

Na Figura 37 está representada a solução final. Recorreu-se à utilização de perfis de alumínio *Bosch*. É importante que a base tenha uma construção suficientemente rígida para aquando do ensaio esta não se deforme e não desalinhe a cadeia cinemática, acrescentando cargas no provete.

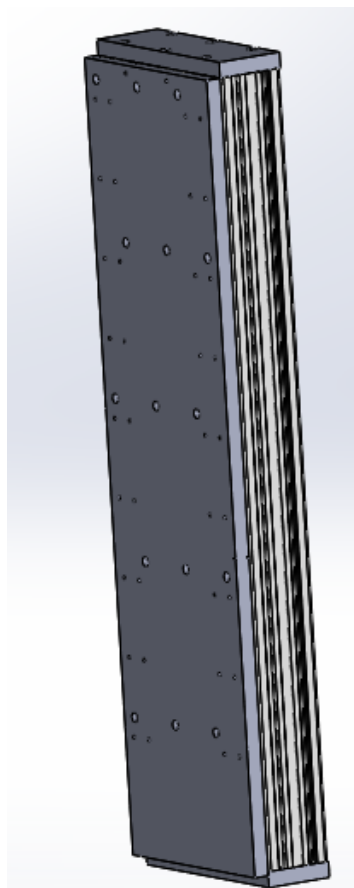


Figura 37 – Solução final – Base

Utilizaram-se 3 perfis *Bosch* 90x90 [15] e uma placa de alumínio com espessura de 20 mm. O comprimento é de um metro. Assim, já seria possível maquinar a face na FEUP, conseguindo-se a planeza conveniente para assentar as guias lineares, não sendo necessária a soldadura.

Os topos são placas de alumínio de espessura 20 mm são aparafusados nos perfis *Bosch* (Figura 38 e Figura 39), sendo o topo inferior diferente, onde se fixa o apoio ao redutor que é aparafusado e encavilhado.

### 3. Princípio de funcionamento mecânico

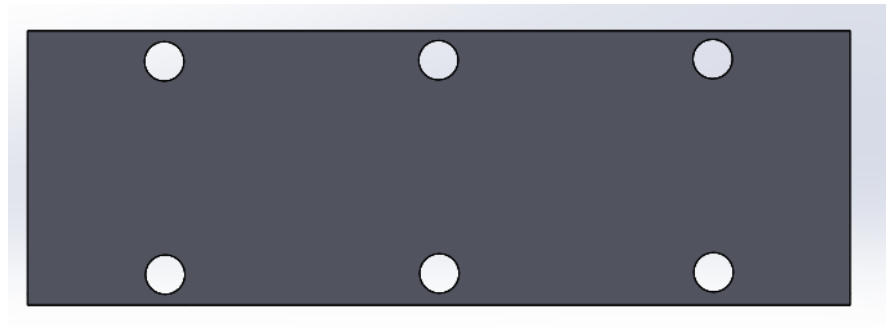


Figura 38 – Placa Topo Superior

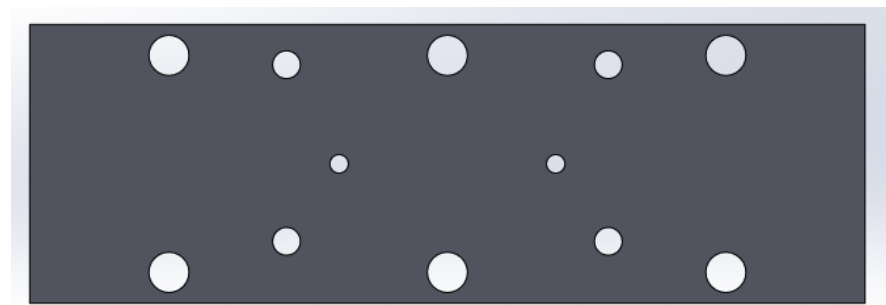


Figura 39 – Placa Topo Inferior

Nos anexos F, G, e H, encontram-se os desenhos do conjunto da base.

#### 3.3 Apoios

Em toda a solução apresentada existem quatro apoios no sistema, dois deles encastrados, situados nos extremos, e outros dois onde se inserem os rolamentos que dão suporte às buchas.

##### 3.3.1 - Apoio – transdutor

Para o apoio do transdutor, o posicionamento é feito através de dois pinos cilíndricos ISO 2338-6m6 x 30 – A1 [10] no carro móvel, ajustando-se no apoio com aperto (P6/m6) e com guiamento no carro (G6/m6). O apoio é apertado com dois parafusos CHC ISO 4762-M8x45-8.8 [16] e duas anilhas ISO 7089-8-A140. [16]

É utilizado um veio de posicionamento (Figura 40) com um anel elástico para posicionar o transdutor de binário e fixado através de seis parafusos CHC 4762-M8x45-8.8 [16] e seis anilhas ISO 7089-8-A140 [16].

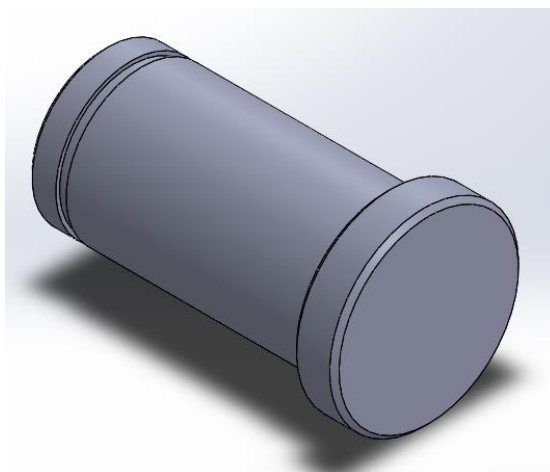


Figura 40 – Veio de posicionamento [2]

A Figura 41 mostra o pormenor da ligação do transdutor ao apoio, onde se consegue ter uma perceção de como é montado e centrado.

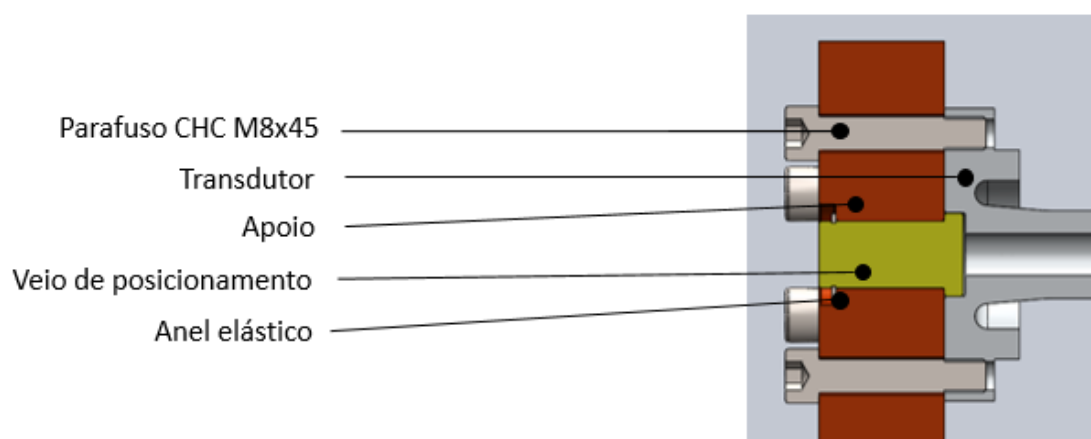


Figura 41 – Pormenor da ligação do transdutor ao apoio [2]

### 3. Princípio de funcionamento mecânico

O apoio foi maquinado em alumínio 5083, sendo representado na Figura 42.



Figura 42 – Fotografia do apoio - transdutor

#### 3.3.2 - Apoio – bucha superior

Este apoio é posicionado como no caso anterior, por dois pinos cilíndricos ISO 2338-6m6 x 30 – A1 [16], ajustando-se no apoio com guiamento (G6/m6) com aperto no carro (P6/m6) e fixado com dois parafusos CHC ISO 4762-M8x50-8.8 [16] e duas anilhas ISO 7089-8-A140 [16].

O apoio é construído também em alumínio 5083.

As alterações que foram feitas nesta peça, já foram citadas anteriormente.

A Figura 43 mostra a peça maquinada.

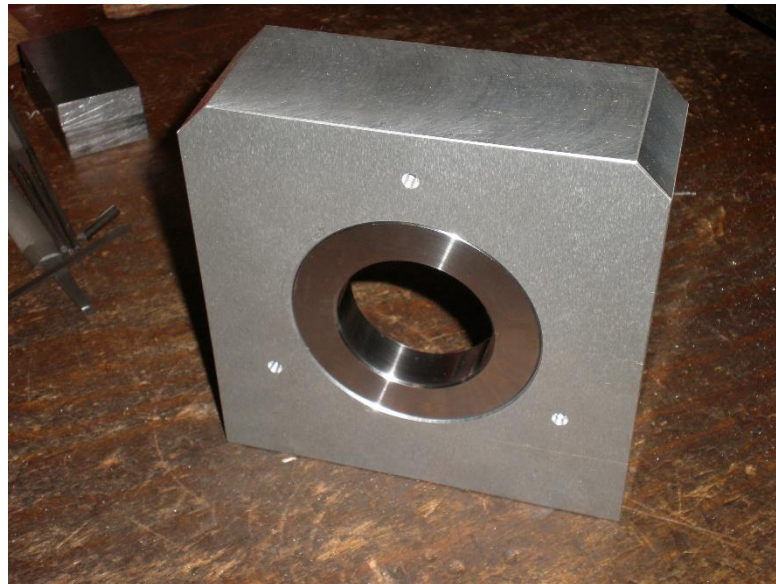


Figura 43 – Fotografia do apoio bucha superior

O respectivo desenho retificado pode ser consultado no anexo I.

### 3.3.3 - Apoio – bucha inferior

Este apoio é posicionado diretamente em cima das guias e fixado por um parafuso CHC ISO 4029-M6x20-A1 [16]. Esta solução permite um melhor alinhamento.

Para este apoio o material utilizado é o alumínio 5083.

As alterações desta peça foram mencionadas anteriormente e os respectivos desenhos podem ser consultados no anexo J.

A Figura 44 mostra a peça maquinada.



Figura 44 – Foto do apoio bucha inferior

#### 3.3.4 - Apoio – redutor

O apoio era ligado diretamente à base. Inicialmente era ligado através de dois pinos cilíndricos, ISO 2338-6m6 x 20 [16], dois parafusos CHC ISO 4762-M8x25-8.8 [16] e duas anilhas ISO 7089-8-A140 [16] para a fixação (Figura 45).

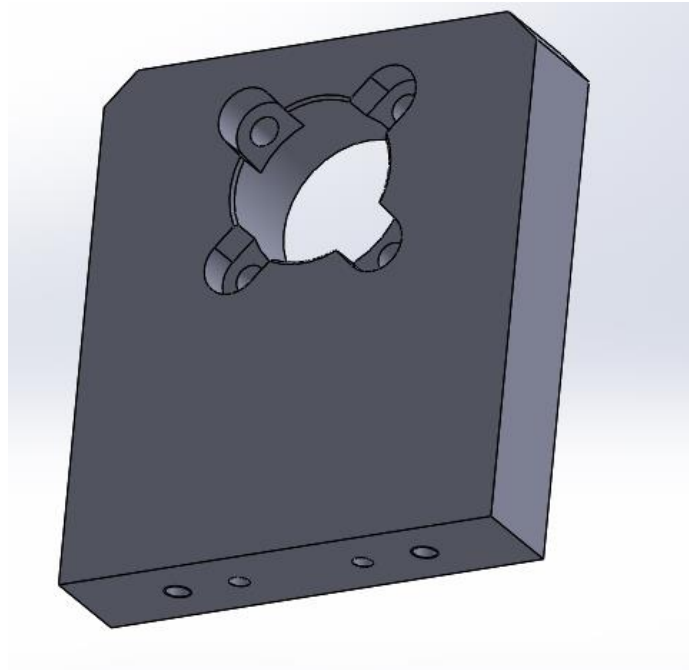


Figura 45 – Apoio – Redutor (solução inicial) [2]

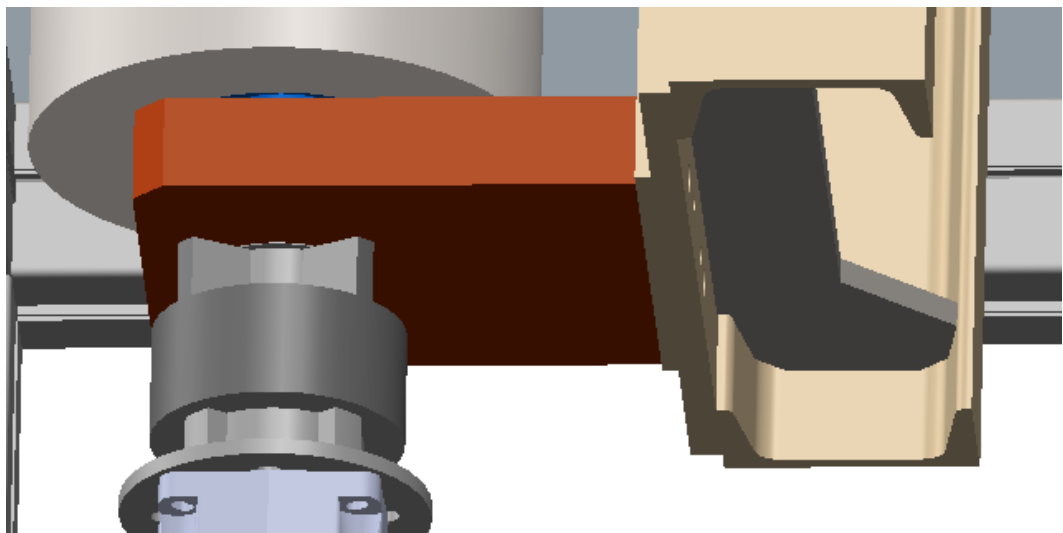


Figura 46 – Fixação do Apoio – Redutor (solução inicial) [2]

Para melhorar a fixação optou-se por uma ligação paralela, utilizando quatro parafusos e duas cavilhas para posicionar (Figura 47).

Verificou-se que esta solução seria mais rígida do que a solução apresentada anteriormente e permitiria o ajuste de centragem com o eixo da cadeia cinemática, comparando com os outros eixos de apoio.

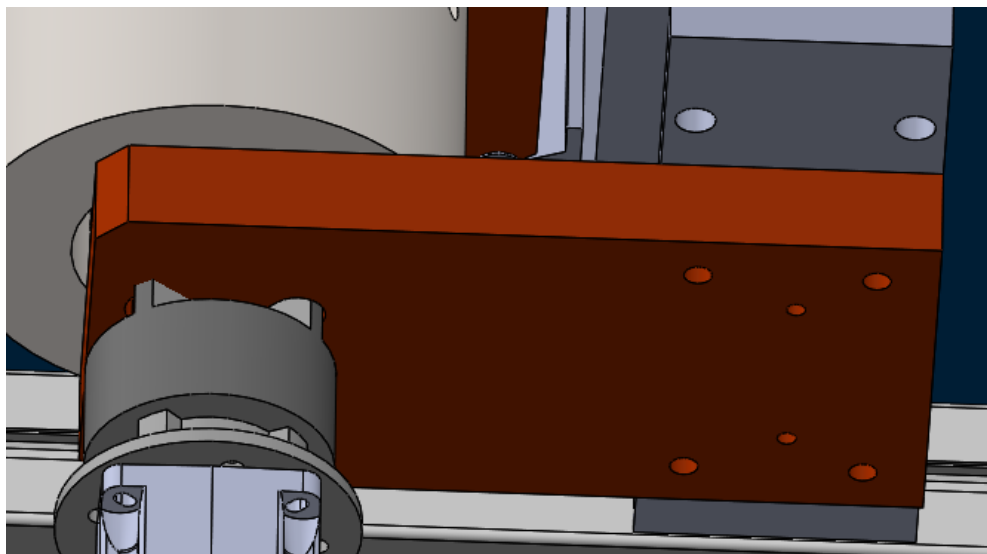


Figura 47 – Fixação do Apoio – Redutor – Solução Final

A Figura 48 mostra a peça maquinada.



Figura 48 - Fotografia do apoio redutor

No anexo K, encontra-se o desenho do apoio.

### 3.4 Carro móvel

Como já foi referido anteriormente, o carro móvel é capaz de aproximar e afastar as buchas, podendo-se assim inserir provetes de diferentes comprimentos. Além dessa vantagem, o carro móvel também evita forças de tração no adesivo, isto é, quando este estiver submetido a torção o provete irá reduzir o seu comprimento, sendo então importante a aproximação das garras para aliviar as tensões normais que irão aparecer.

O material utilizado foi o alumínio, como os casos anteriores.

A Figura 49 apresenta o carro móvel maquinado.

### 3. Princípio de funcionamento mecânico



Figura 49 - Fotografia do carro móvel

O carro móvel tem quatro mangas de deslizamento, para permitir deslizamento sobre as guias, o que será mencionado mais adiante.

#### 3.5 Mesa de suporte

A opção aprovada inicialmente foi de utilizar perfis *Bosch* [15], com um tampo em alumínio recortado, para alojar a parte inferior da máquina.

O desenho do tampo teve que ser modificado, porque a base foi alterada como referido anteriormente. Pode ver-se o desenho do tampo no anexo L.

A Figura 50 mostra a mesa montada.



Figura 50 – Fotografia da mesa.

Todos os componentes elétricos e eletrônicos são alojados no seu interior com o painel de controlo na máquina fixado na própria mesa (ver capítulo 5).

Faz-se uso de esquadros da *Bosch* [15], para permitirem o apoio e estabilidade da máquina (Figura 51).

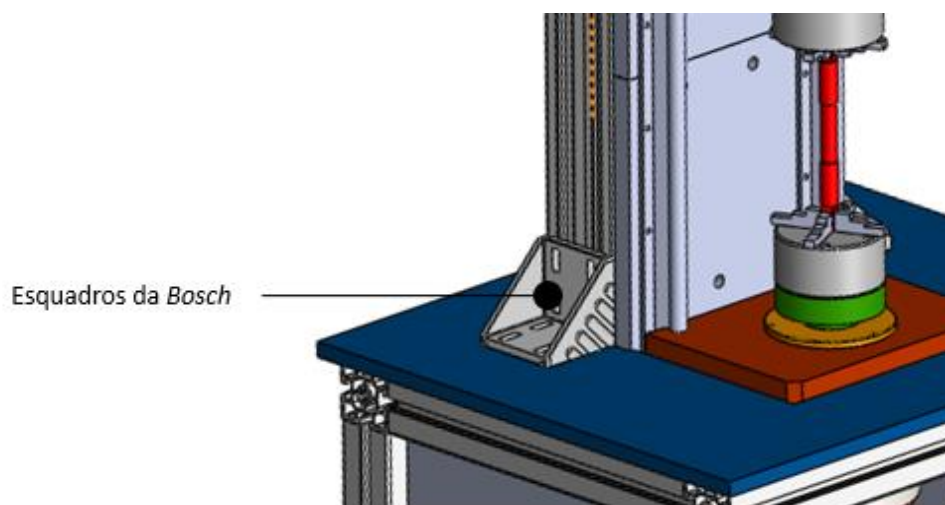


Figura 51 – Representação dos esquadros da *Bosch* em *Solidworks*

### 3.6 Guias e mangas de deslizamento

A solução encontrada para permitir o movimento linear do carro foi a utilização de guias de veio apoiado com mangas de deslizamento aberto (Figura 52).

Esta foi a solução encontrada porque tendo em conta que se pretende que a máquina tenha uma rigidez considerável para evitar erros de leitura, seria aconselhado a utilização de guias apoiadas em todo o seu comprimento, evitando assim a flexão das mesmas.



Figura 52 – Guia veio apoiado aberto [17]

### 3. Princípio de funcionamento mecânico

Usaram-se duas guias com um comprimento de 900 mm, com entre-eixo de 200 mm.

Para o deslizamento do carro, optou-se por quatro mangas da SKF LBCT16 A-2LS (Figura 53).



Figura 53 – Manga SKF LBCT 16 [17]

#### 3.7 Contrapeso de equilíbrio das partes móveis

Houve a necessidade de colocar um contrapeso na parte de trás da base, este permite evitar o movimento do carro móvel e equilibrar o peso deste, impedindo a compressão/tração do provete.

Inicialmente pesaram-se todos os componentes que se encontram ligados ao carro móvel, dando uma massa total de 17 kg. Assim foi projetado um contrapeso constituído por três chapas com um peso igual ao conjunto do carro móvel (Figura 54).

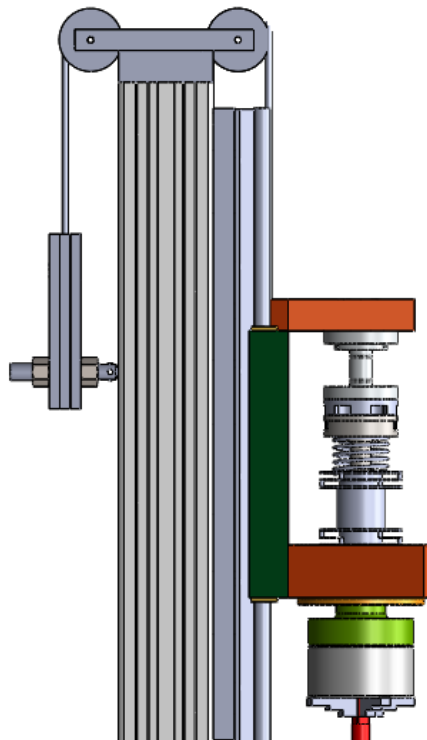


Figura 54 – Esquema do contrapeso

Como se observa na Figura 53, existe uma cantoneira com duas roldanas, que ajuda a fazer o contrabalanço. É utilizado um cabo de aço de espessura de 3 mm para fazer a ligação entre o apoio do transdutor e o contrapeso.

Para que o contrapeso não bata contra os perfis da base, foram fixados dois rolamentos 625-2Z, num veio roscado M16, para fazer de guiamento sobre os perfis.

Posteriormente este contrapeso foi substituído por uma massa cilíndrica, por forma a simplificar a construção.

A Figura 55 mostra a fotografia do contrapeso.



Figura 55 – Fotografia do contrapeso de equilíbrio das partes móveis

### 3.8 Detalhes do projeto mecânico

Depois de ter feito as correções e ter encontrado uma solução possível para a construção da máquina de ensaios à torção de juntas de adesivas, é necessário validar a solução tendo em conta as solicitações a que esta vai estar sujeita. Para fazer esse estudo, recorreu-se ao *Solidworks* 2013®, programa que permite modelar a três dimensões peças e simular comportamentos aplicando forças, usando o método de elementos finitos.

Tendo em conta o tipo de ensaios e esforços a que está sujeita toda a estrutura e os resultados que se pretendem observar, o método de elementos finitos é suficiente. Assim consegue-se analisar a resistência mecânica através do *Solidworks* 2013®. [18]

#### 3.8.1 – Simulação da embraiagem de garras

Neste capítulo apresenta-se o estudo da análise estática que se realizou à embraiagem de garras. Para isso aplicou-se o método de elementos finitos capaz de resolver problemas complexos. Esta técnica baseia-se na utilização uma malha; o elemento divide-se em pequenas partes de geometria simples. Quanto maior o número de elementos de malha utilizados em princípio, mais exatos serão os resultados.

Outra propriedade importante para a simulação de elementos finitos, é a caracterização das condições de fronteira, sendo que por vezes é complicado encontrar as condições ideais que representam a realidade.

As propriedades escolhidas da malha para efeitos de simulação foram:

- Malha sólida: tipo de malha utilizada em objetos de grandes dimensões, criando elementos 3D (tetraédricos).
- Tamanho dos elementos: para cada peça, o número de elementos, varia consoante a complexidade da peça e o seu volume. Sendo que, quanto maior a densidade da malha, melhor resultados apresenta.

O estudo da embraiagem de garras foi efetuado com a ajuda do acoplamento curto (este foi desenhado só com as medidas exatas de comprimento, porque para a criação da malha importa reduzir o nível de detalhes) e do veio, Figura 56. O objetivo da utilização do acoplamento curto é de simular as condições de fronteira e a colocação da mola, tornando assim o acoplamento encastrado, como se pode ver a na Figura 56. Representa-se a azul o local onde a mola está “alojada”. Deste modo consegue-se fazer uma simulação que se aproxima da realidade.

A carga aplicada foi um binário de 60 Nm, binário máximo desenvolvido pelo motor-reductor nos testes a realizar. A rigidez da mola é de 10280 N/m e uma força de montagem de 150 N à compressão (Figura 56).

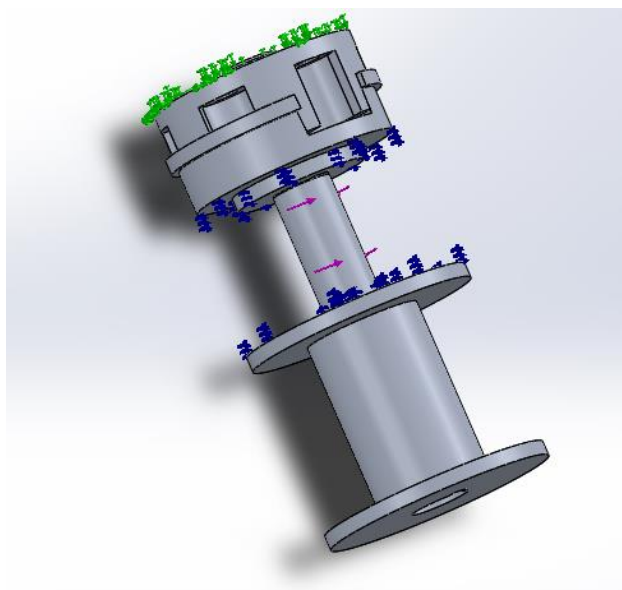


Figura 56 – Condições de fronteira e carregamento na embraiagem de garras

A malha escolhida para a embraiagem de garras é apresentada na Figura 57 possuindo 9426 elementos.

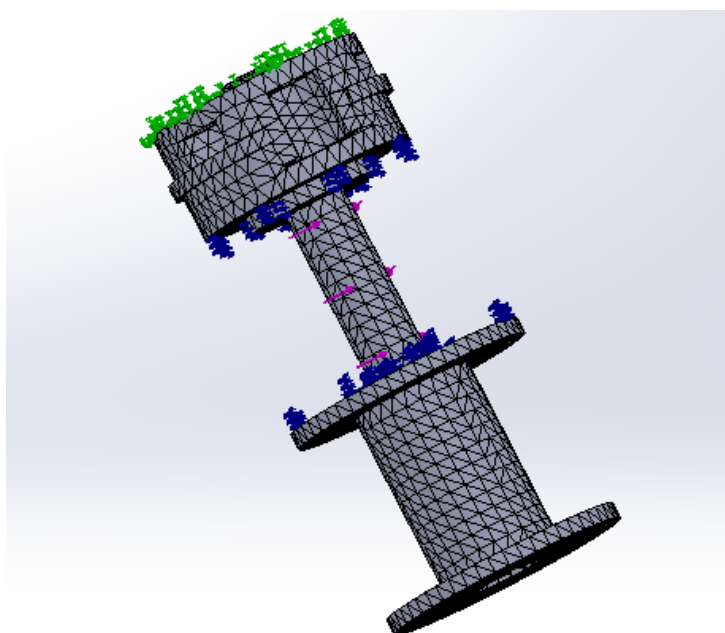


Figura 57 – Malha da embraiagem de garras

### 3. Princípio de funcionamento mecânico

Os resultados obtidos são apresentados de seguida nas Figura 58, Figura 59.

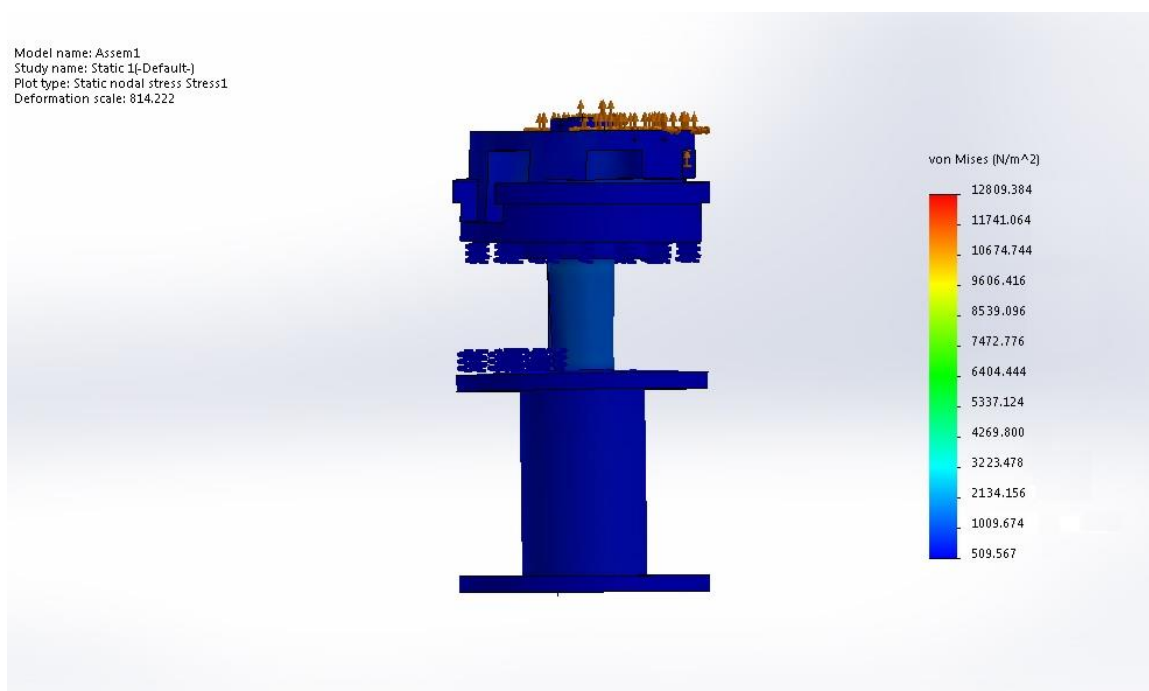


Figura 58 – Distribuição de tensões de von Mises (MPa)

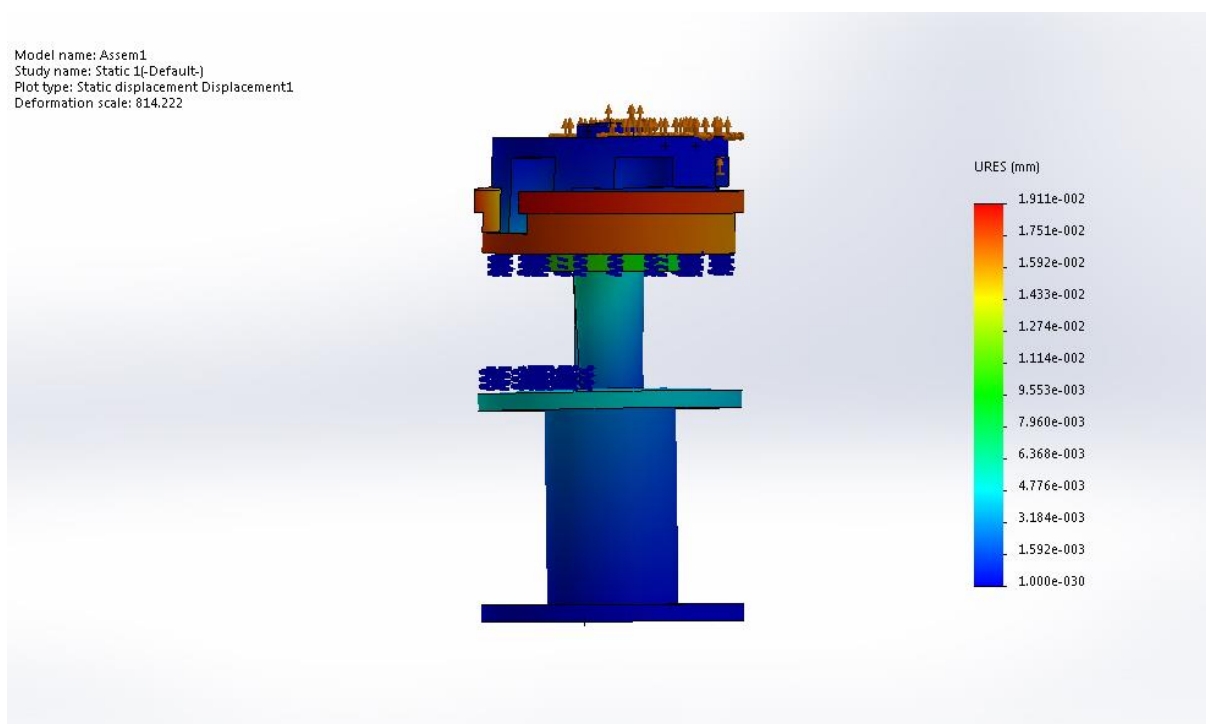


Figura 59 – Deslocamento resultante segundo x, y e z (mm)

Consultando os resultados obtidos nas figuras anteriores, verifica-se que com o binário aplicado, as tensões máximas que ocorrem são inferiores à tensão de cedência do material utilizado. Analisando o deslocamento, verifica-se que a deformação máxima ocorre na parte inferior da embraiagem, sendo a sua deformação  $1,91 \times 10^{-2} \text{mm}$ .

### 3.8.2 - Procedimento para alinhamento dos centros

A Figura 60 mostra o desenho da montagem para a centragem dos apoios:

- 1- Apoio – Transdutor
- 2- Apoio – Bucha Superior
- 3- Apoio – Bucha Inferior
- 4- Apoio - Redutor

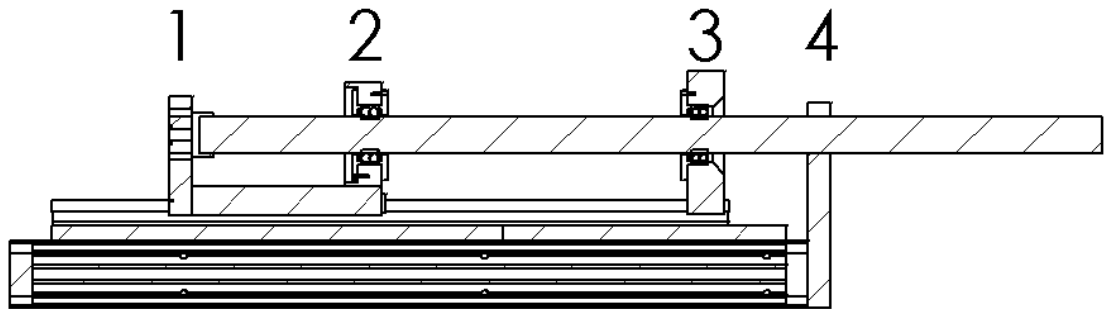


Figura 60 – Desenho da montagem para centragem

Para se conseguir garantir o alinhamento dos centros, materializado pelos apoios um a quatro, utilizou-se uma ferramenta constituída para o efeito. Esta ferramenta é constituída por um veio Ø50 h6 (veio de guiamento linear) que apoia diretamente no apoio quatro (Apoio – Redutor). Para os apoios dois e três foi necessário maquinar um casquilho que monta diretamente nas caixas de rolamento (ver Figura 23 e Figura 24 na secção 3.1.5)

A extremidade que assenta sobre o apoio um (Apoio – Transdutor), assegura o posicionamento por uma peça que alinha pelo orifício do veio de centragem do transdutor de binário. Isto feito, foi possível estabelecer o posicionamento dos apoios, um e quatro, e proceder à sua montagem com cavilhas.

### 3.9 – Resultado final da montagem

Depois de se ter feito o alinhamento dos centros, procedeu-se à montagem de todos os componentes. O resultado final da montagem, está representado na Figura 61 e Figura 62.



Figura 61 – Fotografia da parte superior da bucha



Figura 62 – Fotografia das duas buchas de fixação

## 4. Automatização do sistema

Neste capítulo é apresentado o modelo do sistema físico, os diferentes controladores utilizados (posição e binário) e os respetivos ganhos. [3]

O *software* de controlo é baseado em *Matlab*®. Trata-se de uma aplicação adequada para a criação de gráficos através de funções, cálculo numérico, manipulação de matrizes e desenvolvimento de interfaces com outros programas escritos em linguagem *Java*, *C* ou *Fortran*. Hoje em dia este *software* é essencial para muitos trabalhos científicos, como de elementos finitos, controlo, análise matemática entre outros.

Dentro do *Matlab*® existe uma ferramenta com o nome de *Simulink*® que permite a modelação, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Esta ferramenta é bastante útil para a validação de resultados, permite a programação em ambiente gráfico, dispondo de várias bibliotecas de funções, sendo possível criar e configurar outras.

O *Simulink*® tem uma aplicação denominada Real-Time Windows Target, onde é possível gerar automaticamente código *C* para aplicações em tempo real. Esta aplicação disponibiliza uma série de *device drivers* de tempo-real, o que permite o uso de cartas I/O, A/D e D/A que existem no mercado.

### 4.1 – Estudo do Sistema Físico e Modelo do Sistema

Como já foi referido anteriormente, o sistema mecânico da máquina de ensaios à torção é composto por vários componentes, que permitem a transmissão de energia desde o servomotor até ao provete a ensaiar. Na Figura 63 é apresentada toda a cadeia cinemática da máquina.

#### 4. Automação do Sistema

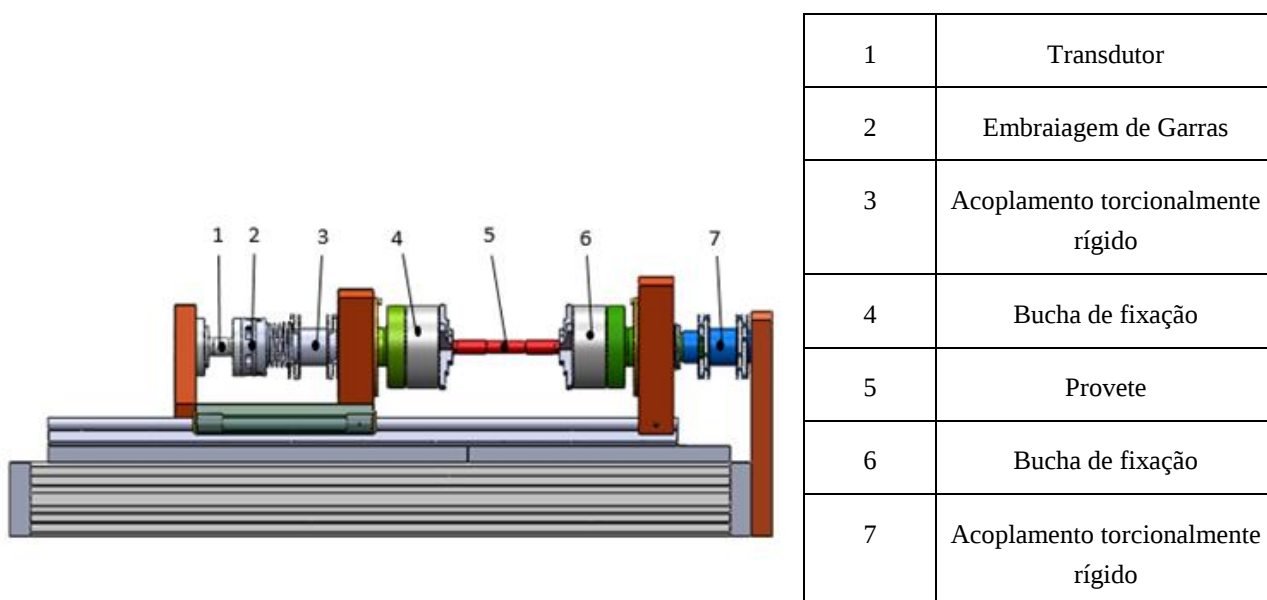


Figura 63 – Representação de toda a cadeia cinemática da máquina

O comportamento do sistema depende do amortecimento, inércia, atrito e rigidez de todos os componentes. Assim, foi realizado um estudo individual de todos os componentes da cadeia cinemática. [3]

De seguida são apresentados os dados de cada componente. Alguns valores foram calculados, outros foram fornecidos pelos fabricantes.

**Provete:**

O provete é constituído por dois veios (substrato) e um adesivo estrutural que os liga. A espessura do adesivo,  $l_{ad}$ , varia entre 0,2 e 2 mm e o seu módulo de rigidez,  $G_{ad}$ , encontra-se num intervalo que vai desde 1 MPa a 2000 MPa. Assim, a sua rigidez torsional é variável. Para efeitos de simulação será calculada pela lei de *Hooke* [19], considerando-se apenas o seu comportamento elástico.

Sabe-se que a partir de um determinado momento torsor vai ocorrer plasticidade e desta forma a rigidez torsional variará. Assumiu-se que a rigidez torsional é constante no adesivo, pois não são conhecidas expressões matemáticas que relacionem o deslocamento angular com o binário, na zona plástica do adesivo.

Considerou-se sempre um provete maciço nas simulações. Sabendo que a tensão de corte é dada pelas equações 3 e 4:

$$\tau = G_{ad} \cdot \gamma \quad (3)$$

$$\tau = \frac{16T}{\pi d_{ad}^3} \quad (4)$$

e a deformação de corte dada pela equação 5:

$$\gamma = \frac{d_{ad} \cdot \theta}{2l_{ad}} \quad (5)$$

conjugando-se as 3 equações tem-se que o binário é dado por:

$$T = \frac{\pi \cdot d_{ad}^4 \cdot G_{ad}}{32l_{ad}} \theta = K_{ad} \cdot \theta \quad (6)$$

Assim, chega-se à equação que relaciona diretamente o binário com o deslocamento angular (equação 6).

Os extremos da rigidez torsional,  $K_{ad}$ , são os seguintes:

- Para  $G_{ad} = 1$  MPa,  $l_{ad} = 2$  mm e  $d_{ad} = 15$  mm, tem-se:  
- $K_{ad} = 2,485$  Nm/rad.
- Para  $G_{ad} = 2000$  MPa,  $l_{ad} = 0,2$  mm e  $d_{ad} = 30$  mm, tem-se:  
- $K_{ad} = 795220$  Nm/rad.

Além da rigidez torsional, estudou-se o amortecimento. A razão de amortecimento é dada pela equação 7:

$$\zeta = \frac{\psi}{4\pi} \quad (7)$$

o rácio de amortecimento viscoso ( $\psi$ ) de um conjunto que é formado pelo adesivo e por uma placa de alumínio é aproximadamente  $\psi = 1 \times 10^{-4}$ . [1]

o amortecimento,  $c$ , é dado pela equação 8:

$$c = \zeta \cdot 2 \cdot m_{ad} \cdot w_n \quad (8)$$

como o grau de movimento que interessa considerar é o movimento em torno do eixo da máquina,  $m_{ad} = J_1 = 0,3336 \text{ Kg.m}^2$ .

Sabendo que a frequência natural é dada pela equação 9:

$$w_n = \sqrt{\frac{K_{ad}}{J_1}} \quad (9)$$

e assumindo o pior caso de rigidez torsional,  $K_{ad} = 795220 \text{ Nm/rad}$ , tem-se  $W_n = 1543,9 \text{ rad/s}$ . Logo conjugando as equações anteriores tem-se  $c = D_{ad} = 0,082 \text{ Nms}$ . Como se esperava um valor muito reduzido e que não terá efeitos na aplicação prática.

A Tabela 7 mostra os dados relevantes do adesivo.

Tabela 7 – Dados relevantes do adesivo

| Caraterística                  | Valor          | Unidade |
|--------------------------------|----------------|---------|
| Modulo de rigidez ( $G_{ad}$ ) | [1;2000]       | MPa     |
| Amortecimento ( $D_{ad}$ )     | 0,082          | Nm. s   |
| Espessura ( $l_{ad}$ )         | [0,2;2]        | mm      |
| Diâmetro ( $D_{ad}$ )          | [15;30]        | mm      |
| Rigidez torsional ( $K_{ad}$ ) | [2,485;795220] | Nm/rad  |

**Substratos:**

O substrato por norma é em alumínio [20]. A sua geometria é cilíndrica, o diâmetro pode variar de 15 mm a 30 mm e o seu comprimento de 75 mm a 150 mm.

Na Figura 64 representa-se um substrato com dimensões normalizadas.

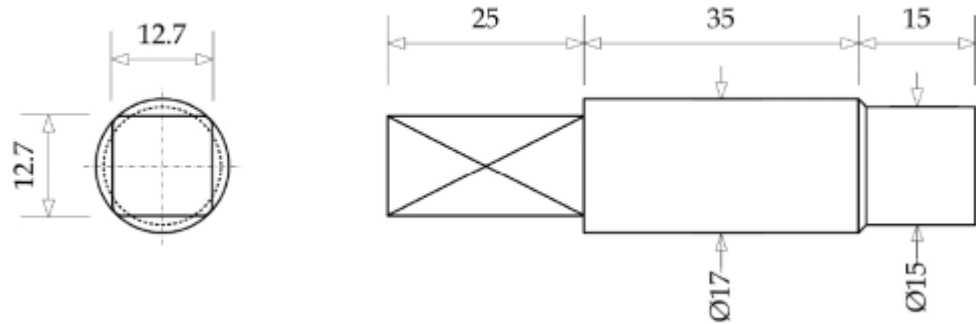


Figura 64 – Substrato com dimensões normalizadas (mm)

Segundo a equação 6, com o módulo de rigidez do alumínio,  $G_{al} = 26900$  MPa,  $l_{sub} = 75$  mm e  $d_{sub} = 15$  mm, tem-se que a rigidez torsional de cada substrato em alumínio é  $K_{sub} = 1782,6$  Nm/rad. Cada substrato acrescenta ao sistema uma massa e consequentemente um momento de inércia, que pode ser calculado segundo as equações seguintes [21]:

$$\begin{cases} J_{sub} = \frac{1}{12} \cdot m_{sub} \cdot l_{sub}^2 \\ m_{sub} = A \cdot \rho \cdot l_{sub} \\ A = \frac{\pi \cdot d_{sub}^2}{4} \end{cases} \quad (10)$$

em que  $\rho$  é a densidade do material.

A Tabela 8 resume os dados de cada substrato típico.

Tabela 8 – Dados de cada substrato

| Caraterística                    | Valor                   | Unidade            |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Rigidez torsional ( $K_{sub}$ )  | 1782,6                  | Nm/rad             |
| Momento de inércia ( $J_{sub}$ ) | $1,6774 \times 10^{-5}$ | kg. m <sup>2</sup> |
| Comprimento ( $l_{sub}$ )        | [75;150]                | mm                 |
| Diâmetro ( $D_{sub}$ )           | [15;30]                 | mm                 |

### Servomotor:

O servomotor transforma a corrente elétrica em binário, segundo a equação 11 [23]:

$$T_m = K_t \cdot I \quad (11)$$

em que  $K_t$  é a constante de binário do motor.

A Tabela 9 exhibe os dados do servomotor.

Tabela 9 – Dados do servomotor

| Caraterística                  | Valor                | Unidade            |
|--------------------------------|----------------------|--------------------|
| Constante de binário ( $K_t$ ) | 50000                | Nm/A               |
| Momento de inércia ( $J_m$ )   | $7,9 \times 10^{-5}$ | kg. m <sup>2</sup> |

### Redutor:

É usado um redutor planetário, com redução 1:216, para interface entre o servomotor e a carga.

O fornecedor não divulga o valor da rigidez torsional. A partir do valor médio de outros modelos com características próximas, estimou-se o valor da rigidez em  $K_r = 50000$  Nm/rad.

A Tabela 10 mostra os dados do redutor.

Tabela 10 – Dados do redutor

| Caraterística                | Valor                | Unidade            |
|------------------------------|----------------------|--------------------|
| Rigidez torsional ( $K_R$ )  | 50000                | Nm/rad             |
| Momento de inércia ( $J_R$ ) | $0,7 \times 10^{-5}$ | kg. m <sup>2</sup> |
| Rendimento ( $\eta$ )        | 78                   | %                  |
| Redução                      | 216:1                | -                  |

**Componentes de acoplamento:**

Como explicado no capítulo 3, a ligação do redutor ao provete é feita através de um acoplamento torcionalmente rígido, um veio escatelado e uma garra de quatro grampos (Figura 65).

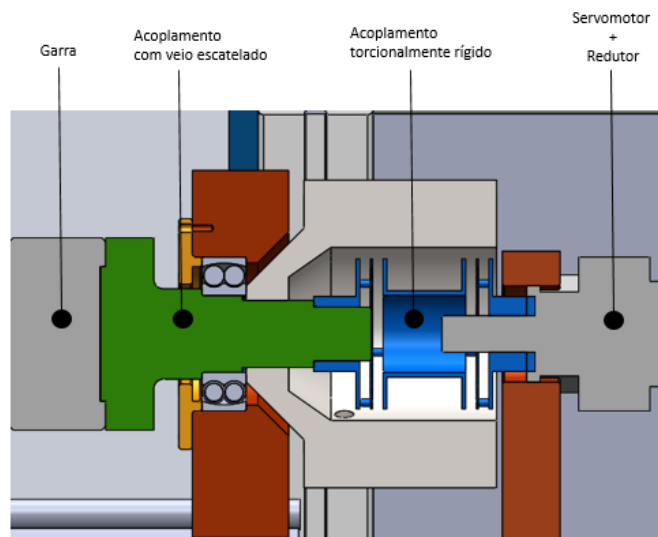


Figura 65 – Ligação do servomotor ao provete

Nenhum destes componentes, à exceção da garra, é suficientemente rígido para que a sua rigidez torsional possa ser considerada desprezável.

A Tabela 11 exhibe os dados mais relevantes destes componentes.

Tabela 11 – Dados dos componentes de acoplamento entre o redutor e o provete

| Componente                        | Caraterística                      | Valor                  | Unidade            |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------|
| Acoplamento torcionalmente rígido | Momento de inércia ( $J_{AC\_S}$ ) | $100 \times 10^{-5}$   | kg. m <sup>2</sup> |
|                                   | Rigidez torsional ( $K_{AC\_S}$ )  | 50000                  | Nm/rad             |
| Veio escatelado                   | Momento de inércia ( $J_{AC\_V}$ ) | $228 \times 10^{-5}$   | kg. m <sup>2</sup> |
|                                   | Rigidez torsional ( $K_{AC\_V}$ )  | 74000                  | Nm/rad             |
| Garra                             | Momento de inércia ( $J_G$ )       | $374,6 \times 10^{-5}$ | kg. m <sup>2</sup> |
|                                   | Rigidez torsional ( $K_G$ )        | $\infty$               | Nm/rad             |

#### 4. Automatização do Sistema

A ligação do provete ao transdutor de binário é feita por componentes idênticos aos mostrados na tabela anterior, com o acréscimo da embraiagem de garras e do transdutor de binário.

Para caracterizar a embraiagem de garras recorreu-se a um programa de elementos finitos. O programa foi o *SolidWorks 2014*.

Sabendo que a rigidez torsional é dada pela equação (12):

$$K_{emb} = \frac{T}{\theta} \quad (12)$$

Aplicando um binário de 100 Nm, obtém-se uma deformação segundo o eixo x de 0,0067 mm. (ver Figura 66).

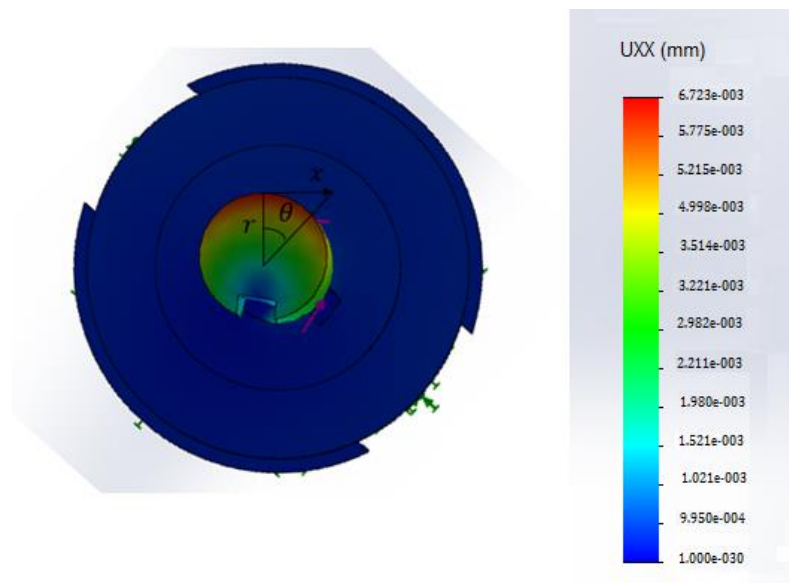


Figura 66 – Deformação segundo o eixo x

Utilizando a equação (12), obtém-se uma rigidez torsional,  $K_{emb} = 155320$  Nm/rad.

A Tabela 12 mostra os dados do transdutor de binário (fornecidos pelo fabricante) e da embraiagem de garras.

Tabela 12 - Dados do transdutor de binário

| Componente            | Caraterística                    | Valor                 | Unidade            |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Transdutor de binário | Momento de inércia ( $J_{TT}$ )  | $15,1 \times 10^{-5}$ | kg. m <sup>2</sup> |
|                       | Rigidez torsional ( $K_{TT}$ )   | 10135,1               | Nm/rad             |
| Embraiagem de garras  | Momento de inércia ( $J_{emb}$ ) | $27 \times 10^{-5}$   | kg. m <sup>2</sup> |
|                       | Rigidez torsional ( $K_{emb}$ )  | 155320                | Nm/rad             |

### Considerações finais:

Todos os componentes irão deformar-se ao longo do teste [24]. Assim sendo, foi calculada a rigidez torsional equivalente de dois grupos: todos os componentes desde o servomotor ao adesivo (equação 13) e deste ao transdutor de binário (equação 14).

$$K_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_{AC_S}} + \frac{1}{K_{AC_V}} + \frac{1}{K_{sub}}\right)} \quad (13)$$

$$K_2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{sub}} + \frac{1}{K_{AC_S}} + \frac{1}{K_{AC_V}} + \frac{1}{K_{emb}}\right)} \quad (14)$$

E o mesmo foi feito para o momento de inércia (Equação 14 e 15):

$$J_1 = J_R \cdot n^2 + J_{AC_S} + J_{AC_V} + J_G + J_{sub} \quad (15)$$

$$J_{2eq} = J_{sub} + J_G + J_{AC_V} + J_{AC_S} + J_{emb} + \frac{1}{2}J_{TT} \quad (16)$$

O momento de inércia do redutor está multiplicado por  $n^2$ , pois o valor dado pelo fornecedor é referenciado ao veio de entrada.

É considerado apenas metade do momento de inércia do transdutor de binário, porque este tem uma flange rigidamente fixa à estrutura, logo há apenas uma contribuição parcial da sua inércia total.

Tendo em conta toda a cadeia cinemática e a interação de todos os componentes, pode-se exprimir-se a dinâmica do sistema através das equações (17), que traduz o esquema apresentado na Figura 67.

$$\left\{ \begin{array}{l} T = (J_m \ddot{\theta}_0 + D_{atm} \dot{\theta}_0)n + \frac{K_1}{n} \left( \frac{\theta_m}{n} - \theta_1 \right) \\ K_1 \left( \frac{\theta_m}{n} - \theta_1 \right) \eta = J_1 \ddot{\theta}_1 + D_{at1} \dot{\theta}_1 + D_{ad}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{ad}) + K_{ad}(\theta_1 - \theta_{ad}) \\ D_{ad}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{ad}) + K_{ad}(\theta_1 - \theta_{ad}) = J_{ad} \ddot{\theta}_{ad} + K_2(\theta_{ad} - \theta_2) \\ K_2(\theta_{ad} - \theta_2) = J_{2eq} \ddot{\theta}_2 + D_{at2} \dot{\theta}_2 + K_{TT} \theta_2 \end{array} \right. \quad (17)$$

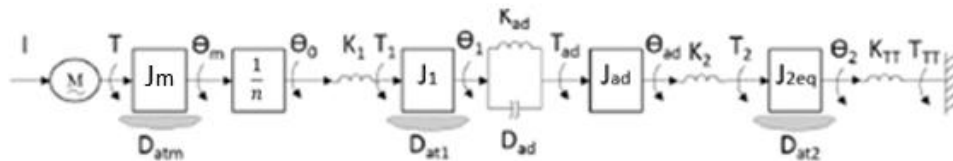


Figura 67 – Modelo do sistema físico completo

Além da influência da rigidez torsional, do momento de inércia e do amortecimento, este modelo contempla também as perdas de binário por atrito. Este atrito encontra-se nos rolamentos do servomotor, redutor e nos dois rolamentos que se encontram a seguir às garras de afiação ( $D_{atm}$ ,  $D_{at1}$ ,  $D_{at2}$ ). O atrito gerado nos rolamentos é muito reduzido e aliado a máquina se encontrar na posição vertical, considera-se desprezável.

Este modelo contempla o momento de inércia do adesivo,  $J_{ad}$ , por este valor ser muito reduzido, consequência das suas dimensões, pode haver alguns problemas inesperados na simulação. Assim, concluiu-se que seria melhor desprezar a inércia e considerar uma rigidez torsional equivalente de todos os componentes, desde o adesivo até ao transdutor. (Equação 18)

$$K_{2ad} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_{ad}}\right)} \quad (18)$$

O modelo fica definido pelo sistema de equações (18), que traduz o esquema apresentado na Figura 68.

$$\begin{cases} T = (J_m \ddot{\theta}_0 + D_{atm} \dot{\theta}_0)n + \frac{K_1}{n} \left( \frac{\theta_m}{n} - \theta_1 \right) \\ K_1 \left( \frac{\theta_m}{n} - \theta_1 \right) \eta = J_1 \ddot{\theta}_1 + D_{at1} \dot{\theta}_1 + D_{ad}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{ad}) + K_{2ad}(\theta_1 - \theta_2) \\ D_{ad}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + K_{2ad}(\theta_1 - \theta_2) = J_{2eq} \ddot{\theta}_2 + D_{at2} \dot{\theta}_2 + K_{TT} \theta_2 \end{cases} \quad (19)$$

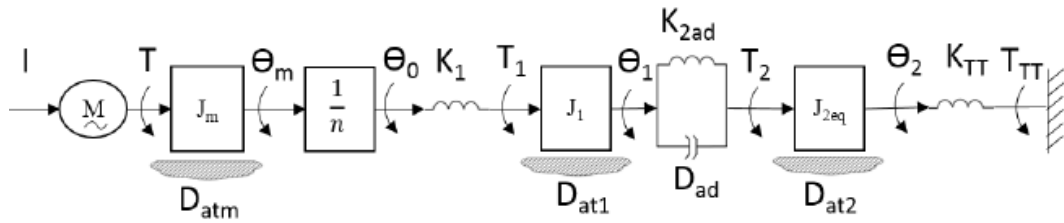


Figura 68 – Modelo do sistema físico aproximado

#### 4.1.1 – Controle do sistema

Como referido no capítulo 3, é pretendido que a máquina consiga realizar quatro tipos de testes: teste em controlo de binário, teste em controlo do deslocamento angular, teste de fluência e teste de relaxação.

No caso do teste do deslocamento angular e teste de relaxação utiliza-se o controlo de posição, enquanto nos outros dois testes utiliza-se o controlo de binário.

No teste de controlo de deslocamento angular, o objetivo que se pretende é ter uma velocidade de rotação constante do servomotor. Para isso é aplicada uma rampa de posição na entrada do sistema, com um declive igual à velocidade pretendida. Assim, as referências de posição vão variar de forma linear no tempo.

No teste de relaxação, pretende-se que o servomotor tenha uma velocidade constante até chegar a uma determinada posição definida pelo operador e onde ficará durante um tempo que é determinado pelo mesmo. Fazendo o controlo de posição, com uma referência em rampa para ter velocidades constantes e depois uma saturação para que as referências de posição fiquem constantes ao longo do tempo.

É possível utilizar o mesmo controlador, para o teste de relaxação e para o teste de controlo do deslocamento angular.

Nos testes de controlo de binário e fluência, o objetivo que se pretende é aplicar um binário de forma contínua e linear ao longo do tempo. O princípio é igual aos testes anteriores, aplica-se um binário, com uma referência em rampa. No teste de fluência, é pretendido aplicar um binário crescente no tempo até um valor definido pelo operador. Atingindo esse ponto, a referência passa a ser constante por meio de uma saturação. Desta forma usa-se o mesmo controlador para estes dois testes.

O controlador escolhido foi um controlador I-PD, uma vez que a função de transferência em malha fechada não apresenta zeros, o que poderia introduzir alguma instabilidade no sistema [25]. A Figura 69 apresenta o esquema do controlador.

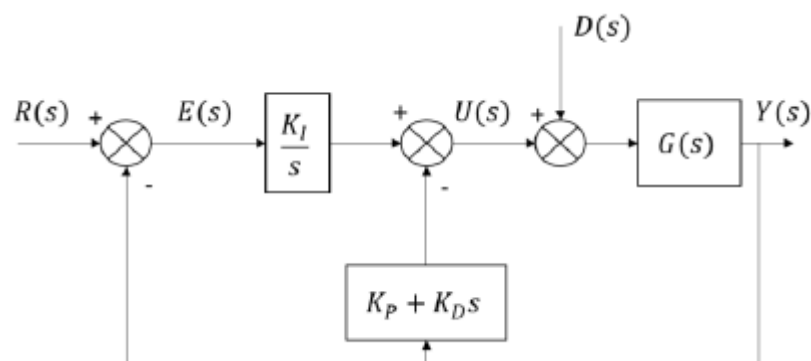


Figura 69 – Esquema do controlador I-PD

Nas próximas secções, serão apresentados os ganhos do controlador, para os dois tipos de controlo que será feito: posição e binário.

#### 4.1.2 – Controlador de posição I-PD

O método escolhido foi de simplificar o modelo do sistema físico, passando de um sistema de sexta ordem para um de segunda. O modelo passou a representar o controlo de um eixo contra o momento resistente de uma mola. Juntou-se a inércia do redutor, servomotor e todos os componentes até ao adesivo, como se apenas um corpo se tratasse. Pode-se ver na Figura 70 o modelo simplificado.

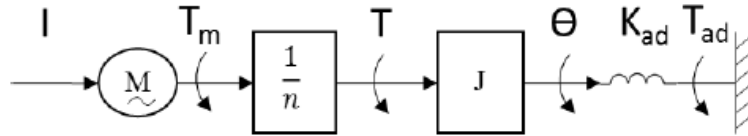


Figura 70 – Modelo simplificado para a obtenção dos ganhos no controlador

A Figura 71 mostra a representação *Simulink* do sistema com controlador, em controlo de posição:

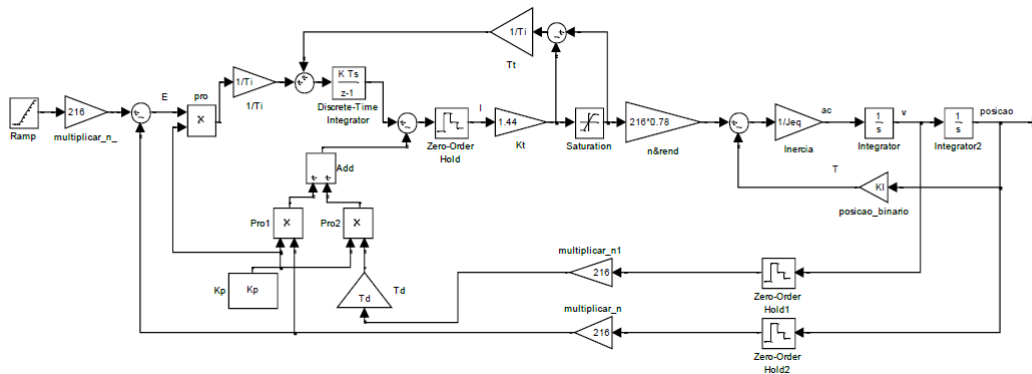


Figura 71 – Diagrama de blocos do controlador de posição I-PD, para o cálculo dos ganhos

A função transferência de malha fechada do sistema fica definida, pela equação 20.

$$FT = \frac{\theta}{R} = \frac{K_i \cdot K_t \cdot \eta \cdot n^2}{J_{eq}} \cdot \frac{1}{s^3 + \frac{K_d \cdot K_t \cdot \eta \cdot n^2}{J_{eq}} \cdot s^2 + \frac{K_p \cdot K_t \cdot \eta \cdot n^2}{J_{eq}} \cdot s + \frac{K_i \cdot K_t \cdot \eta \cdot n^2}{J_{eq}}} \quad (20)$$

onde  $K_i$  é o ganho integral,  $K_p$ , o ganho proporcional,  $K_d$ , ganho derivativo,  $K_t$ , constante de binário do servomotor e  $J_{eq}$ , a inércia de todo o sistema.

Os ganhos foram calculados colocando os três polos à frequência de 80 rad/s:

$$(s + w_n)^3 = s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = s^3 + 3s^2 w_n + 3s w_n^2 + w_n^3 \quad (21)$$

Conjugando as equações 20 e 21, obtém-se:

$$\begin{cases} K_d = \frac{3w_n \cdot J_{eq}}{K_t \cdot \eta \cdot n^2} \\ K_p = \frac{3w_n^2 \cdot J_{eq}}{K_t \cdot \eta \cdot n^2} \\ K_i = \frac{3w_n^3 \cdot J_{eq}}{K_t \cdot \eta \cdot n^2} \end{cases} \quad (22)$$

Sabendo que:

$$\begin{cases} K_{ad} = \frac{\pi \cdot D^4 \cdot G}{32l} = 2,485 \\ D_{ad} = 0,015 \\ l_{ad} = 0,002 \\ \eta = 0,78 \\ n = 216 \\ G_{ad} = 1 \times 10^6 \\ K_t = 1,44 \\ w_n = 80 \\ J_{eq} = 3,7 \end{cases} \quad (23)$$

Os ganhos do controlador são:

$$\begin{cases} K_d = 0,0169 \\ K_p = 1,3530 \\ K_i = 36,0801 \end{cases} \quad (24)$$

ou ainda:

$$\begin{cases} T_d = \frac{K_d}{K_p} = 0,0125 \\ K_p = 1,3530 \\ T_i = \frac{K_d}{K_i} = 0,0375 \end{cases} \quad (25)$$

**Frequência de amostragem:**

O período de amostragem pretendido é  $T_s = 0,001$  s, que é o valor típico usado em sistemas de controlo de força [26]. Assim tem-se que:

$$f_s = \frac{1}{T_s} = 1000 \text{ Hz} \quad (26)$$

A frequência de amostragem, fica assim definida:

$$w_s = 2 \times \pi \times f_s = 6280 \text{ rad/s} \quad (27)$$

E a frequência de *Nyquist* por:

$$w_n = \frac{w_s}{2} = 3140 \text{ rad/s} \quad (28)$$

### Resultados de simulação em controlo do deslocamento angular:

De seguida são apresentados os resultados referentes à simulação de um teste em controlo do deslocamento angular, cuja referência de posição é dada ao servomotor segundo uma rampa.

Assim sendo, para uma velocidade de teste de 0,3 rad/min (no adesivo), tem-se um erro de posição do servomotor constante (Figura 72).

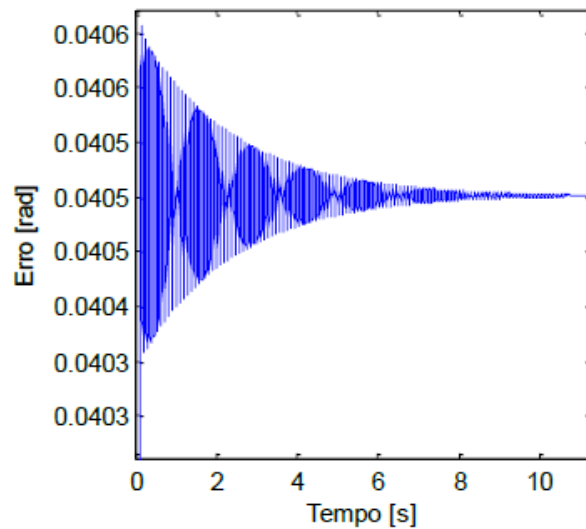


Figura 72 – Gráfico ampliado do erro de posição do servomotor

Colocando o tempo integral,  $T_i = 0,5$  e tempo derivativo,  $T_d = 0,125$ , resolve-se o problema da elongação e obteve-se o resultado mostrado na Figura 73.

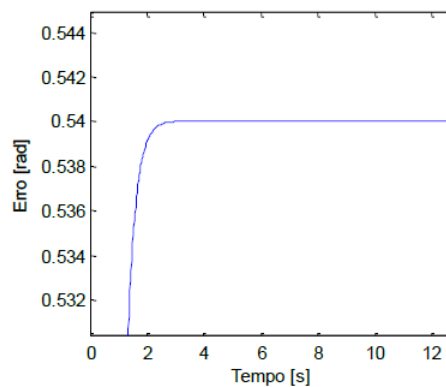


Figura 73 – Gráfico ampliado do erro de posição do servomotor com o ajuste final dos ganhos do controlador

#### 4. Automatização do Sistema

O mesmo controlador é utilizado no teste de relaxação. As figuras seguintes mostram a rotação do servomotor e o erro.

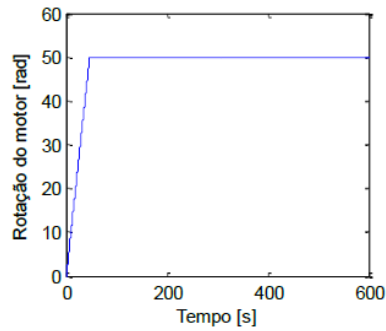


Figura 74 – Gráfico de rotação do servomotor no teste de relaxação

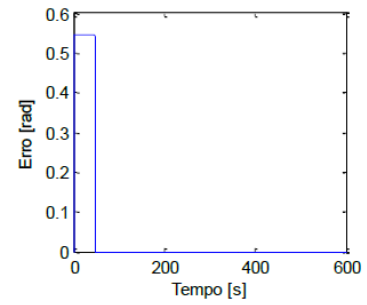


Figura 75 – Gráfico do erro de rotação do servomotor no teste de relaxação

É possível observar que o erro fica nulo quando é atingida a posição pretendida. Desta forma, os ganhos do controlador ficam em:  $K_p = 1,350$ ,  $T_i = 0,5$  e  $T_d = 0,125$ .

#### 4.1.3 - Controlador de binário I-PD

O processo de simplificação do modelo do sistema físico para calcular os ganhos no controlador de binário foi o mesmo do controlo de posição.

A Figura 76 mostra a representação *Simulink* do sistema com controlador.

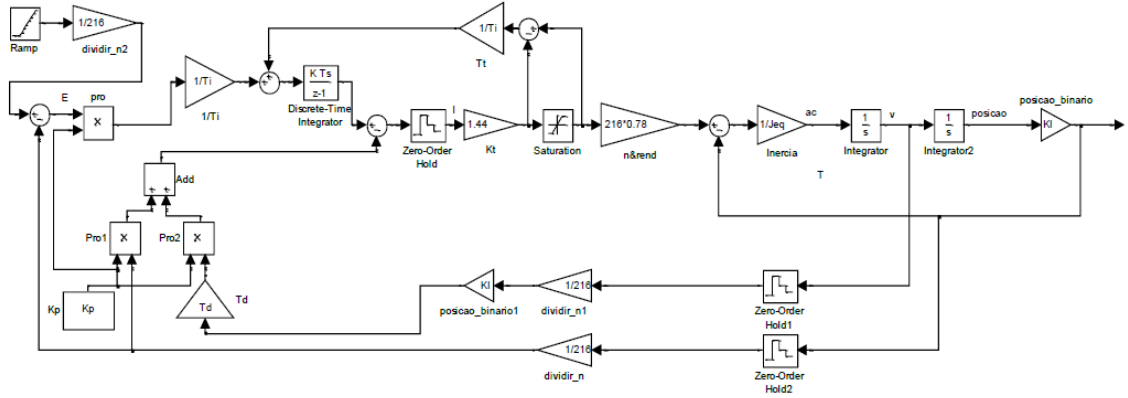


Figura 76 – Diagrama de blocos do controlador de binário I-PD

A função transferência de malha fechada do sistema fica definida pela equação (29):

$$FT = \frac{T}{R} = \frac{K_i \cdot K_t \cdot \eta \cdot K_{ad}}{J_{eq}} \cdot \frac{1}{s^3 + \frac{K_d \cdot K_t \cdot \eta \cdot K_{ad}}{J_{eq}} \cdot s^2 + \frac{K_t \cdot \eta \cdot K_{ad} \cdot K_p}{J_{eq}} \cdot s + \frac{K_i \cdot K_t \cdot \eta \cdot K_{ad}}{J_{eq}}} \quad (29)$$

onde  $K_i$  é o ganho integral,  $K_p$ , o ganho proporcional,  $K_d$ , ganho derivativo,  $K_t$ , constante de binário do servomotor,  $K_{ad}$ , constante de rigidez do provete e  $J_{eq}$  a inercia de todo o sistema.

Os ganhos foram calculados colocando os três polos à frequência de 80 rad/s:

$$(s + w_n)^3 = s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = s^3 + 3s^2 w_n + 3s w_n^2 + w_n^3 \quad (30)$$

Conjugando as equações 29 e 30, obtém-se:

$$\begin{cases} K_d = \frac{3w_n \cdot J_{eq}}{K_t \cdot \eta \cdot K_{ad}} \\ K_p = \frac{3w_n^2 \cdot J_{eq}}{K_t \cdot \eta \cdot K_{ad}} \\ K_i = \frac{w_n^3 \cdot J_{eq}}{K_t \cdot \eta \cdot K_{ad}} \end{cases} \quad (31)$$

Sabendo que:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{ad} = \frac{\pi \cdot D^4 \cdot G}{32l} = 2,485 \\ D_{ad} = 0,015 \\ l_{ad} = 0,002 \\ \eta = 0,78 \\ n = 216 \\ G_{ad} = 1 \times 10^6 \\ K_t = 1,44 \\ w_n = 80 \\ J_{eq} = 3,7 \end{array} \right. \quad (32)$$

Os ganhos do controlador são:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_d = 247,6717 \\ K_p = 2,5402 \times 10^4 \\ K_i = 6,7739 \times 10^5 \end{array} \right. \quad (33)$$

Ou ainda:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_d = \frac{K_d}{K_p} = 0,0098 \\ K_p = 2,5402 \times 10^4 \\ T_i = \frac{K_d}{K_i} = 0,0375 \end{array} \right. \quad (34)$$

**Resultados de simulação em controlo de binário:**

De seguida são apresentados os resultados referentes à simulação de um teste em controlo de binário, cuja referência de posição é dada ao servomotor segundo uma rampa.

Assim sendo, para uma taxa de binário de 1 Nm/min, têm-se um erro de binário muito oscilatório (Figura 77).

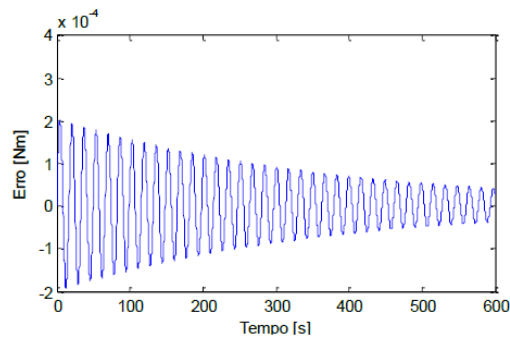


Figura 77 – Gráfico do erro de binário com os ganhos do controlador inicial

Colocando o  $T_i = 3,75$  e  $T_d = 4,514 \times 10^{-5}$  e  $K_p = 2,5401 \times 10^4$ , resolve-se o problema da elongação e obteve-se o resultado mostrado na Figura 78.

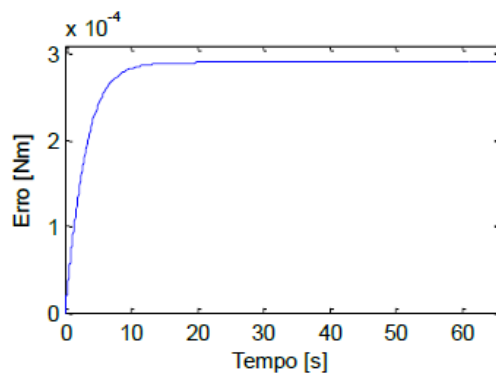


Figura 78 – Gráfico ampliado do erro de binário com o último ajuste dos ganhos do controlador.

No caso do teste de fluência, o sistema fica com uma oscilação grande, quando é alcançada a saturação.

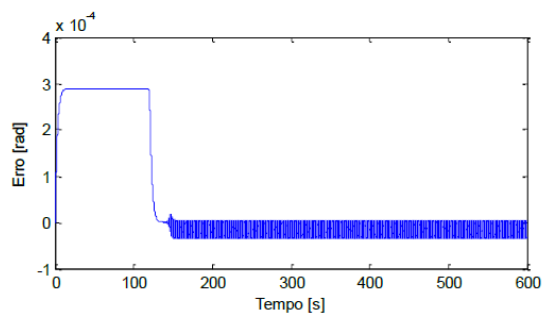


Figura 79 – Gráfico total do erro de binário no teste de fluência com oscilação

#### 4. Automatização do Sistema

Este problema é ultrapassado, aumentando o ganho proporcional  $K_p = 254,01$ . O resultado é apresentado na Figura 80.

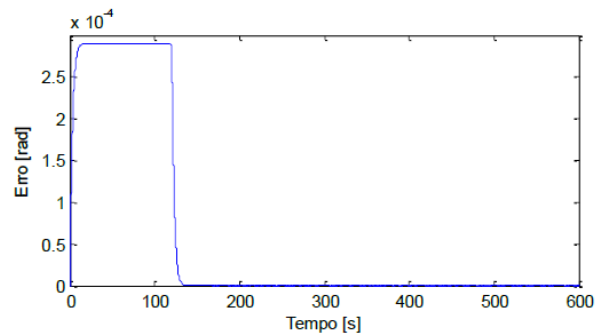


Figura 80 – Gráfico total do erro de binário no teste de fluência com ganhos finais

Os ganhos finais para o controle de binário ficam:  $K_p = 254,01$ ,  $T_i = 3,75$  e  $T_d = 4,514 \times 10^{-5}$

## 4.2 - Componentes principais da máquina

Nesta secção será feita a descrição de todos os componentes que fazem parte da automatização do sistema. O princípio de interação entre os componentes está apresentado na Figura 81.

O quadro elétrico é o elemento principal, pois interage em tempo real com os outros componentes (computador, transdutor de binário, servomotor, painel de botões). O computador controla a máquina através de uma placa de aquisição de dados. Esta placa recebe um sinal analógico proveniente do transdutor de binário e envia referências para o servomotor.

O quadro elétrico recebe informação do painel de botões, enviando “ordens” ao computador. Existem ainda no painel de botões alguns sinalizadores, que indicam ao utilizador o estado da máquina.

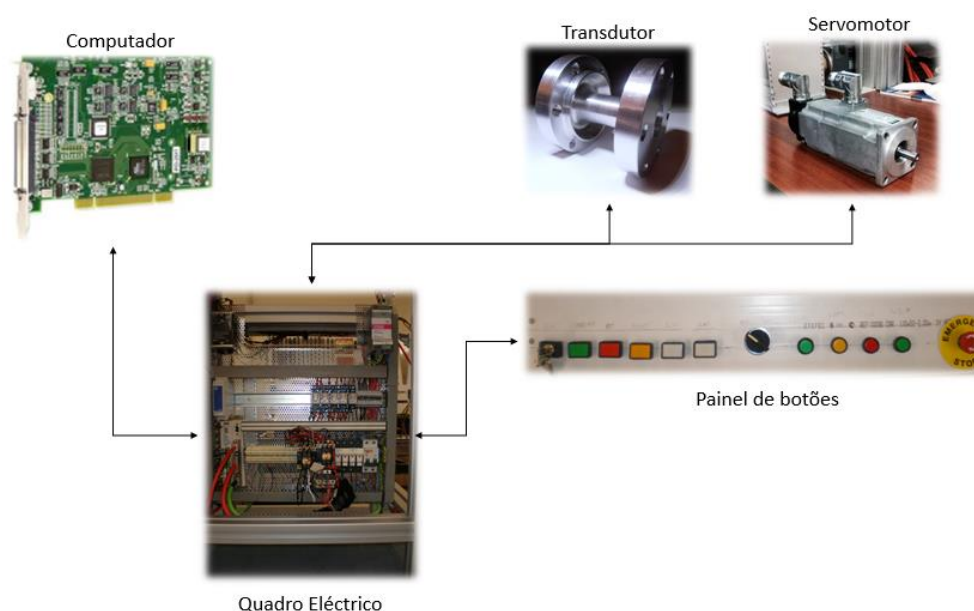


Figura 81 – Representação do funcionamento da máquina

##### 4.2.1 – Placa de aquisição de dados e actuação mecânica

Para fazer o controlo da máquina é utilizado um computador equipado com uma placa de aquisição de dados PCI-DAS1602-12, (Figura 82). Esta placa recebe um sinal analógico proveniente do transdutor de binário e envia referências para o servomotor. Faz também a comunicação, com os relés e contactores através de sinais digitais.



Figura 82 – Placa de aquisição de dados PCI-DAS1602-12 [27]

Esta placa tem as seguintes características [27]:

- Resolução de 12-bit
- Frequência de amostragem máxima 200 kHz
- 2 Saídas analógicas de 12 bit (bipolares ou unipolares)
- 24-bit de I/O digital

A ligação é feita a duas placas de terminais de parafusos (Figura 83) através de um cabo *C100FF-x*. Assim, ligam-se todas as saídas e entradas, analógicas e digitais, que servirão para o controlo e comando do sistema.



Figura 83 – Fotografia das duas placas de terminais

Como foi referido anteriormente, o *Matlab*® possui ferramentas que comunicam em tempo real com a carta.

A atuação mecânica é feita através de um servomotor *Parvex NX 310EAPR7301* e um redutor planetário *Parvex GE3N216R0401*. As suas características já foram referenciadas na secção 3.1.9.

Para fazer a ligação entre o *software Matlab* e o servomotor é necessário um drive. O *drive* escolhido foi:

Parvex Digivex DLD13M02R [28]:

- 2 Saídas analógicas ( $\pm 10V$ ), disposição livre;
- 2 Entradas analógicas (14 bits e 10 bits;  $\pm 10V$  diferencial);
- Entrada de *resolver*;
- Saída da emulação de *encoder* incremental.

#### 4.2.2 - Placa de leitura de *encoders*

Além da placa de aquisição de dados, está instalada no computador uma placa de leitura de *encoders* PCI-QUAD04 (Figura 84).



Figura 84 - Placa de *encoders* PCI-QUAD04 [29]

Esta placa lê a posição do *encoder* do servomotor e ao mesmo tempo envia os dados para o computador. Os *encoders* são transdutores de posição de alta resolução.

Esta placa tem as seguintes características [29]:

- Contador de 24 bits
- 4 Entradas *encoders*

#### 4. Automação do Sistema

Dado que o *encoder* é incremental, sempre que se reinicia o sistema é necessário colocar a zero o contador de impulsos.

Como a placa tem um contador de 24 bits pode contar até:

$$2^{24} = 16777216 \quad (35)$$

A cada volta no motor, o *encoder* conta 16384 impulsos e está em quadratura. Para cada volta à saída do redutor o *encoder* conta:

$$16384 \times 4 \times 216 = 14155776 \quad (36)$$

Para a realização dos testes, o veio de saída do redutor nunca chega a dar uma volta completa, porque o provete acaba por partir antes. Assim nunca chega ocorrer *overflow*.

Assim, não é necessário ter em conta o zero do *encoder* (canal Z), bastando ler os sinais *A* e *B*.

Lendo os sinais vindos do *encoder* em quadratura tem-se uma resolução na leitura da posição do servomotor à saída do redutor, dada pela equação (37)

$$Resolução\ redutor = \frac{360}{16384 \times 4 \times 216} = 0.000025^\circ \quad (37)$$

A Figura 85 ilustra uma fotografia de uma placa de 50 pinos onde é feita a ligação dos sinais *A*, *B*,  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$ . A ligação à placa de leitura de *encoders* é através de um cabo C37FF-x.

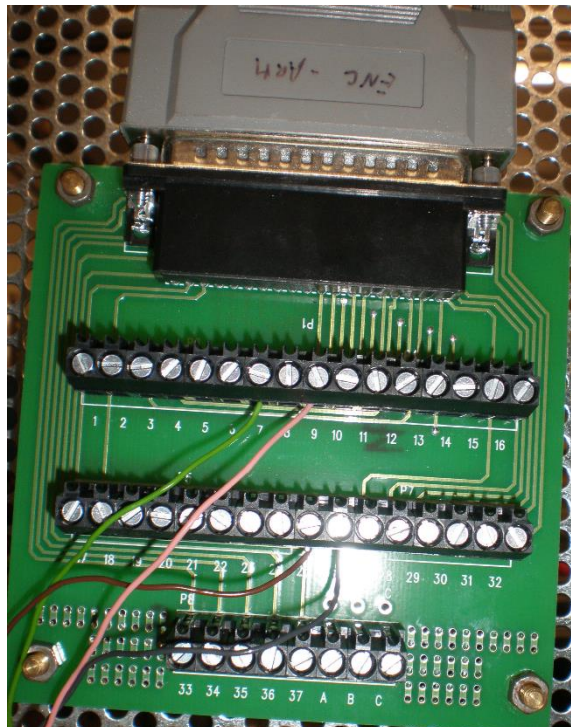


Figura 85 – Fotografia da placa de 50 pinos

#### 4.2.3 – Transdutor de binário

Este é dos componentes mais importantes em toda a máquina. Os valores de binário são utilizados para feedback do controlador e como resultados no ensaio.

No mercado existem várias soluções para este tipo de aplicação, no entanto a escolha recaiu para um transdutor da *Lorenz* DF-30 100 Nm.

As suas características são [7]:

- Precisão: 0.2%
- Sensibilidade: 1.0 mV/V
- Binário máximo: 100 Nm
- Tensão de alimentação: 2 V.... 12 V
- Temperatura de serviço: -15°C a +55°C

O transdutor de binário é ligado a um módulo de condicionamento de sinal e amplificação, com saída de  $\pm 10$  V para a gama de medição.

Como é utilizada uma placa A/D de 12 bit, na gama de entrada de  $\pm 10$  V, a resolução na medição de binário será de:

$$Resolução = \frac{200}{2^{12}} = 0,048 \text{ Nm}$$

Na Figura 86, apresenta-se o transdutor.



Figura 86 - Transdutor de binário estático da *Lorenz* [7]

#### 4.2.4 - Quadro elétrico

Nesta secção são apresentados todos os componentes do quadro elétrico da máquina.

Para o *drive* são necessários alguns componentes específicos que são indicados pelo fabricante. Os outros componentes foram introduzidos porque se achou conveniente, por questões de segurança e correto funcionamento da máquina. Assim, os componentes utilizados foram:

- Relé: é um dispositivo eletromecânico. Quando uma corrente originada no primeiro circuito passa pela bobina, um campo eletromagnético é gerado, acionando o relé e possibilitando o funcionamento do segundo circuito. Todas as saídas digitais do computador estão diretamente ligadas a relés. Existem seis relés no quadro elétrico da máquina (ver Figura 87).

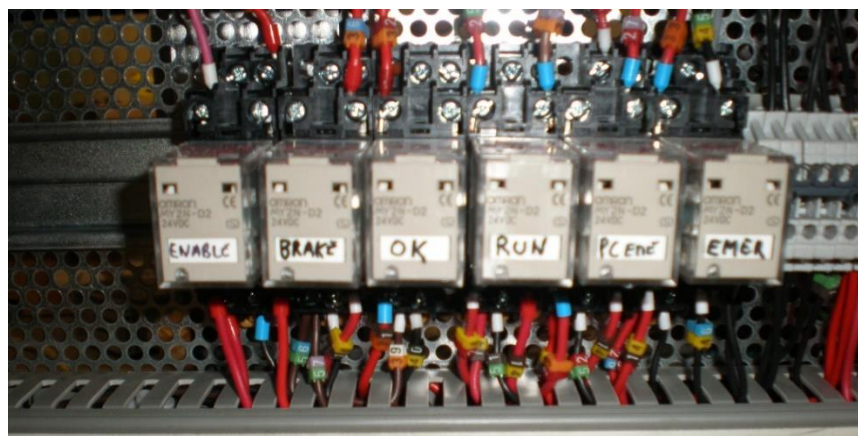


Figura 87 – Fotografia dos relés utilizados

- Contactor: O princípio de funcionamento é igual a um relé, mas pode operar com maiores correntes. Existem dois contactores no quadro elétrico da máquina, um que alimenta o *drive* e outro o servomotor. Os dois contactores são apresentados na Figura 88.

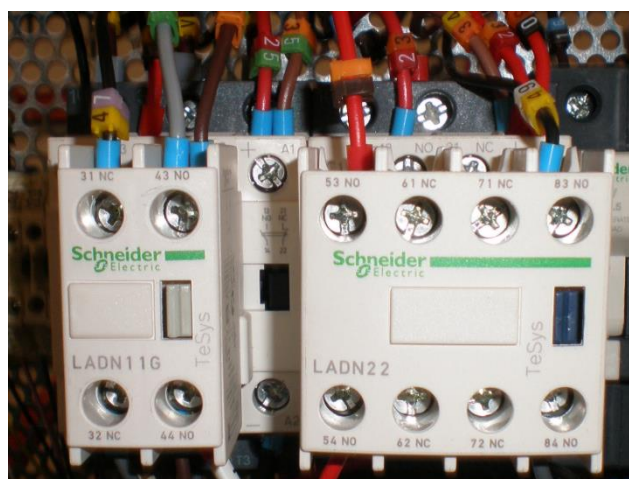


Figura 88 – Fotografia dos contactores utilizados

- Relé térmico: É um equipamento que protege da sobrecarga elétrica. O principal objetivo é evitar o aquecimento dos enrolamentos do motor, assim quando há uma corrente elétrica acima da permitida nos enrolamentos, este “dispara”. Existe um relé térmico no quadro elétrico, acoplado ao contactor que alimenta o *drive*. O relé térmico é apresentado na Figura 89.

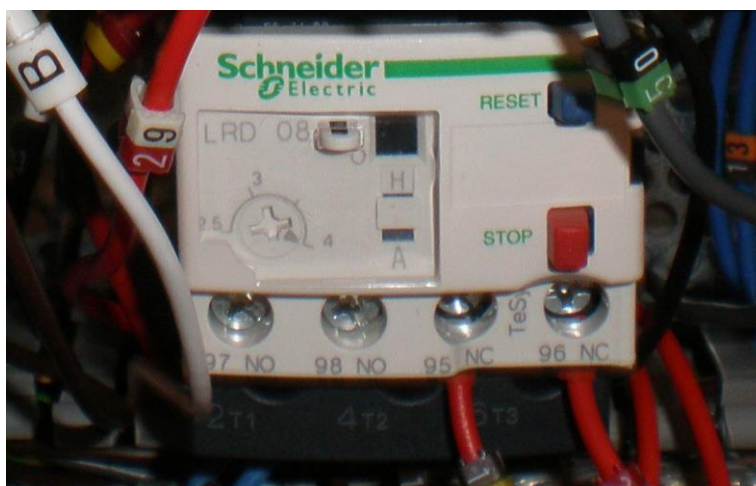


Figura 89 – Fotografia do relé térmico

- Disjuntor: É um equipamento eletromecânico. Destina-se a proteger a instalação elétrica de curtos circuitos e sobrecargas elétricas. Este equipamento possui proteção contra correntes de fuga de 300 mA. No quadro elétrico existe um disjuntor, como se observa na Figura 90.

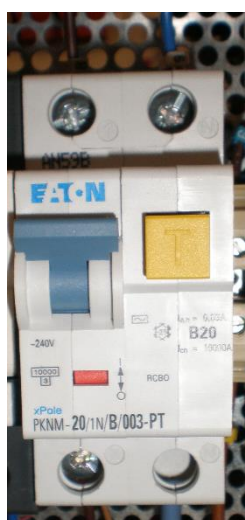


Figura 90 – Fotografia do disjuntor

#### 4. Automatização do Sistema

- Filtro: É um componente que executa funções de processamento de sinal, para especificamente atenuar problemas indesejados causados pela frequência do sinal de entrada. Existe um filtro no quadro elétrico, como se observa na Figura 91.



Figura 91 – Fotografia do filtro

- Fonte de tensão 24VDC: Como alguns componentes funcionam a 24VDC é necessário um componente destes para transformar a tensão elétrica da rede. A Figura 92 expõe a fonte de tensão utilizada.



Figura 92 – Fotografia da fonte de tensão

- Fusível: A função é a proteção contra subcorrentes. Fica inutilizável depois da primeira intervenção. Existem dois fusíveis de 4A no quadro elétrico.

- Placa de circuito impresso: Esta placa é responsável pelo condicionamento de sinal de forma a ser possível fazer a interface entre os sinais do computador e os componentes do quadro elétrico. Isto porque o computador recebe e gera sinais de 5V, enquanto os outros componentes funcionam a 24V. A Figura 93 apresenta a fotografia da placa de circuito impresso.

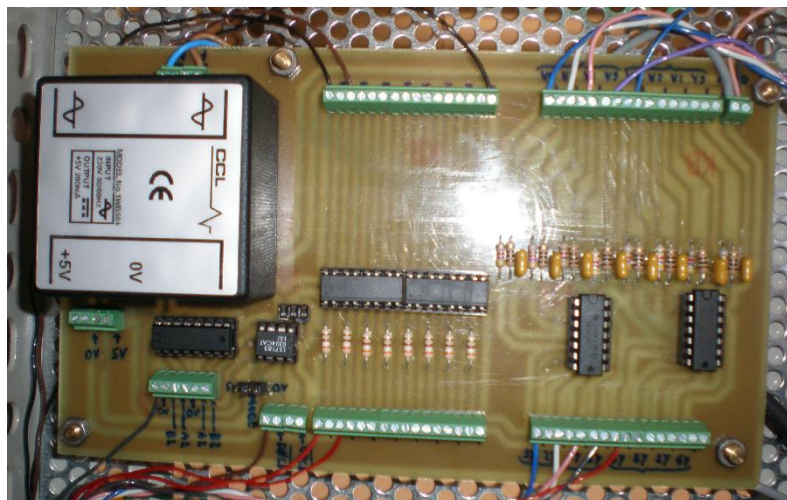


Figura 93 – Fotografia da placa de circuito impresso

- Botões: A máquina tem um botão de emergência, botão com chave para destravar o motor manualmente, botão ON e botão OFF e 2 botões para controlar o servomotor.
- Sinalizadores: A máquina dispõe de sinalizadores para os contactores, para o relé do travão, sinal de emergência e teste está a decorrer.

#### 4. Automação do Sistema

Para a montagem do quadro elétrico, primeiro realizou-se uma representação esquemática para uma melhor percepção do espaço de todos os componentes. Essa representação está indicada na Figura 94.

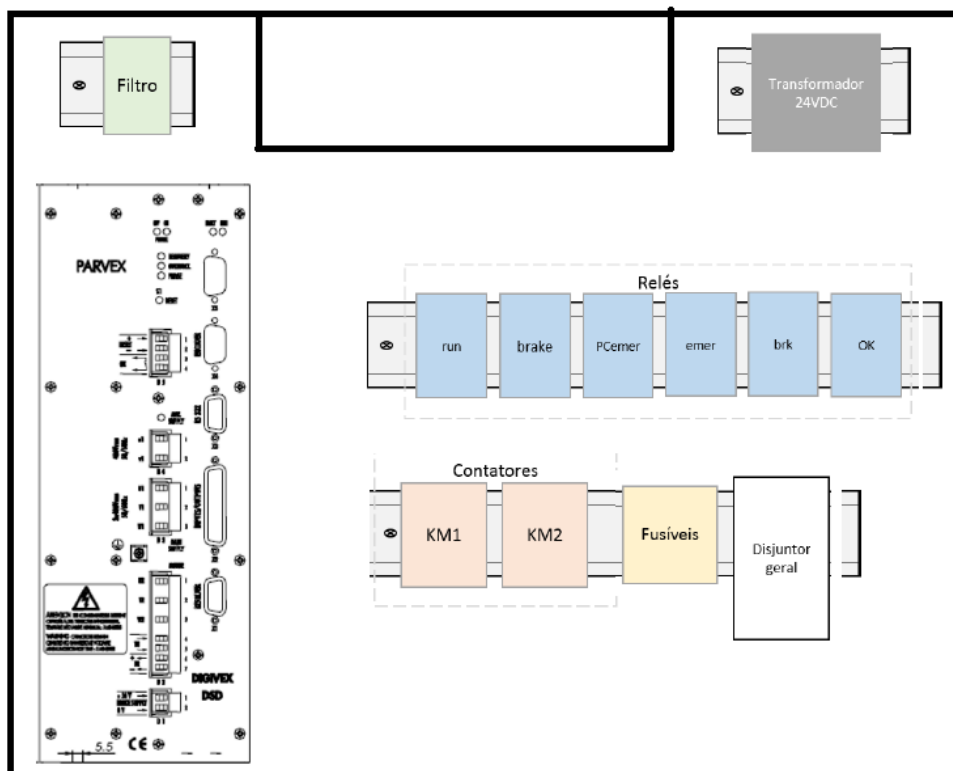


Figura 94 – Representação do quadro elétrico

A Figura 95 e 96 mostram o quadro elétrico final.

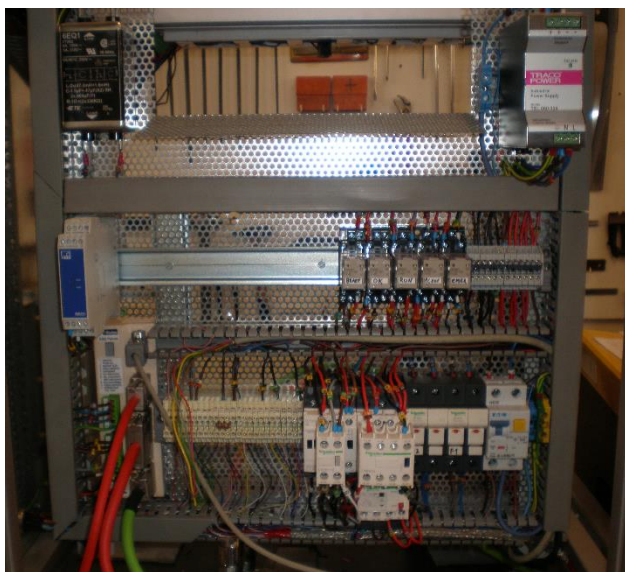


Figura 95 – Fotografia frontal do quadro elétrico

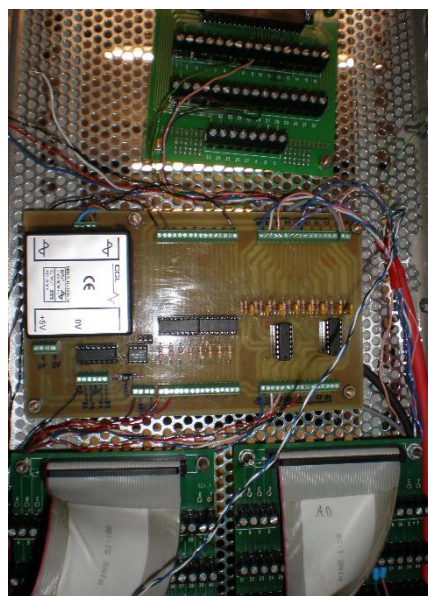


Figura 96 – Fotografia lateral do quadro elétrico

Existe um painel de comando e monitorização instalado na máquina. Este painel tem os sinalizadores e botões descritos anteriormente. A Figura 97 apresenta a fotografia do painel.



Figura 97 – Fotografia do painel de comando e monitorização

#### 4.3 - Software de comando

Nesta secção é feita uma descrição do *hardware* e *software*, onde é explicado com clareza a forma de como foram feitas as ligações elétricas de comando da máquina de ensaios à torção e uma descrição comportamental do sistema, descrevendo todas as etapas lógicas desde quando se inicia um teste, passando por várias transições bem definidas.

##### 4.3.1 - Funcionamento da máquina

Inicialmente, estando a máquina de ensaios desligada é necessário ligar o interruptor geral de forma a fornecer alimentação ao *drive*.

Depois de pressionar o botão monóstável “MA” o contactor “KM1” é atuado, ver Figura 98. Sempre que o contactor “KM1” estiver alimentado, um sinalizador no painel avisa o utilizador.

#### 4. Automatização do Sistema

De referir também que o contactor “KM1” depende do botão monóstável “AT”, isto é, uma vez premido este botão, o circuito é aberto e o contactor deixa de ser alimentado.

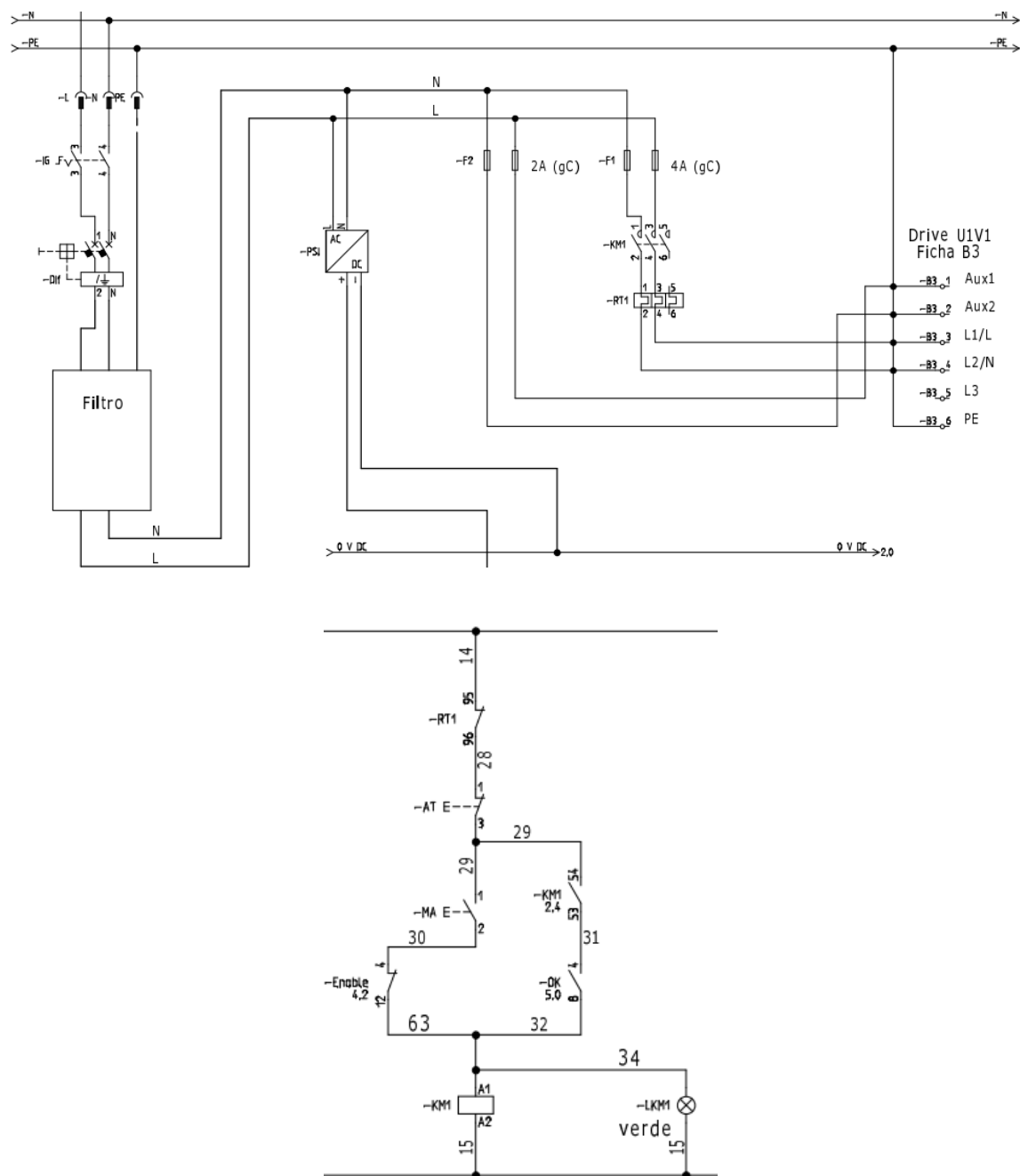


Figura 98 – Lógica elétrica da alimentação do *drive*.

Se o *drive* não estiver operacional, não alimentará a bobine do relé “OK”, assim sendo não alimentará também o contactor “KM1”, ver Figura 99.

O contacto “Enable” é um sinal (ativo a zero) proveniente do *software* para fazer o *enable* do drive do motor. Só é possível ligar a máquina se o *drive* não tiver o *enable* ativo.

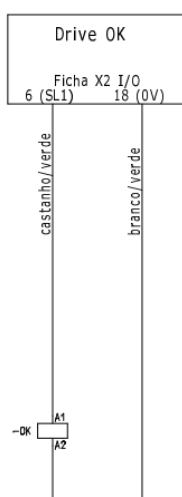


Figura 99 – Lógica elétrica do estado da *drive*

O contactor “KM2” estabelece a alimentação entre o *drive* e o servomotor. Este está sempre alimentado quando um teste está a correr normalmente. Quando existem algumas ocorrências, como algum problema no *drive*, ou os botões de emergência são ativados (pelo painel ou pelo *software*) este contactor deixa de ser alimentado, como se pode observar no esquema da Figura 100.

Existem sinalizadores (“LKM2” e “Lemer”) que servem para o utilizador observar se o servomotor está ligado ou se está no estado de emergência.

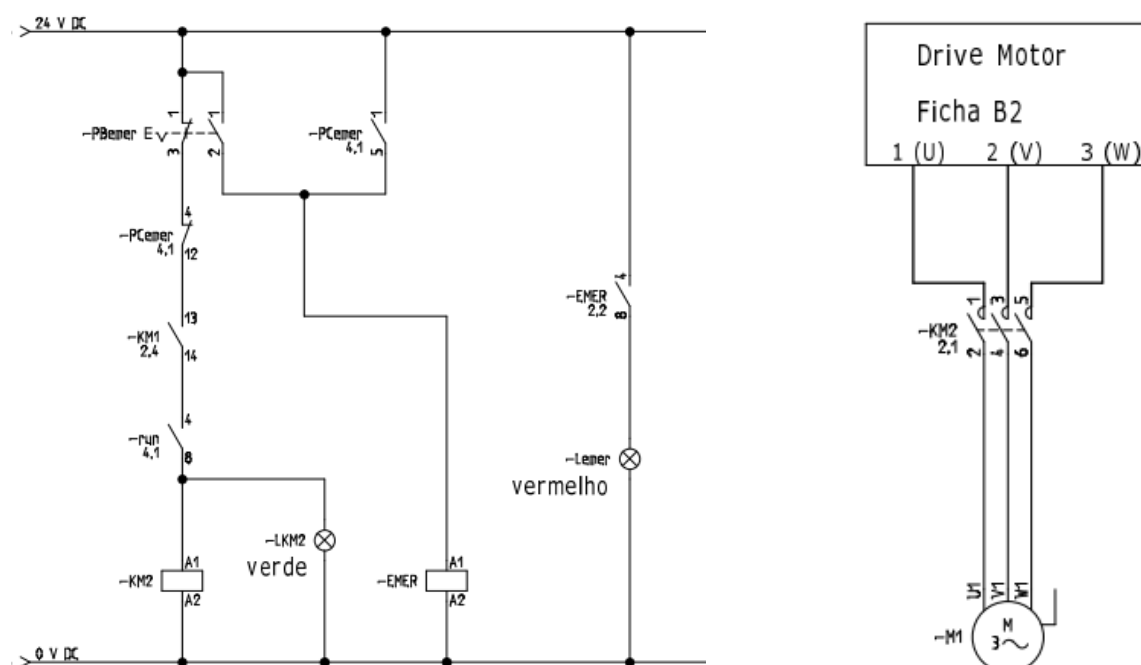


Figura 100 – Lógica elétrica para a alimentação do servomotor

#### 4. Automatização do Sistema

O sinal “PCemer” é o sinal de emergência vindo do computador, enquanto o “PBemer” é o botão de emergência situado no painel. O contacto “run” é um sinal digital proveniente do software.

O travão é desativado sempre que o motor recebe alimentação através do contactor KM2. Pode ser controlado manualmente através de um botão com chave. O estado do travão pode ser observado no painel de sinalizadores (Figura 101).

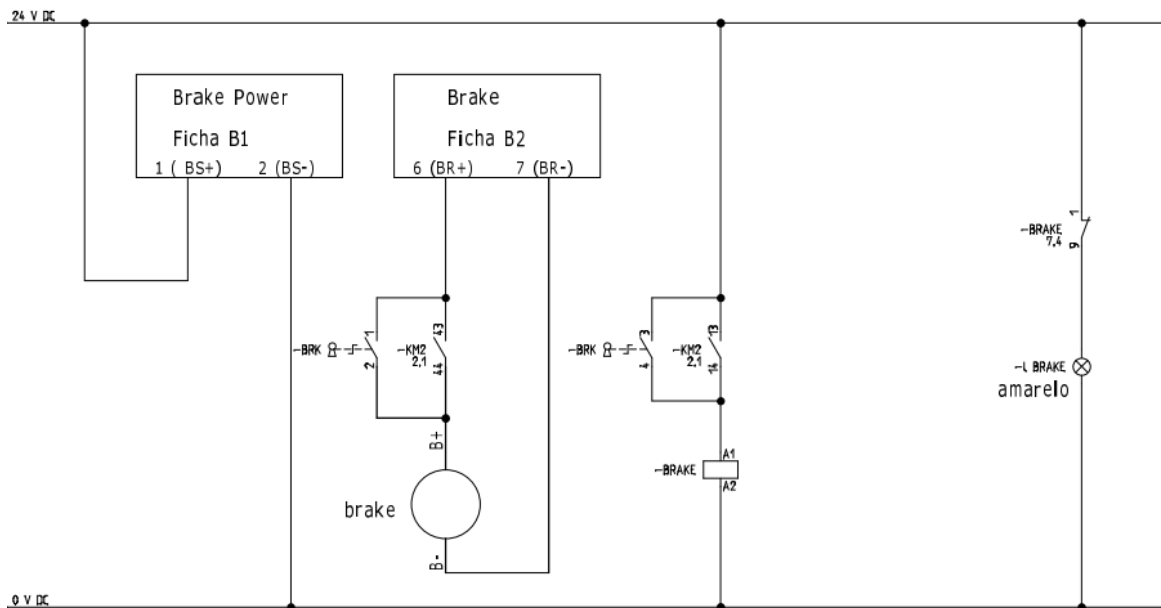


Figura 101 – Lógica para controlo do travão do servomotor

Na Figura 102, mostra-se a ligação dos relés à placa eletrónica de condicionamento de sinal. Estas ligações são as saídas digitais.

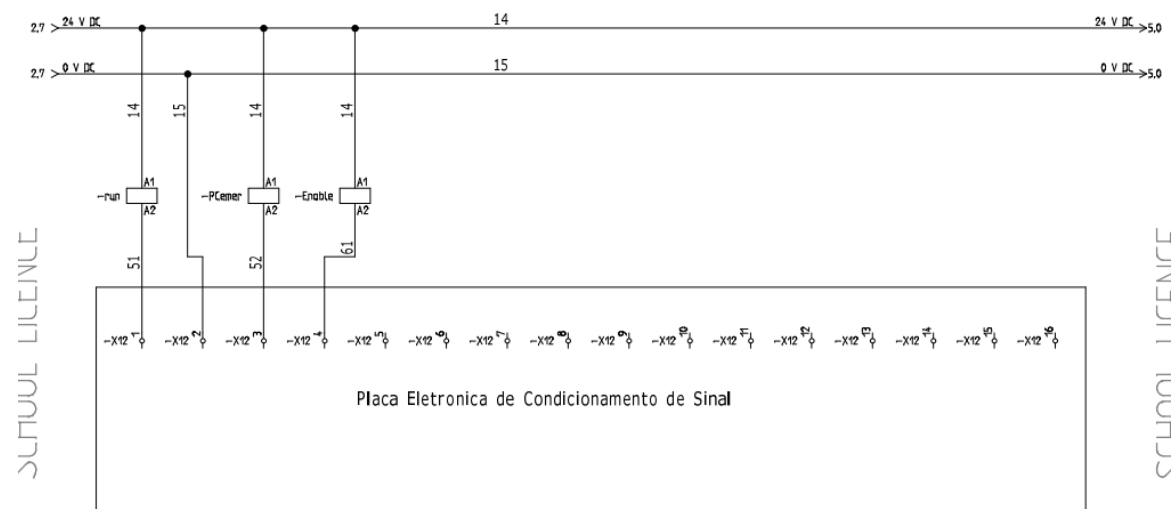


Figura 102 – Saídas digitais

As entradas digitais estão representadas na Figura 103. Desta forma, o *software* consegue cumprir as várias etapas, porque consegue receber e enviar os sinais, em tempo real.

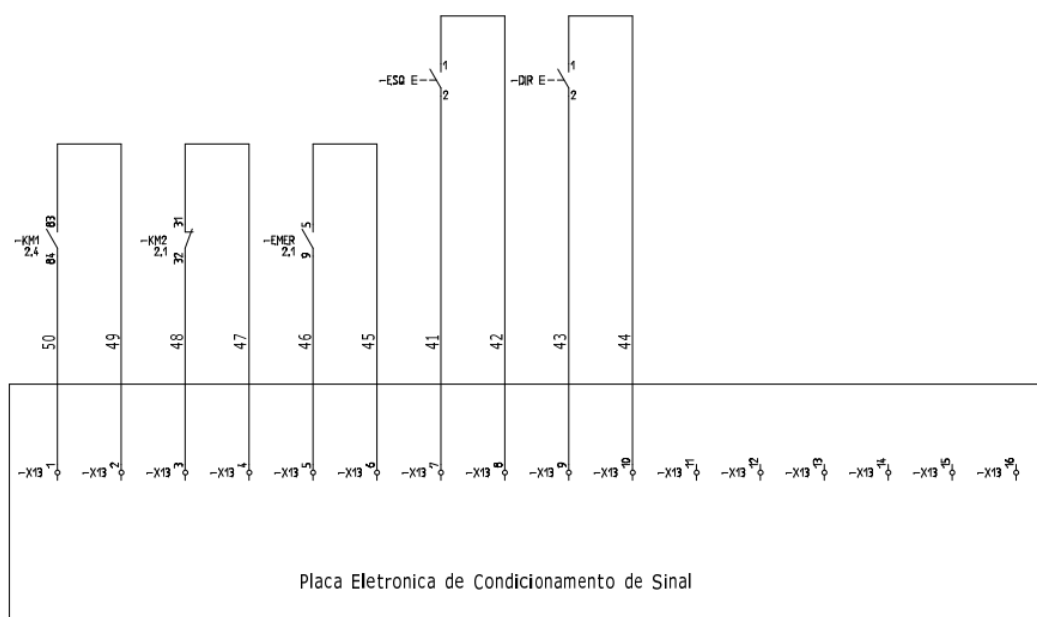


Figura 103 – Entradas digitais

Todos os esquemas elétricos utilizados para a montagem do quadro elétrico estão apresentados no Anexo M.

#### 4.3.2 - Diagrama de estados

Como referenciado anteriormente, o comando é feito através de um computador que estará ao lado da máquina. Este comunica com o quadro elétrico, com o transdutor de binário e com o *drive* do servomotor. A comunicação é feita através de uma placa de aquisição de dados e uma placa de *encoders* que está instalada no computador.

O comando tem de obedecer a toda a lógica possível no decorrer de um teste, tanto a nível de segurança como de parâmetros que serão definidos de seguida nesta secção.

O computador está a receber e a enviar sinais, em tempo real, desta forma há transições que são ativadas por *hardware* e outras por *software* através de entradas e saídas analógicas e digitais. De seguida é apresentado um resumo das entradas e saídas do controlo da máquina.

- Entrada digital: Botão de emergência (Emer), Estado do *drive* (KM1), Estado do motor (KM2);
- Saída Digital: Run (Run); Emergência (PCemer); Travão (Brake); Enable
- Entrada Analógica: Transdutor de binário;
- Saída Analógica: Referências para o *drive* (de posição ou binário);

De seguida são apresentados dois diagramas de estado que se aplicam aos testes realizados pela máquina. Estes diagramas são apresentados separadamente para se ter uma melhor perceção de todo o funcionamento.

Na Figura 104 é apresentado o diagrama até o utilizador chegar à interface da realização do teste.

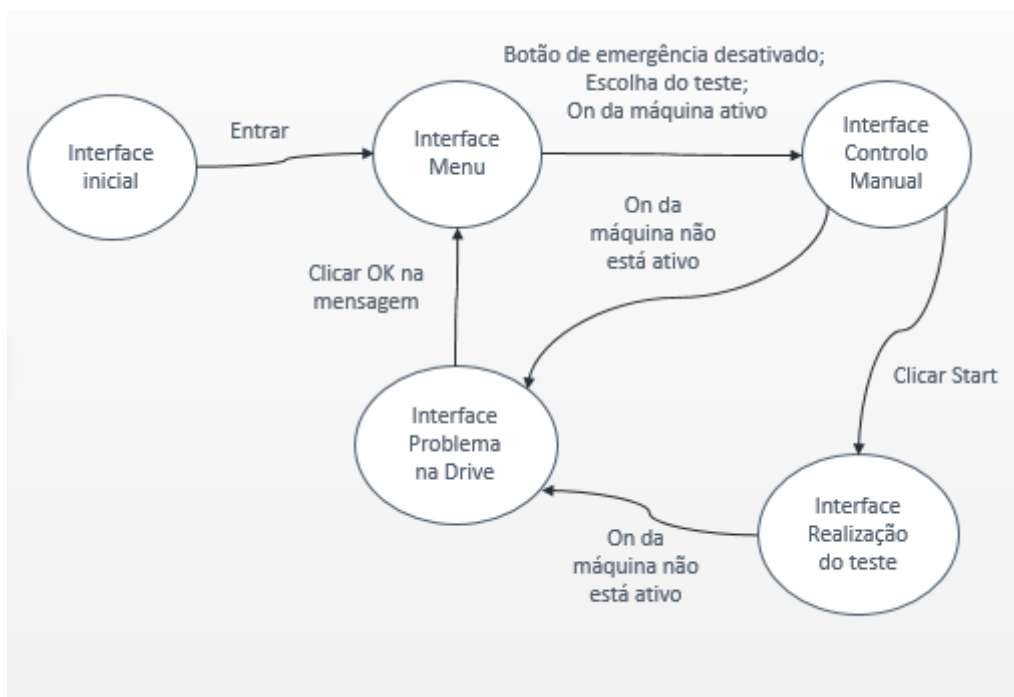


Figura 104 – Diagrama de estados até ao controlo manual

Inicialmente o utilizador começa pelo estado inicial (Interface Inicial). Quando o utilizador clica no botão da interface “Entrar”, passa para o estado “Interface Menu”. Esta interface permite a escolha do tipo de teste que o utilizador quer executar.

O utilizador para poder passar para o estado da “Interface Controlo Manual”, tem que ter o botão *On* da máquina ativo, o botão de emergência desativado e escolher o teste que quer executar.

Estando no estado “Interface Controlo Manual”, o utilizador só consegue clicar no botão “*Start*” da interface, depois de ter a embraiagem de garras engrenada e o provete colocado nas buchas.

Sempre que o botão *On* da máquina for desativado, surge uma janela “Interface Problema no Drive”, onde o utilizador tem um botão “*Ok*”, para voltar ao estado “Interface Menu”

Na Figura 105 apresenta-se o diagrama de estados para um teste a decorrer.

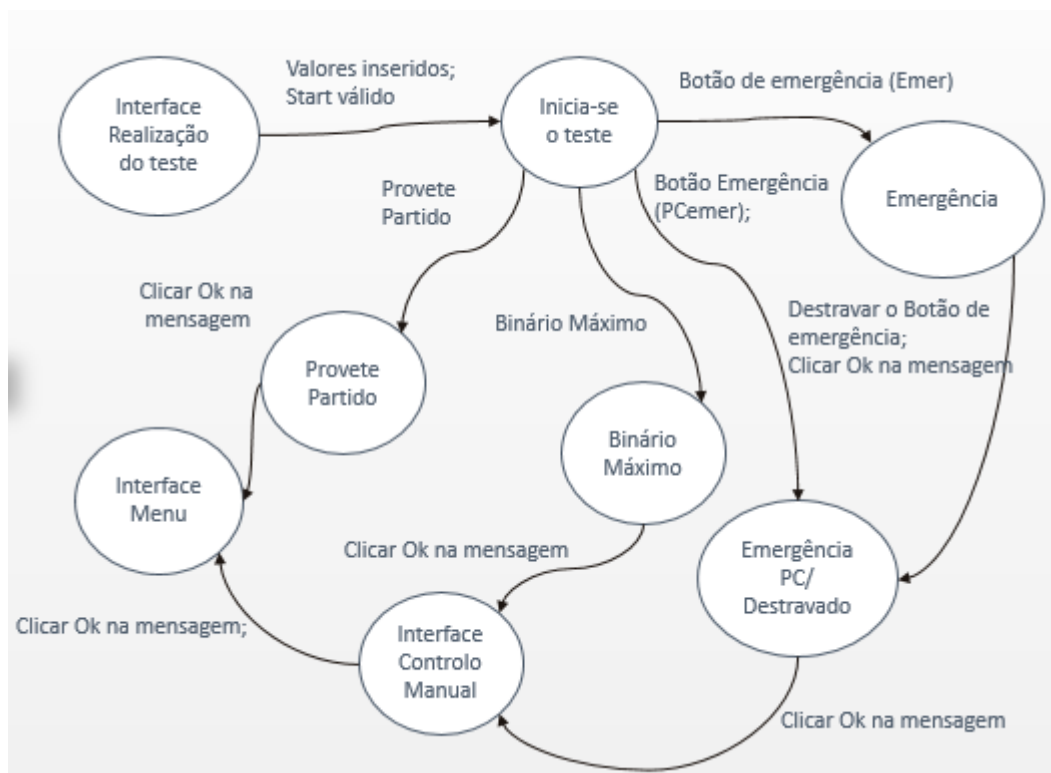


Figura 105 – Diagrama de estados no decorrer de um teste

Estando no estado “Interface Realização do teste”, o utilizador tem de inserir os valores pedidos na interface e de seguida clicar no botão “Start”, para poder passar ao estado “Inicia-se o teste”.

Este é o estado onde podem ocorrer vários acontecimentos:

- Botão de emergência atuado (Emer): Acontece o estado “Emergência”, aparece uma interface a avisar que foi ativado o botão de emergência e as referências no *Simulink* ficam constantes, ficando o motor parado.
- Botão de emergência atuado (PCemer): Vai para o estado “Emergência PC/Destravado”. Este estado avisa que o botão de emergência do *software* foi atuado. As referências para o motor ficam constantes, ficando o motor parado.
- Binário Máximo atingido: Aparece uma interface de binário máximo atingido, ficando as referências para o motor constantes.

Quando o utilizador clica no “Ok”, destas interfaces de aviso, passa para a “Interface Controlo Manual”. Nesta interface o utilizador diminui a posição do motor até à posição inicial. É usado o mesmo controlador do que o controlador do teste de descolamento angular. Quando o utilizador chega a posição inicial, clica no botão “Ok” e volta ao estado “Interface Menu”.

- **Provete Partido:** Quando o provete parte, passa para o estado “Provete Partido”, aparece uma mensagem de alerta do sucedido. O motor fica em controlo em anel aberto, acabando por parar, devido aos atritos.

O utilizador clicando “Ok” na interface de “Provete Partido”, volta ao estado “Interface Menu”.

#### 4.3.3 – Aspetos importantes da programação

Um aspeto importante a salientar na programação da interface gráfica e da sua interação com o *Simulink* é a colocação de *event listeners*.

Estes *event listeners* têm a capacidade de ler uma variável, em tempo real no *Simulink* e agir em semelhança com ela. Estes *event listeners* lêem a variável através de um bloco do tipo *Scope* ou *Display*.

De seguida é dado um exemplo de um *event listener*, de quando é ativado o botão de emergência:

```
function localEventListener_Botao_emergencial(block, eventdata)
    data = block.InputPort(1).Data;
    if data==1
        set_param('posicao/emergencia/Gain','Gain','1');
        set_param('posicao/emergencia/parar','Gain','0');
        run Botaoemergencia
    end
```

Quando o bloco do tipo *Display* têm o valor lógico 1, o *event listener* é ativado. Corre uma interface com o nome *Botaoemergencia* e as referências ficam constantes através dos parâmetros indicados no bloco emergência.

## 5. Interface gráfica e programa experimental

Este capítulo faz uma descrição da interface gráfica que permite ao utilizador realizar os testes. Esta interface, como mencionado anteriormente, foi desenvolvida na ferramenta *GUIDE* do *Matlab*, interagindo em tempo real com o *Simulink* que estará a fazer o controlo da máquina. Este capítulo também mostrará os passos mais importantes na construção do *software*.

Na secção 5.2 e 5.3 será apresentado um provete seleccionado e como é realizado o fabrico do mesmo.

Finalmente propõe-se um programa de testes a ser executado para avaliar, as potencialidades da máquina.

### 5.1 – Realização dos ensaios

Esta secção faz uma descrição de como se executam os quatro testes. São descritas todas as etapas, desde o início de um teste e passando pelas várias transições.

Como referido anteriormente, o controlo da máquina foi desenvolvido na ferramenta *Simulink* do *Matlab*® que interage em tempo real com a ferramenta *GUIDE*, que apresenta a interface gráfica, onde o utilizador pode configurar os testes.

O utilizador quando abre o programa para a realização de um teste começa por ver a interface que está apresentada na Figura 106. A interface é a janela inicial, onde se pode entrar ou sair do programa.

Como ilustra a figura, esta janela inicial apresenta os colaboradores do projeto assim como os logotipos da FEUP e do grupo de adesivos.

## 5. Interface gráfica e programa experimental



Figura 106 – Janela principal

Feita a seleção “Entrar” a janela inicial fecha-se dando lugar à janela da escolha dos testes.

Como mostra na Figura 107, o utilizador pode fazer a escolha do teste a realizar, quando o botão “MA” da máquina estiver ativo (KM1) e o botão de emergência desativado (EMER), senão os botões da escolha do teste encontram-se desativados.

Mas antes da escolha do teste o utilizador tem de fazer a conexão, para que o *Simulink* inicie a execução. Deste modo conseguir ler a carta de aquisição de dados e do *encoder*.

A janela possui um botão “Ajuda”, onde abrirá uma janela a explicar o que cada teste faz.

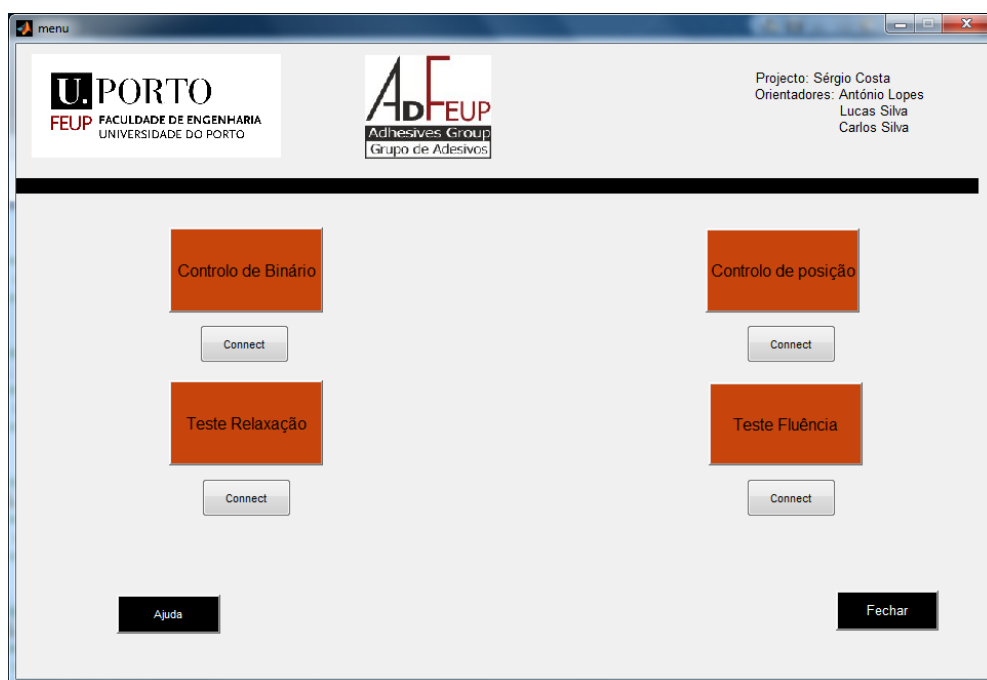


Figura 107 – Janela para escolha dos testes

Feita a seleção do teste a realizar, a página fecha-se dando lugar à janela correspondente do controlo manual.

Como exhibe a Figura 108, a janela mostra o valor de binário que está a ser lido em tempo real, através do transdutor de binário, e quatro botões que servem para aumentar ou diminuir a velocidade, avançando ou recuando a posição do motor mais rapidamente ou mais lentamente. O controlo é realizado por um modelo *Simulink* que controla as referências para o servomotor em tempo real.

Este controlo manual serve para o utilizador conseguir montar o provete na bucha.

O utilizador só consegue clicar *Start*, quando o provete estiver fixo na bucha, a embraiagem de garras estiver engrenada e o binário estiver num intervalo perto do valor zero, o que significa que não existe qualquer binário aplicado no provete, antes de iniciar o teste.

Se o binário não estiver no intervalo definido e o utilizador clicar no botão *Start*, será enviada uma mensagem de erro.

## 5. Interface gráfica e programa experimental



Figura 108 – Janela controlo manual

Feito o ajuste manual, a página fecha-se dando lugar à janela correspondente ao teste desejado. Este processo é igual para os quatro testes.

A Figura 109 refere-se ao teste de controlo de binário (a janela do teste em controlo de deslocamento angular é igual, exceto onde se lê: “Velocidade do Binário [Nm/min]”).

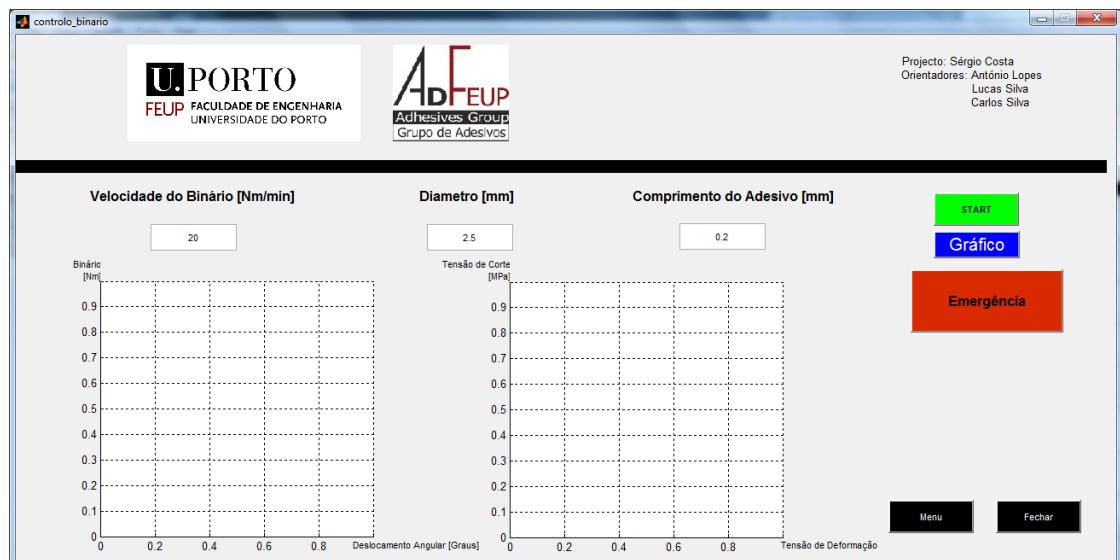


Figura 109 – Controlo de Binário

Para cada teste é utilizado um modelo *Simulink*® diferente que controla as referências para o servomotor e lê e reage em tempo real às diferentes transições.

Para a realização do teste só é possível fazer *Start* no modelo *Simulink* quando são feitos os seguintes passos:

- Introduzir os valores pedidos na janela;
- Clicar no botão “Start”

Se estas etapas não forem realizadas e o utilizador clicar no botão *Start* será enviada uma mensagem de erro e o teste não se inicia.

A interface gráfica correspondente ao teste de controlo de posição encontra-se no Anexo N.

Quando o provete parte, abre uma janela a indicar que o provete partiu e o controlo de posição ou binário passa para controlo em anel aberto. O modelo *Simulink* deixa de ter referências, acabando o servomotor por parar passado um intervalo de tempo, devido aos atritos.

O utilizador só consegue clicar no botão “OK” na janela de alerta, quando passar esse intervalo de tempo.



Figura 110 – Janela de alerta, provete partido

Findo o teste, o utilizador pode clicar no botão “Gráfico”, para poder obter os resultados da realização do teste.

## 5. Interface gráfica e programa experimental

No caso dos testes de relaxação e de fluência, a janela é exatamente igual, exceto na caixa de texto onde se lê “Ângulo”. A janela é apresentada na Figura 111, para o caso do teste em relaxação.

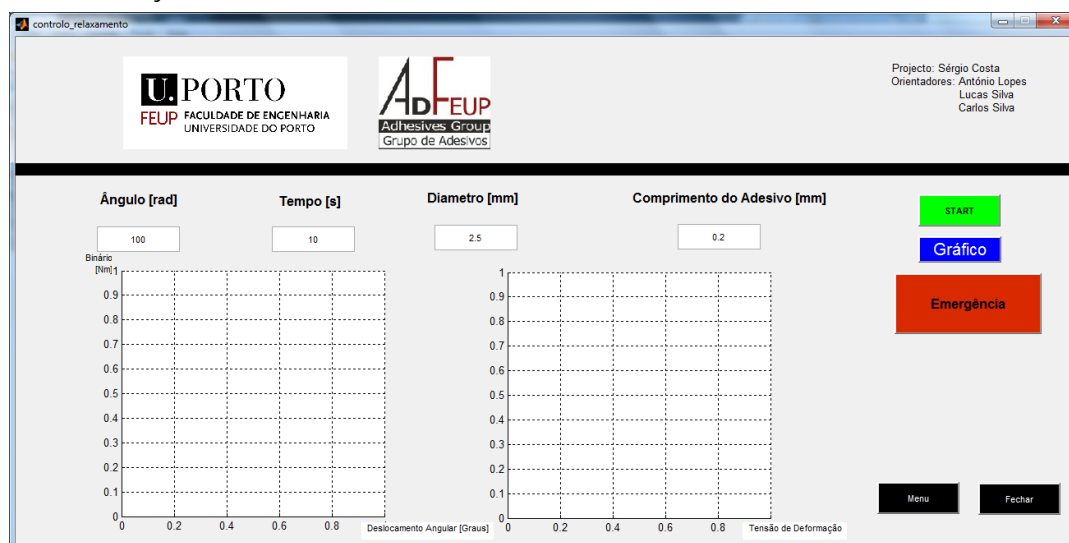


Figura 111 – Janela correspondente ao teste de relaxamento

O princípio de funcionamento na parte da interface é exatamente igual aos testes anteriores, com o acréscimo de ter que definir o tempo de duração do teste.

Estes dois testes cumprem uma rampa até chegar à posição pretendida ou ao binário, onde permanece pelo tempo definido.

A interface gráfica correspondente ao teste de fluência encontra-se no Anexo N.

Quando se está a realizar um teste, podem ocorrer outras transições que não seja o provete partir, como o exemplo, ocorrer o binário máximo ou o botão de emergência ser ativado.

Quando ocorre o binário máximo, abre-se uma janela a indicar que ocorreu o binário máximo, como está representado na Figura 112. No *simulink* as referências ficam constantes até o utilizador clicar no “Ok” na mensagem de alerta. Feita esta seleção a janela de alerta fecha-se dando lugar à janela correspondente ao controlo manual. Esta janela é exatamente igual à janela do controlo manual para ajuste da bucha no provete, sendo que neste controlo manual o utilizador não poderá aumentar a posição, só usa o controlo manual para diminuir a posição do motor.

O utilizador só consegue clicar “OK” quando o binário estiver num intervalo perto do valor zero. Quando clica em “OK” o utilizador, volta à janela da escolha dos testes.

A Figura 113 apresenta a janela do controlo manual.

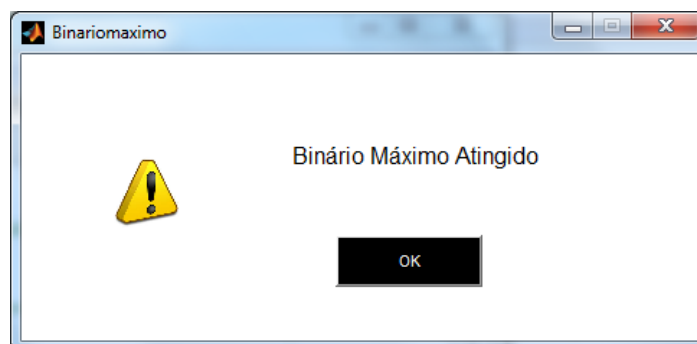


Figura 112 – Janela de alerta de Binário Máximo Atingido

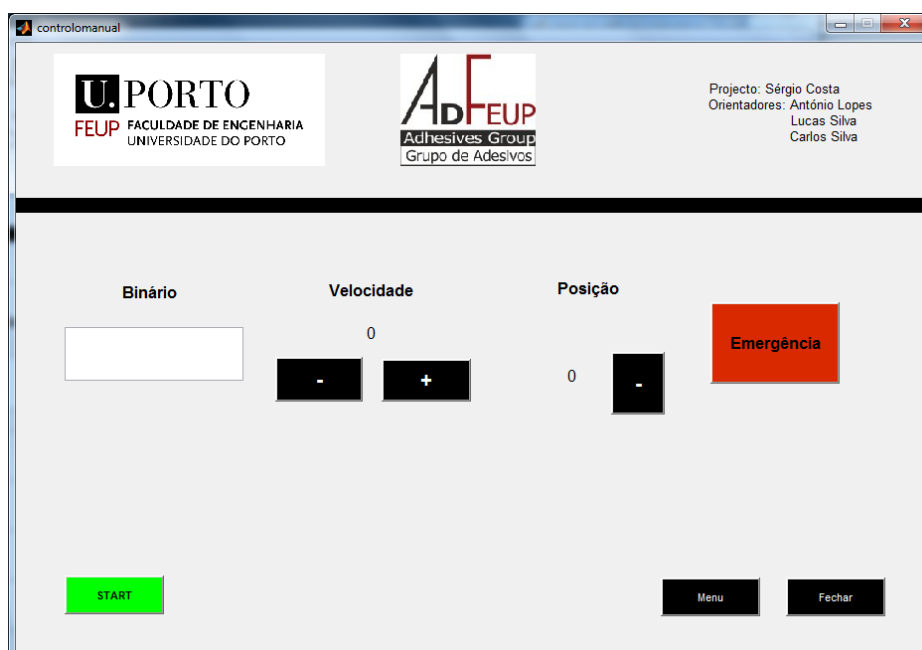


Figura 113 – Controlo manual

Quando é ativo o botão de emergência abre uma janela avisar que foi ativado o botão de emergência e no *Simulink* as referências ficam constantes. (Figura 114).

Quando o botão de emergência é destravado aparece uma janela de alerta a avisar do sucedido e as referências no *Simulink* continuam constantes, até o botão de OK na mensagem de alerta ser ativado.

Feita esta seleção a janela de alerta fecha-se dando lugar à janela correspondente ao controlo manual (Figura 114).

5. Interface gráfica e programa experimental

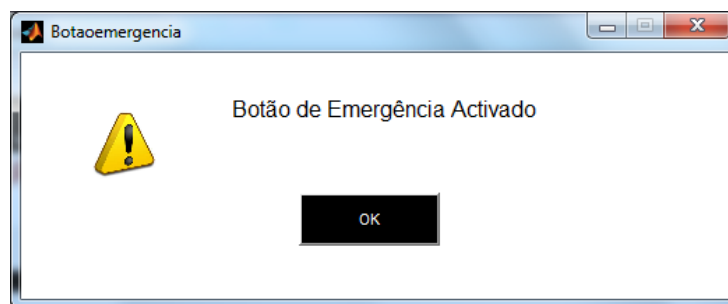


Figura 114 – Janela de alerta, botão de emergência

## 5.2 – Adesivo selecionado e processo de cura

Para a realização de testes iniciais na máquina de ensaios à torção é preciso escolher um adesivo. O adesivo escolhido é o Betamate 2098.

As suas propriedades são [30]:

- Base: Componente A: Resina epóxi; Componente B: Aminas poliméricas
- Densidade (23°C): 1.12g/ml
- Rácio de mistura: A:B= 2:1
- Resistência à tração: 22Mpa
- Módulo de Young: 1100 Mpa

O processo de cura é à temperatura ambiente durante 7 dias.

## 5.3 – Fabrico dos provetes

A preparação dos provetes é bastante importante e como tal deve ser feita com rigor. Nesta secção é explicado o processo da fabricação dos provetes utilizados na máquina de ensaios à torção.

1º- Limpeza dos provetes com acetona (Figura 115);

2º- Fixação das metades “superiores” na ferramenta (Figura 116) através do aperto das amarras (Figura 117);

3º- Aperto das amarras para fixação da metade “superior”, alinhando o furo no sentido da ferramenta;

4º- Deposição do adesivo sobre a superfície de contacto da metade “inferior” do provete;

5º- Colocação da metade “inferior” do provete, aperto da amarra de fixação, alinhando o furo no sentido perpendicular à ferramenta e distribuição do adesivo com auxílio de uma espátula;

6º- Aperto do parafuso de contacto que obriga a metade “superior” do provete a descer no sentido da metade “inferior” (Figura 118).

A Figura 119 mostra um conjunto de provetes após os passos 1-6.



Figura 115 – Provetes



Figura 116 – Molde para fabricar as juntas adesivas



Figura 117 – Amarras



Figura 118 – Aperto do parafuso

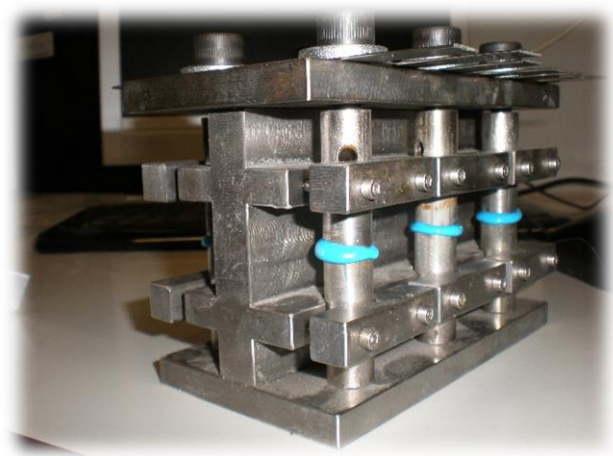


Figura 119 – Resultado final

#### 5.4 – Programa de testes

Para avaliar as potencialidades da máquina propõe-se a execução do programa de testes da Tabela 14. É aconselhado utilizar dois adesivos representativos de casos extremos. Optou-se pelo silicone, que é um adesivo muito frágil, tendo um módulo de Young de 1,6 MPa, e pelo epóxi que é um adesivo mais rígido, sendo o módulo de Young de 1100 Mpa [30].

Pretende-se fazer 8 tipos de ensaios, nomeadamente 2 ensaios por cada tipo de teste permitido pela máquina, sendo que nos testes de controlo de binário e controlo de posição tem de ocorrer a rutura do provete.

Nos testes de fluência e de relaxação poderá haver a rutura do provete ou não, dependendo do binário/deslocamento angular e do tempo que o utilizador indicar no *software*, pois é aplicado um binário ou uma posição constante durante esse intervalo de tempo.

A variável a controlar no teste de controlo de binário e de fluência é o binário, enquanto que no controlo de posição e relaxação é a posição angular do provete.

Os resultados são apresentados em dois gráficos binário versus deslocamento angular do provete e tensão de corte versus tensão de deformação.

Espera-se que nos ensaios do adesivo a posição angular do provete consiga atingir os 70° sem ocorrer a rutura.

Nos testes do adesivo epóxi deverá ocorrer a rutura sem chegar aos 30°.

A Tabela 14 faz um resumo do programa experimental proposto.

Tabela 13 – Programa experimental

| Nº | Tipo de Teste    | Adesivo  | Variável a controlar         | Resultado                                                                    |
|----|------------------|----------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Controlo Binário | Silicone | - Binário                    | - Binário x Deslocamento angular<br>- Tensão de corte x Tensão de deformação |
|    |                  | Epóxi    | - Binário                    | - Binário x Deslocamento angular<br>- Tensão de corte x Tensão de deformação |
| 2  | Controlo Posição | Silicone | - Posição angular do provete | - Binário x Deslocamento angular<br>- Tensão de corte x Tensão de deformação |
|    |                  | Epóxi    | - Posição angular do provete | - Binário x Deslocamento angular<br>- Tensão de corte x Tensão de deformação |
| 3  | Relaxação        | Silicone | - Posição angular do provete | - Binário x Deslocamento angular<br>- Tensão de corte x Tensão de deformação |
|    |                  | Epóxi    | - Posição angular do provete | - Binário x Deslocamento angular<br>- Tensão de corte x Tensão de deformação |
| 4  | Fluência         | Silicone | - Binário                    | - Binário x Deslocamento angular<br>- Tensão de corte x Tensão de deformação |
|    |                  | Epóxi    | - Binário                    | - Binário x Deslocamento angular<br>- Tensão de corte x Tensão de deformação |

## 5. Interface gráfica e programa experimental

## 6. Conclusões

Este projeto inseriu-se em duas áreas importantes: projeto e automação. Teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma máquina para ensaios de torção de juntas topo a topo, de adesivos estruturais, sendo esta capaz de provocar exclusivamente tensões de corte no provete.

A solução para realizar ensaios solicitando o provete só a tensões de corte, foi a de recorrer à utilização de acoplamentos torcionalmente rígidos, apoio móvel e rolamentos oscilantes de esfera. Os acoplamentos torcionalmente rígidos e os rolamentos oscilantes de esferas servem de ajuste à máquina, aquando dos ensaios, compensando as deformações que ocorrem e aliviando o provete de cargas externas. O carro móvel confere à máquina a capacidade de realizar testes com diferentes comprimentos de provetes, o que faz a máquina ser mais versátil.

Houve a necessidade de colocar um contrapeso que permite equilibrar o peso do carro móvel, impedindo o aparecimento de esforços de tração/compressão, no provete. Se necessário também permitirá a introdução de cargas axiais de tração.

A solução para resolver o problema da aplicação do provete nas buchas foi separar a cadeia cinemática quando se está a montar o provete e depois quando se vai iniciar o teste voltar a unir. Para isso projetou-se uma embraiagem de garras.

Todos os componentes projetados foram desenvolvidos através do programa de modelação tridimensional *Solidworks 2013*®, para uma melhor perspetiva visual de toda a cadeia cinemática da máquina e para realizar algumas simulações.

A segunda fase foi a aquisição de todos os componentes, tanto a nível mecânico como a nível elétrico. Para a atuação mecânica foi escolhido um servomotor, um redutor e um *drive* para controlar a corrente do servomotor. O *drive* é controlado pelo computador, através de um programa *Matlab/Simulink*®. O computador está equipado com uma placa de aquisição de dados, que permite enviar e receber sinais analógicos e digitais, e com uma placa de *encoders*, para ler a posição do motor.

Os dados que se retiram num ensaio de torção são: o binário e a posição angular do provete. O binário é obtido através do transdutor de binário, enquanto a posição é obtida a partir do *encoder* do motor.

## 6. Conclusões

Foi desenvolvido um quadro elétrico para fornecer potência, fazer o condicionamento de sinal, proteção e corte.

Para que seja possível utilizar a máquina de uma forma simples, foi desenvolvido uma interface gráfica na aplicação *GUIDE* do *Matlab*®, que faz a comunicação entre a interface e o modelo *Simulink*®.

Existe a necessidade de fazer melhorias no futuro, entre elas:

- A implementação de uma câmara térmica entre as duas buchas. Assim será possível fazer ensaios numa variada gama de temperaturas no adesivo (-80°C a 200°C).
- A implementação de um transdutor de deslocamento diferencial. Assim conseguia-se medir as diferenças angulares das duas faces da junta adesiva. Seria possível fazer um controlo de deslocamento angular e de relaxação tendo como sinal de referência o transdutor diferencial.
- A implementação dos testes propostos na secção 6.4 para se poder avaliar as potencialidades da máquina.

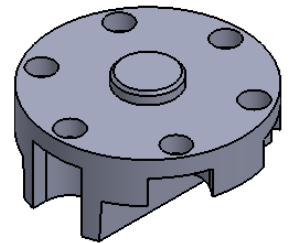
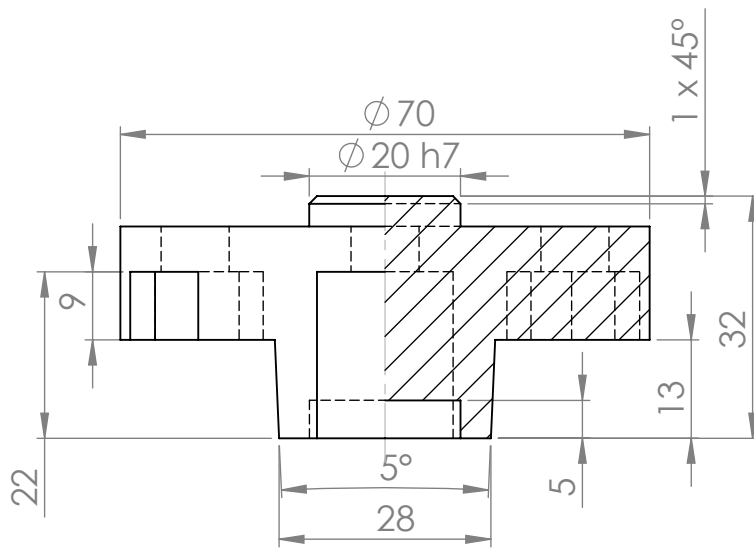
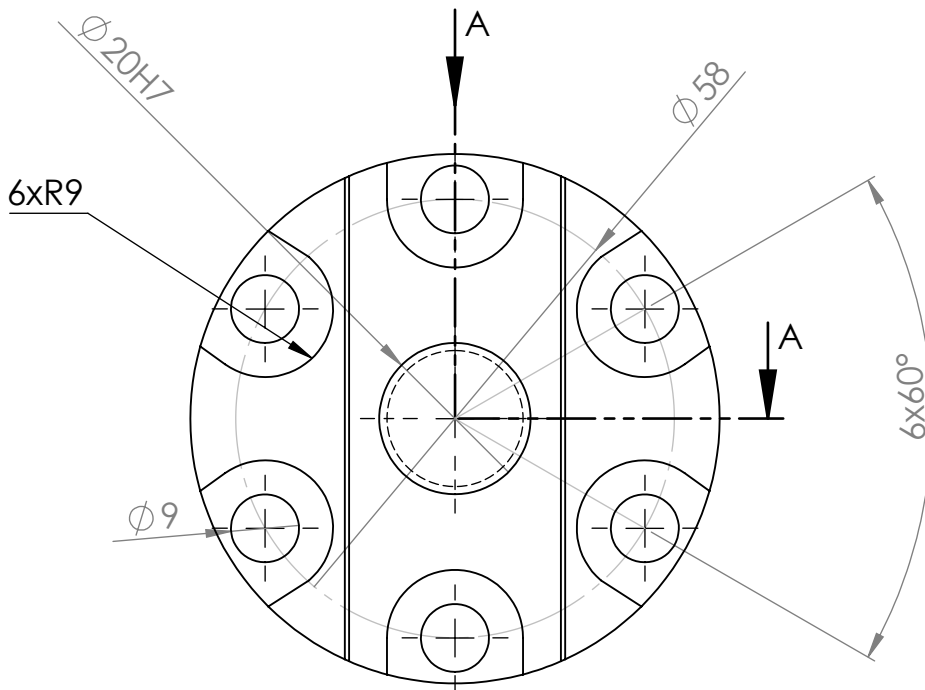
## Referências

- [1] da Silva L.F.M., Ochsner A., Adams R.D., Handbook of Adhesion Technology, 1 ed., Springer, Berlin, 2011.
- [2] Gonçalves J., Desenvolvimento Mecânico de uma Máquina para Ensaio de Torção de Adesivos Estruturais, Porto: FEUP, 2013.
- [3] Guimarães A., Conceção e automatização de um sistema para ensaios de resistência à torção de juntas adesivas, Porto: FEUP, 2013.
- [4] INSTRON, MT MicroTorsion Series - Low-Capacity Torsion Testing Systems, 2010.
- [5] Materials A. S. f. T, Standart Test Method for Shear Strength and Shear Modulus of Structural Adhesives.
- [6] da Silva L. F. M., Dillard D.A., Blackman B.R., Adams R.D., Testing Adhesive Joints, s.l.: WILEY - VCH, 2012..
- [7] “Sensing,” 2014. [Online] <http://www.sensores-de-medida.es/>.
- [8] “efunda,” 2014. [Online] [www.efunda.com](http://www.efunda.com).
- [9] Siemens, Flender Standart Coupling Catalog MD 10.1, 2011.
- [10] FAG, Programa standard FAG. Catálogo 41 500/2 SA.
- [11] Morais J. S., Almacinha J. A., Desenho construção mecânica, Porto: AEFEUP.
- [12] Proxxon, Anleitung für Drehfutter für PD 400 Durchmesser 100mm.
- [13] Parvex, Brushless NX.
- [14] Parvex, Réducteurs GE.
- [15] B. Gear, Huco Couplings, 2007.
- [16] Group, “Rexroth Bosch,” [Online] [www.boschrexroth-us.com](http://www.boschrexroth-us.com).
- [17] Morais J., Desenho técnico básico volume 3, 23ª edição, Porto: Gráficos Reunidos
- [18] “FAG,” 2014. [Online] <http://www.fag.de/>.
- [19] SYSTEMES, DASSAULT. Solidworks simulation help, 2012. [Online] [www.help.solidworks.com](http://www.help.solidworks.com).

- [20] Gomes S., *Mecânica dos Sólidos e Resistência dos Materiais*, Porto: Universidade do Porto, 2009.
- [21] Giannis S., *The Mechanical and Physical Behaviour of Aircraft Fuel Tank Sealants*,” University of Bristol, Bristol, 2005.
- [22] Voss W., *A Comprehensive Guide to Servo Motor Sizing*, *Copperhill Technologies Corporation*, 2007.
- [23] Mazurkiewicz J., *AC vs DC Brushless Servo Motor*, *Baldor Electric*.
- [24] Rodrigues J.D., *Apontamentos de vibrações de sistemas mecânicos*, Porto: Universidade do Porto, 2009.
- [25] Ogata K., *Modern Control Engineering*, USA: Tom Robbins, 1997.
- [26] Ogata K., *Discrete-time control systems*, USA: Prentice-Hall International, 1987.
- [27] Computing M., *PCI DAS - User's Guide*, Measurent Coumputing Corporation, 2009.
- [28] Parvex, *Digivex Single Drive - Manual*, 2004.
- [29] Computing M., *PCI-QUAD04 User's Guide*, Measurent Coumputing Corporation, 2009.
- [30] “Betamate 2098 - Technical Satasheet,” 21 02 2011.

## **Anexo A: Parte superior da embraiagem**



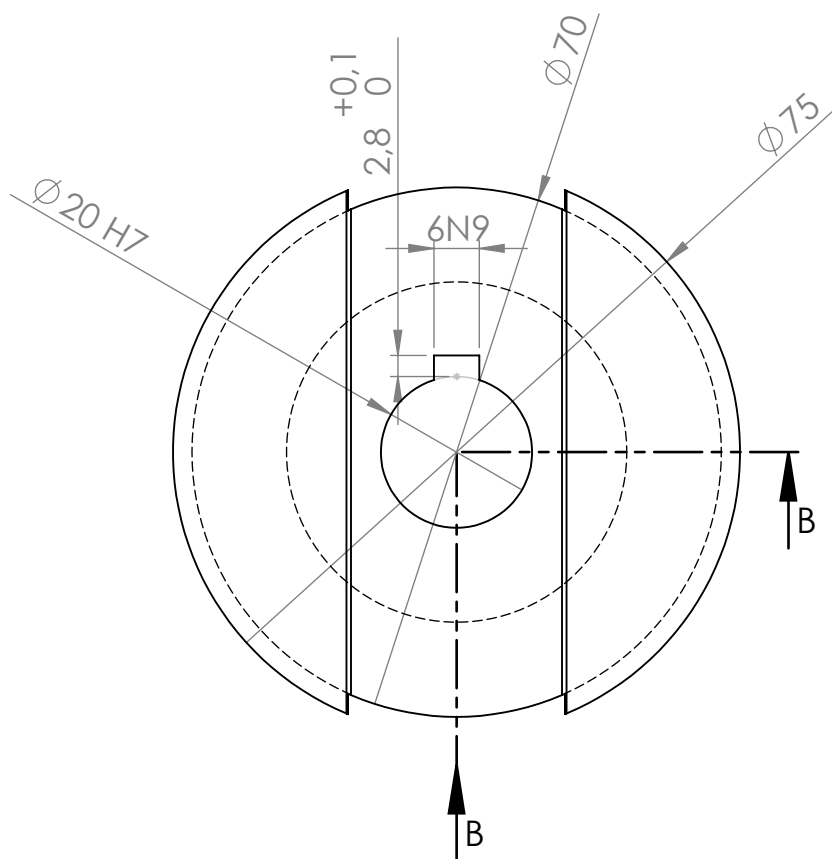
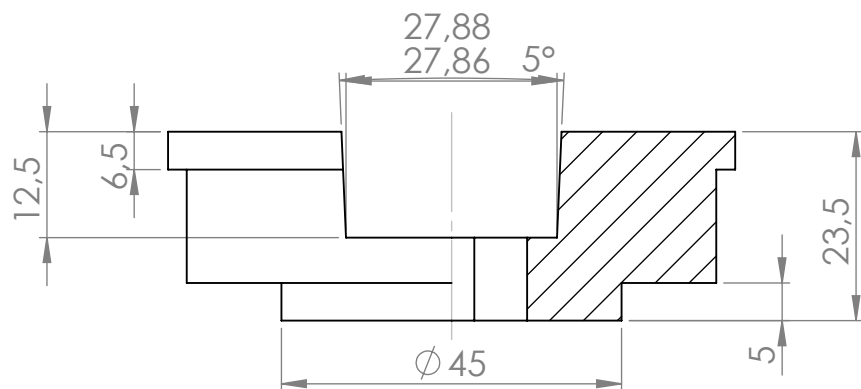


|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  |                              |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|---------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|------------------------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS<br>SURFACE FINISH:<br>TOLERANCES:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |  |  |  | FINISH: |  | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES |  | DO NOT SCALE DRAWING |  | REVISION                     |  |
| DRAWN                                                                                                                 |  |  |  | NAME    |  | SIGNATURE                         |  | DATE                 |  | TITLE:                       |  |
| CHK'D                                                                                                                 |  |  |  | Sérgio  |  |                                   |  | 26/02                |  | Parte Superior da Embraiagem |  |
| APPV'D                                                                                                                |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  |                              |  |
| MFG                                                                                                                   |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  |                              |  |
| Q.A                                                                                                                   |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  |                              |  |
|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  | MATERIAL:            |  | DWG NO.                      |  |
|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  | Alumínio             |  | A4                           |  |
|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  | WEIGHT:              |  | SCALE:1:2                    |  |
|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  | SHEET 1 OF 1                 |  |



## **Anexo B: Parte inferior da embraiagem**





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  | Sérgio |           | 26/02     |  |  |
| CHK'D  |        |           |           |  |  |
| APPV'D |        |           |           |  |  |
| MFG    |        |           |           |  |  |
| Q.A    |        |           |           |  |  |
|        |        |           | MATERIAL: |  |  |
|        |        |           | Alumínio  |  |  |
|        |        |           | WEIGHT:   |  |  |

TITLE:

Parte Inferior da Embraiagem

DWG NO.

A4

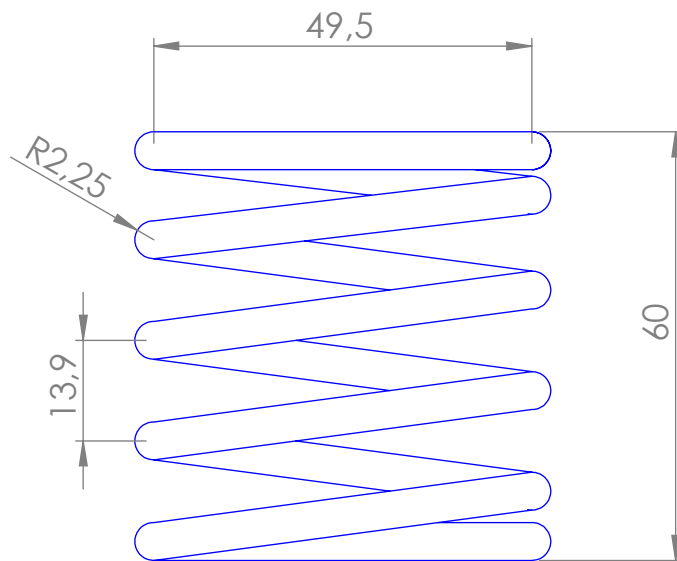
SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



## **Anexo C: Mola**



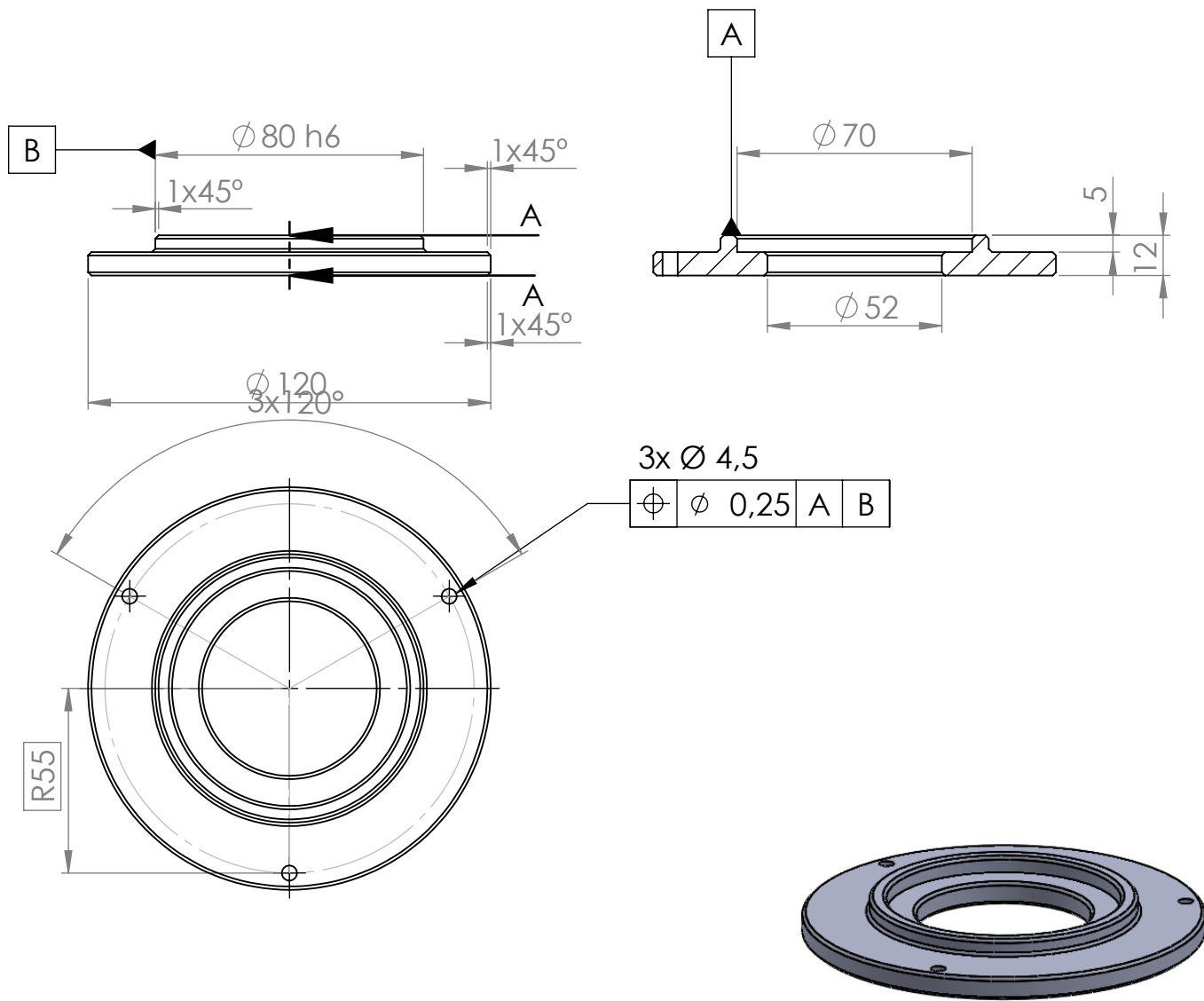


|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  |              |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|---------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS<br>SURFACE FINISH:<br>TOLERANCES:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |  |  |  | FINISH: |  | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES |  | DO NOT SCALE DRAWING |  | REVISION     |  |
| DRAWN                                                                                                                 |  |  |  | NAME    |  | SIGNATURE                         |  | DATE                 |  | TITLE:       |  |
| CHK'D                                                                                                                 |  |  |  | Sérgio  |  |                                   |  | 26/02                |  | Mola         |  |
| APPV'D                                                                                                                |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  |              |  |
| MFG                                                                                                                   |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  |              |  |
| Q.A                                                                                                                   |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  |              |  |
|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  | MATERIAL:            |  | DWG NO.      |  |
|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  | Corda de Piano       |  | A4           |  |
|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  | WEIGHT:              |  | SCALE:1:1    |  |
|                                                                                                                       |  |  |  |         |  |                                   |  |                      |  | SHEET 1 OF 1 |  |



## **Anexo D: Tampa**





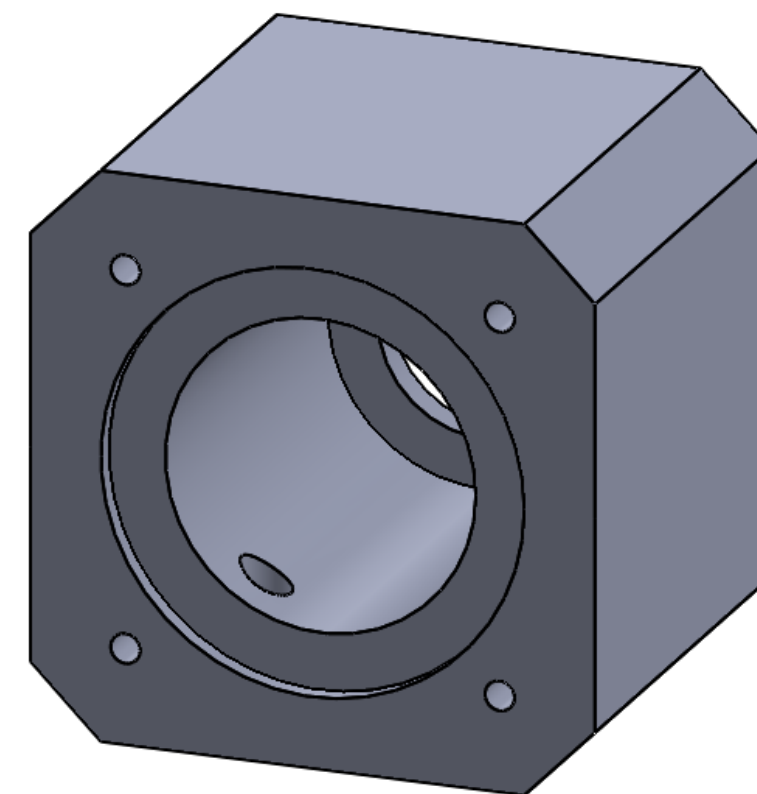
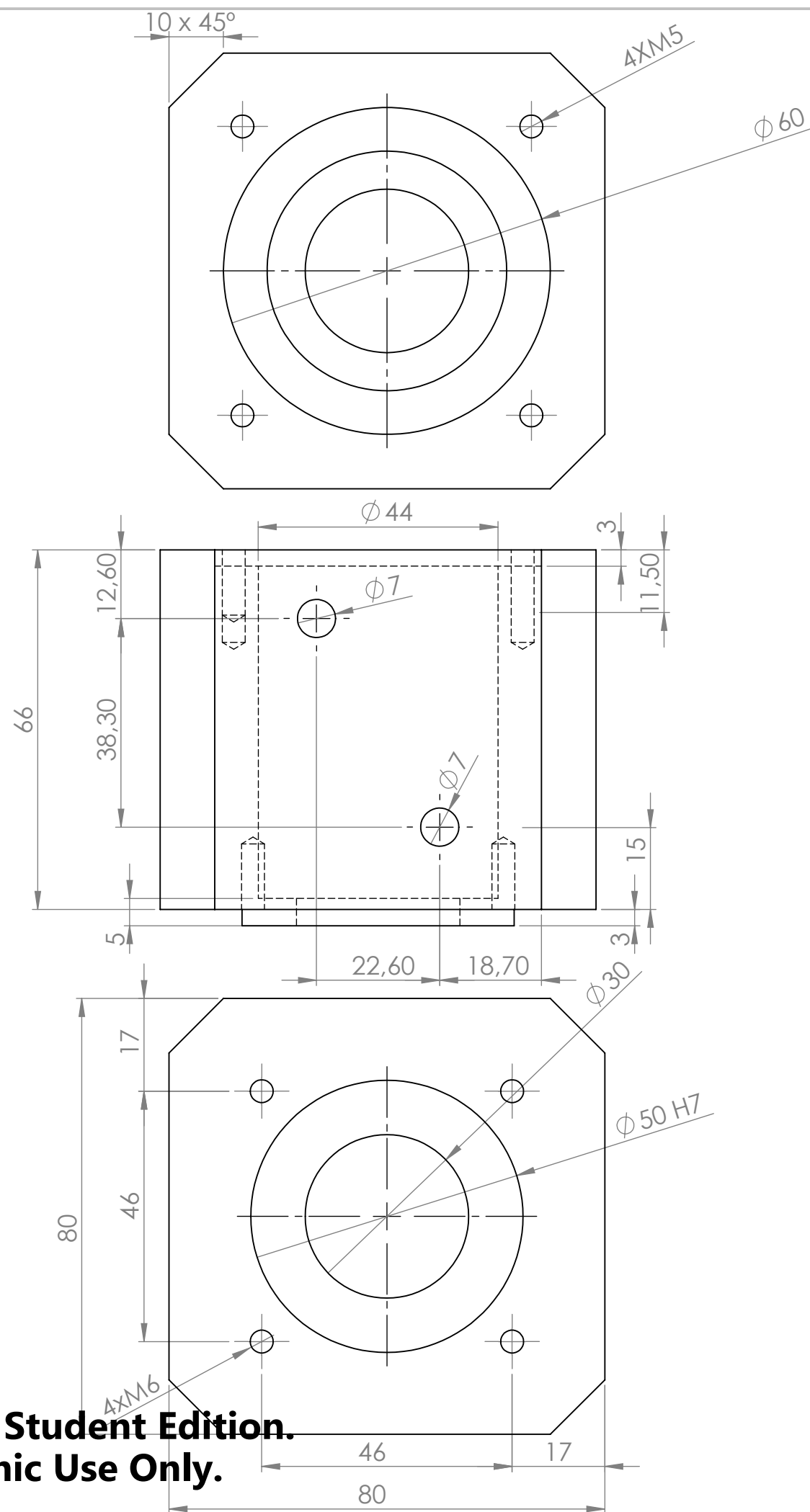
3 Peças

|                                                                                                                       |  |         |  |                                   |  |                      |  |              |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS<br>SURFACE FINISH:<br>TOLERANCES:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |  | FINISH: |  | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES |  | DO NOT SCALE DRAWING |  | REVISION     |  |
| DRAWN                                                                                                                 |  | NAME    |  | SIGNATURE                         |  | DATE                 |  | TITLE:       |  |
| CHK'D                                                                                                                 |  | Sérgio  |  |                                   |  | 26/02                |  | Tampa        |  |
| APPV'D                                                                                                                |  |         |  |                                   |  |                      |  |              |  |
| MFG                                                                                                                   |  |         |  |                                   |  |                      |  |              |  |
| Q.A                                                                                                                   |  |         |  |                                   |  |                      |  | DWG NO.      |  |
|                                                                                                                       |  |         |  |                                   |  |                      |  | A4           |  |
|                                                                                                                       |  |         |  |                                   |  |                      |  | SCALE:1:5    |  |
|                                                                                                                       |  |         |  |                                   |  |                      |  | SHEET 1 OF 1 |  |



## **Anexo E: Luneta**





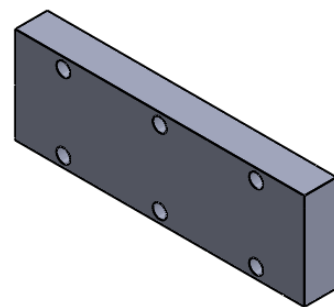
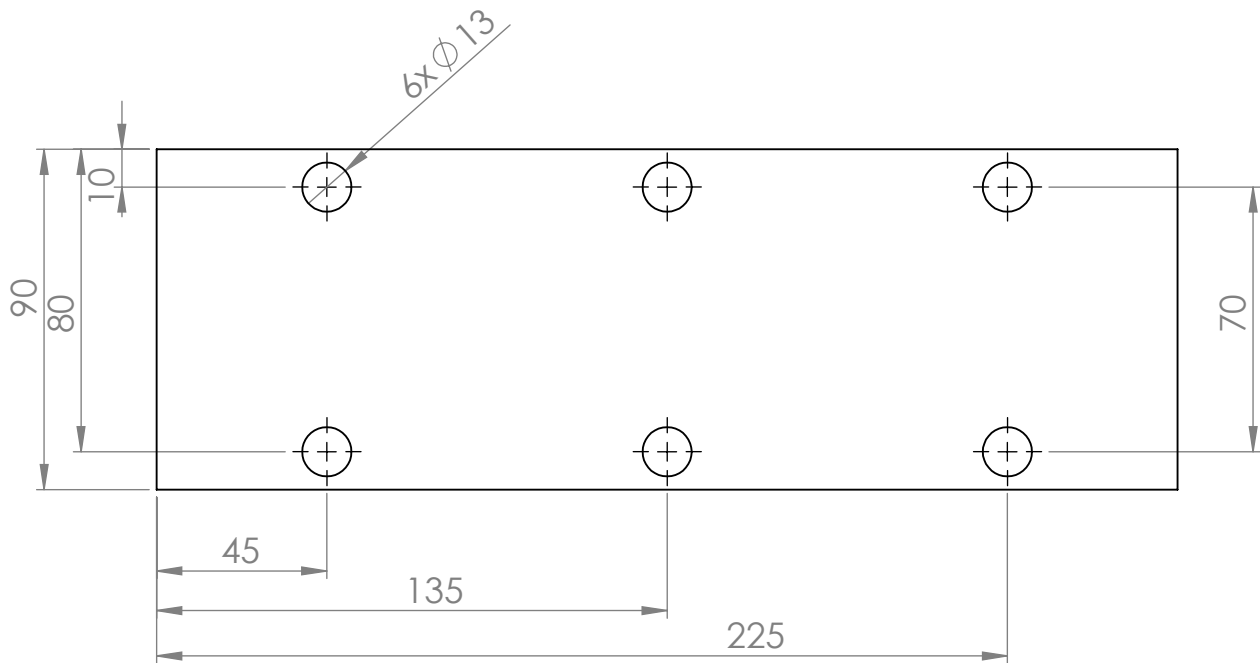
|                                                                                                                       |        |  |           |         |                           |  |                                   |                      |                      |              |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--|-----------|---------|---------------------------|--|-----------------------------------|----------------------|----------------------|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS<br>SURFACE FINISH:<br>TOLERANCES:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |        |  |           | FINISH: |                           |  | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES | DO NOT SCALE DRAWING |                      | REVISION     |  |
|                                                                                                                       |        |  |           |         |                           |  |                                   |                      |                      |              |  |
|                                                                                                                       | NAME   |  | SIGNATURE |         | DATE                      |  |                                   |                      | TITLE:<br><br>Luneta |              |  |
| DRAWN                                                                                                                 | Sérgio |  |           |         | 26/02                     |  |                                   |                      |                      |              |  |
| CHK'D                                                                                                                 |        |  |           |         |                           |  |                                   |                      |                      |              |  |
| APPV'D                                                                                                                |        |  |           |         |                           |  |                                   |                      |                      |              |  |
| MFG                                                                                                                   |        |  |           |         |                           |  |                                   |                      |                      |              |  |
| Q.A                                                                                                                   |        |  |           |         | MATERIAL:<br><br>Alumínio |  |                                   | DWG NO.              |                      | A3           |  |
|                                                                                                                       |        |  |           |         |                           |  |                                   |                      |                      |              |  |
|                                                                                                                       |        |  |           |         |                           |  |                                   |                      |                      |              |  |
|                                                                                                                       |        |  |           |         | WEIGHT:                   |  |                                   | SCALE:1:1            |                      | SHEET 1 OF 1 |  |

SolidWorks Student Edition.  
For Academic Use Only.



## **Anexo F: Topo superior**



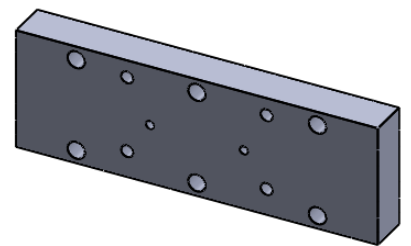
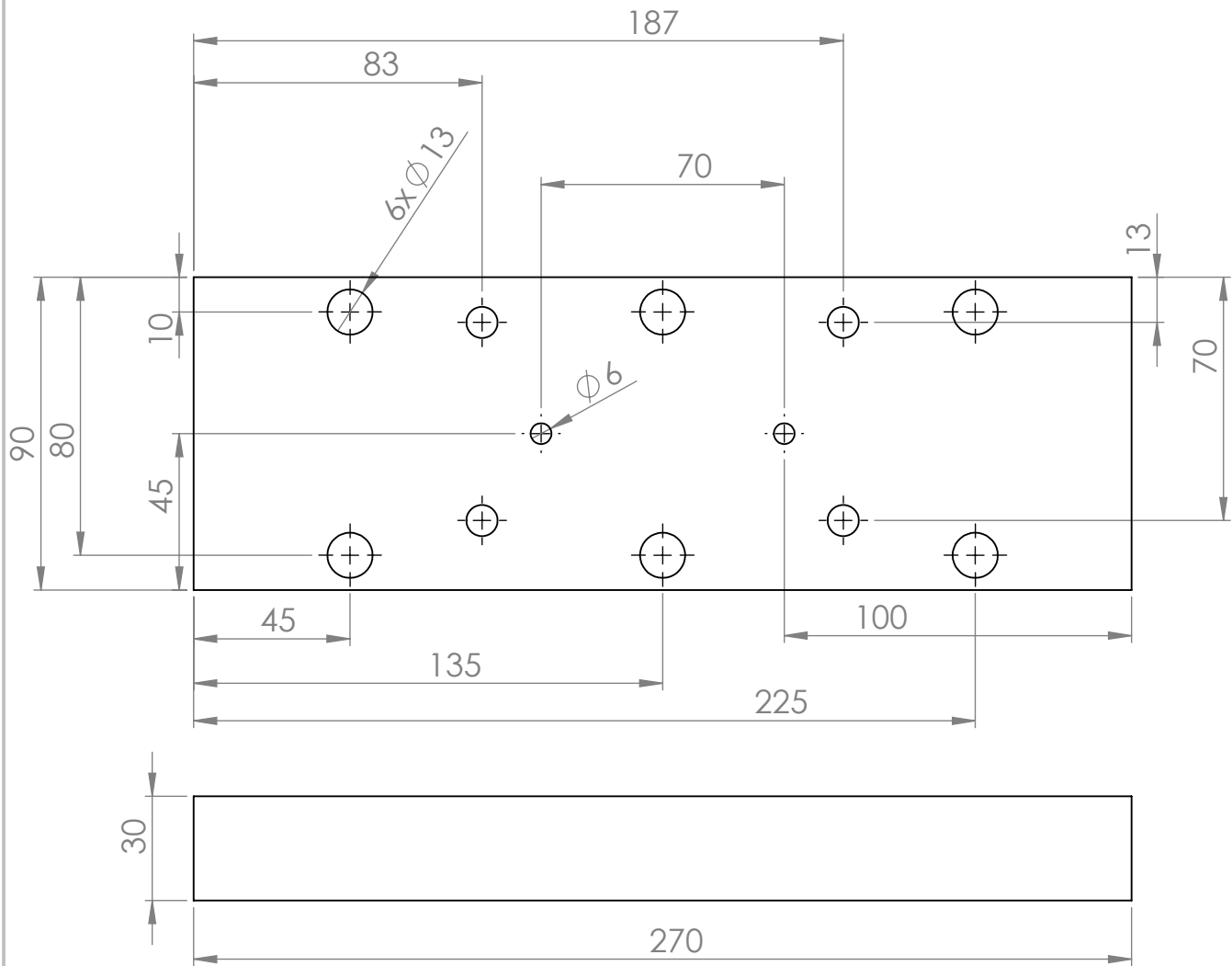


|                                                                                                                       |  |           |  |                                   |  |                                    |  |              |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------|--|-----------------------------------|--|------------------------------------|--|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS<br>SURFACE FINISH:<br>TOLERANCES:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |  | FINISH:   |  | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES |  | DO NOT SCALE DRAWING               |  | REVISION     |  |
|                                                                                                                       |  |           |  |                                   |  |                                    |  |              |  |
| NAME                                                                                                                  |  | SIGNATURE |  | DATE                              |  | TITLE:<br><br><b>Topo Superior</b> |  |              |  |
| DRAWN                                                                                                                 |  | Sérgio    |  | 26/02                             |  |                                    |  |              |  |
| CHK'D                                                                                                                 |  |           |  |                                   |  |                                    |  |              |  |
| APPV'D                                                                                                                |  |           |  |                                   |  |                                    |  |              |  |
| MFG                                                                                                                   |  |           |  |                                   |  |                                    |  |              |  |
| Q.A                                                                                                                   |  |           |  |                                   |  | MATERIAL:                          |  | DWG NO.      |  |
|                                                                                                                       |  |           |  |                                   |  | Alumínio                           |  |              |  |
|                                                                                                                       |  |           |  |                                   |  |                                    |  | A4           |  |
|                                                                                                                       |  |           |  |                                   |  | WEIGHT:                            |  | SCALE:1:5    |  |
|                                                                                                                       |  |           |  |                                   |  |                                    |  | SHEET 1 OF 1 |  |



## **Anexo G: Topo inferior**





|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------|--|-----------|--|-----------------------------------|--|------------------------------------|--|----------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS<br>SURFACE FINISH:<br>TOLERANCES:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |  |        |  | FINISH:   |  | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES |  | DO NOT SCALE DRAWING               |  | REVISION |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  | <p>TITLE:</p> <p>Topo Inferior</p> |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
| DRAWN                                                                                                                 |  | NAME   |  | SIGNATURE |  | DATE                              |  | <p>DWG NO.</p>                     |  |          |  |
| CHK'D                                                                                                                 |  | Sérgio |  |           |  | 26/02                             |  |                                    |  |          |  |
| APPV'D                                                                                                                |  |        |  |           |  |                                   |  | <p>SCALE:1:5</p>                   |  |          |  |
| MFG                                                                                                                   |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
| Q.A                                                                                                                   |  |        |  |           |  |                                   |  | <p>SHEET 1 OF 1</p>                |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  | <p>A4</p>                          |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  | <p>WEIGHT:</p>                     |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  | <p>Alumínio</p>                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  | <p>MATERIAL:</p>                   |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  | <p>Alumínio</p>                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  | <p>WEIGHT:</p>                     |  |          |  |
|                                                                                                                       |  |        |  |           |  |                                   |  |                                    |  |          |  |



## **Anexo H: Chapa**







## **Anexo I: Apoio bucha superior**







## **Anexo J: Apoio bucha inferior**







## **Anexo K: Apoio redutor**

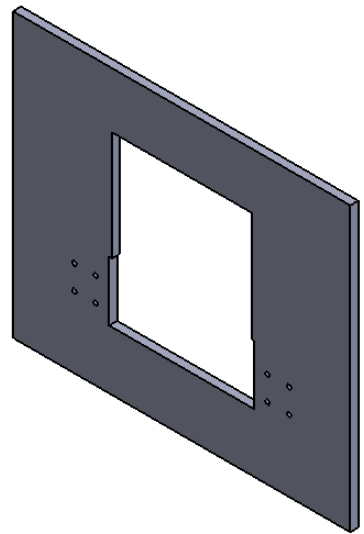
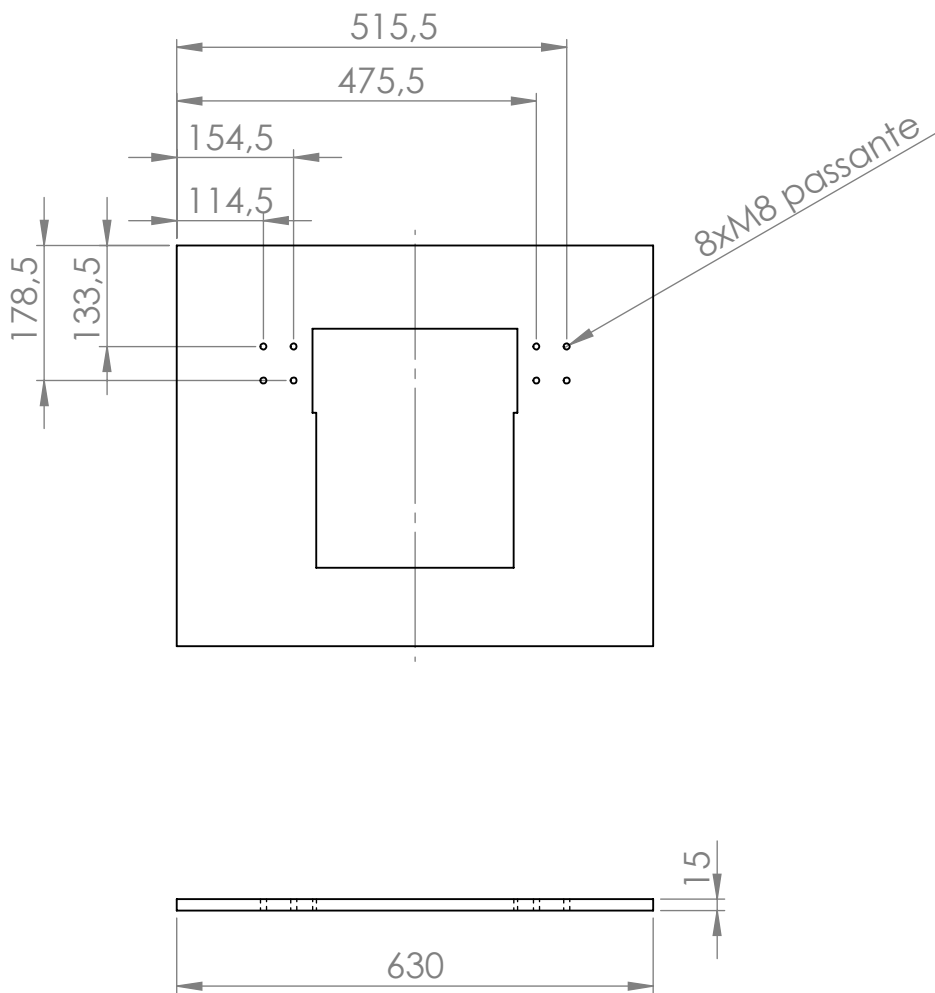






## **Anexo L: Mesa de suporte**





|                                                                                                                       |  |         |  |                                   |  |                      |  |                 |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|-----------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS<br>SURFACE FINISH:<br>TOLERANCES:<br>LINEAR:<br>ANGULAR: |  | FINISH: |  | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES |  | DO NOT SCALE DRAWING |  | REVISION        |  |
| DRAWN                                                                                                                 |  | NAME    |  | SIGNATURE                         |  | DATE                 |  | TITLE:          |  |
| CHK'D                                                                                                                 |  | Sérgio  |  |                                   |  | 26/02                |  | Mesa de Suporte |  |
| APPV'D                                                                                                                |  |         |  |                                   |  |                      |  |                 |  |
| MFG                                                                                                                   |  |         |  |                                   |  |                      |  |                 |  |
| Q.A                                                                                                                   |  |         |  |                                   |  |                      |  |                 |  |
|                                                                                                                       |  |         |  |                                   |  | MATERIAL:            |  | DWG NO.         |  |
|                                                                                                                       |  |         |  |                                   |  | Alumínio             |  | A4              |  |
|                                                                                                                       |  |         |  |                                   |  | WEIGHT:              |  | SCALE:1:10      |  |
|                                                                                                                       |  |         |  |                                   |  |                      |  | SHEET 1 OF 1    |  |



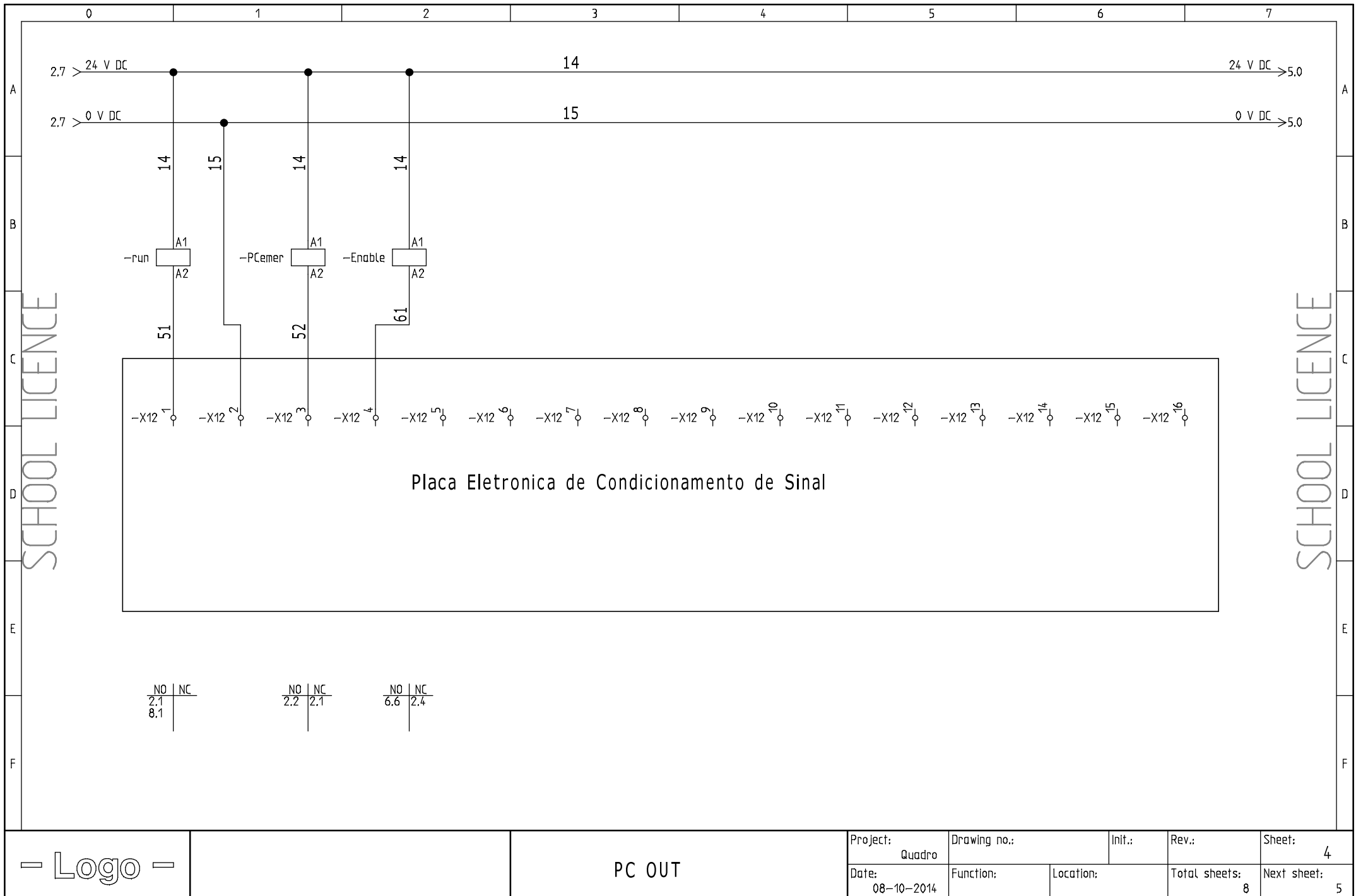
## **Anexo M: Esquemas elétricos**



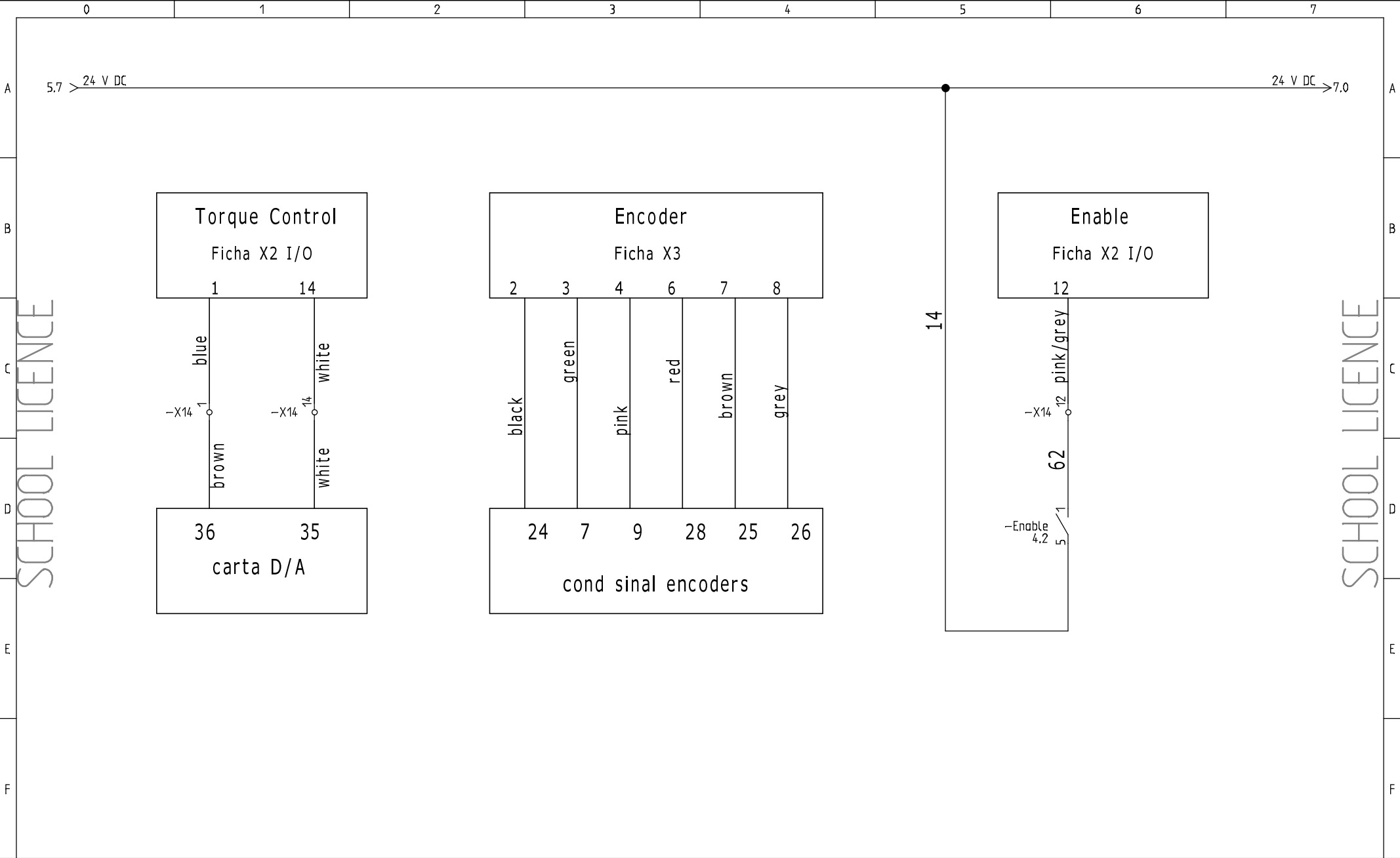


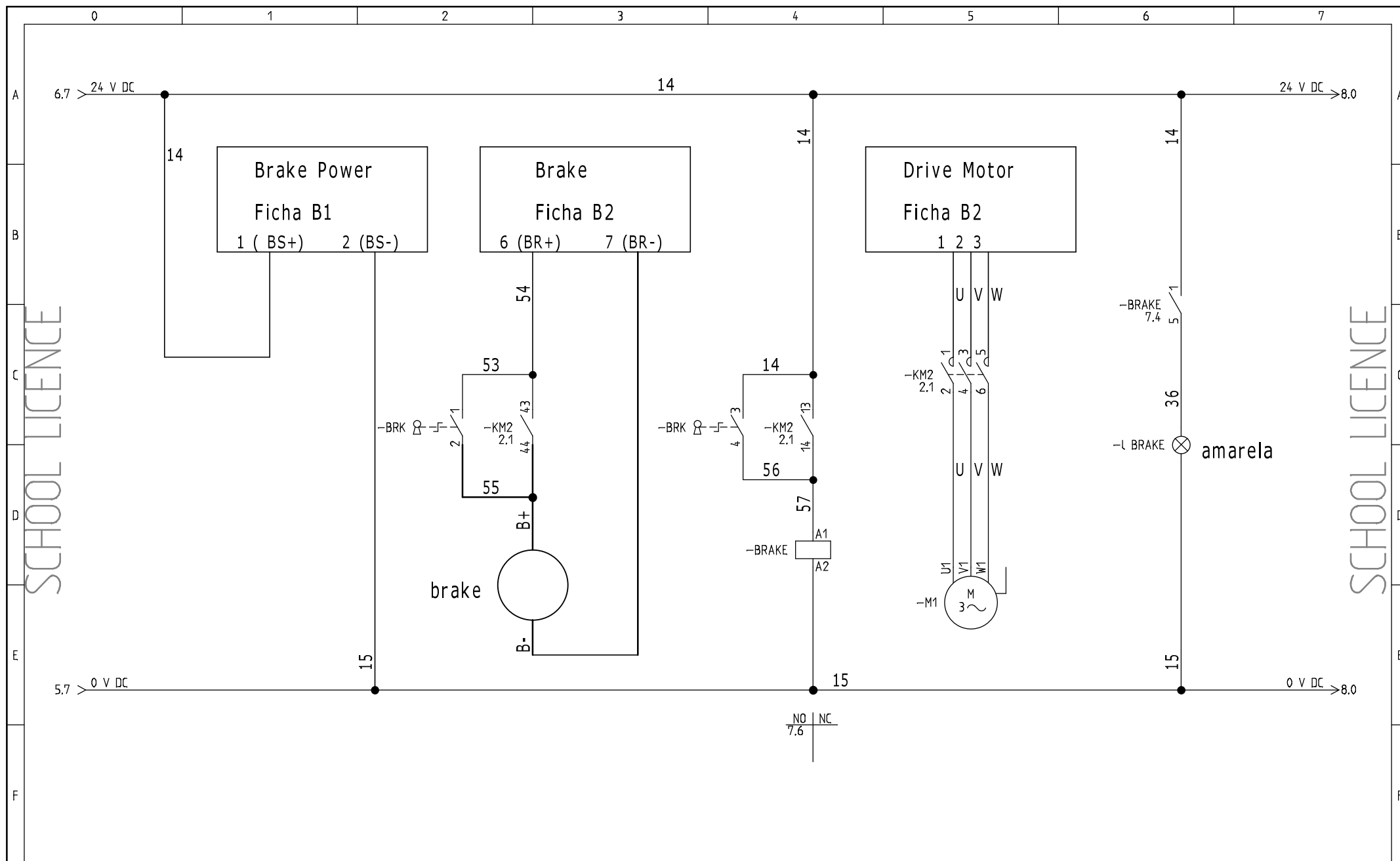








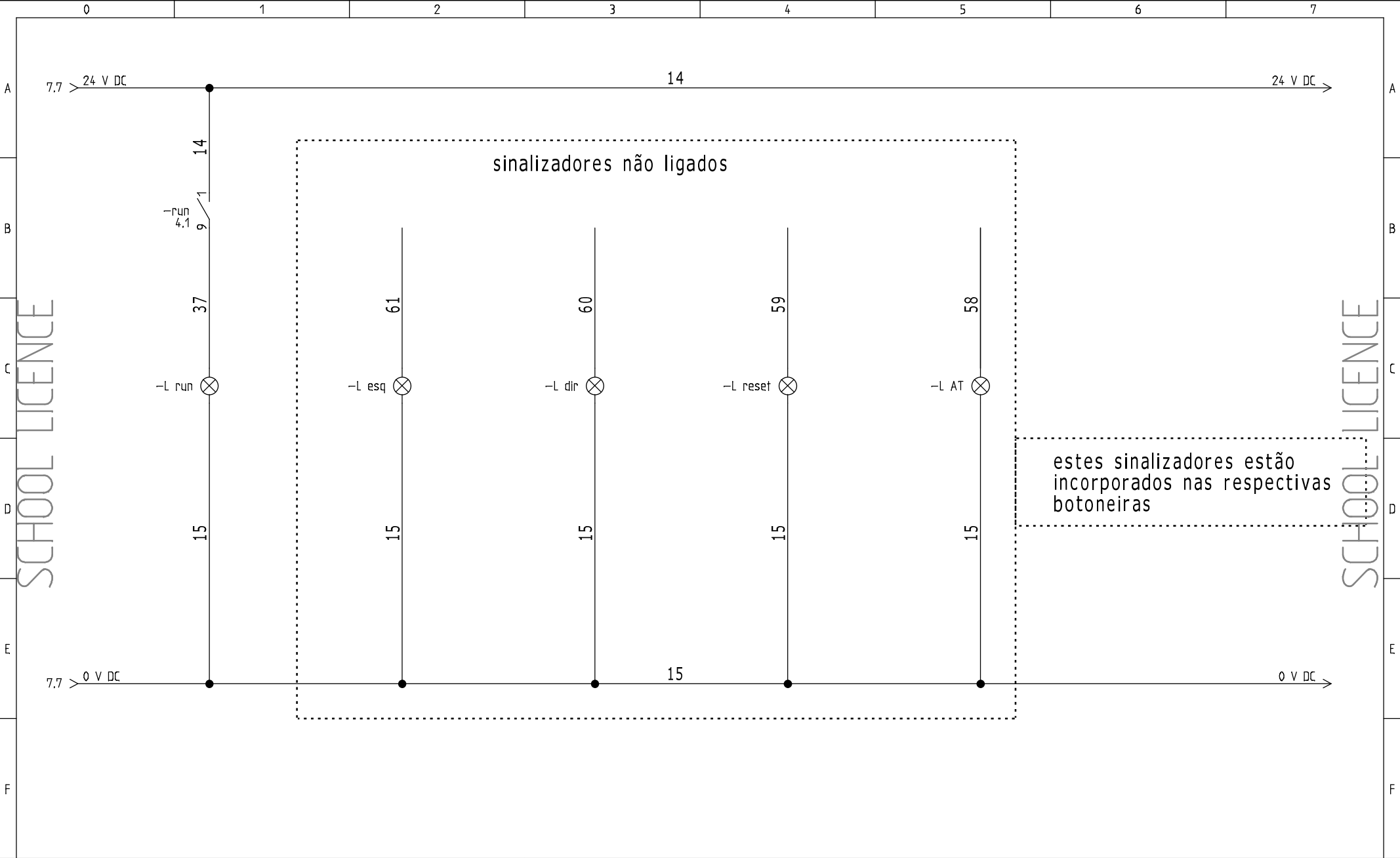




- Logo -

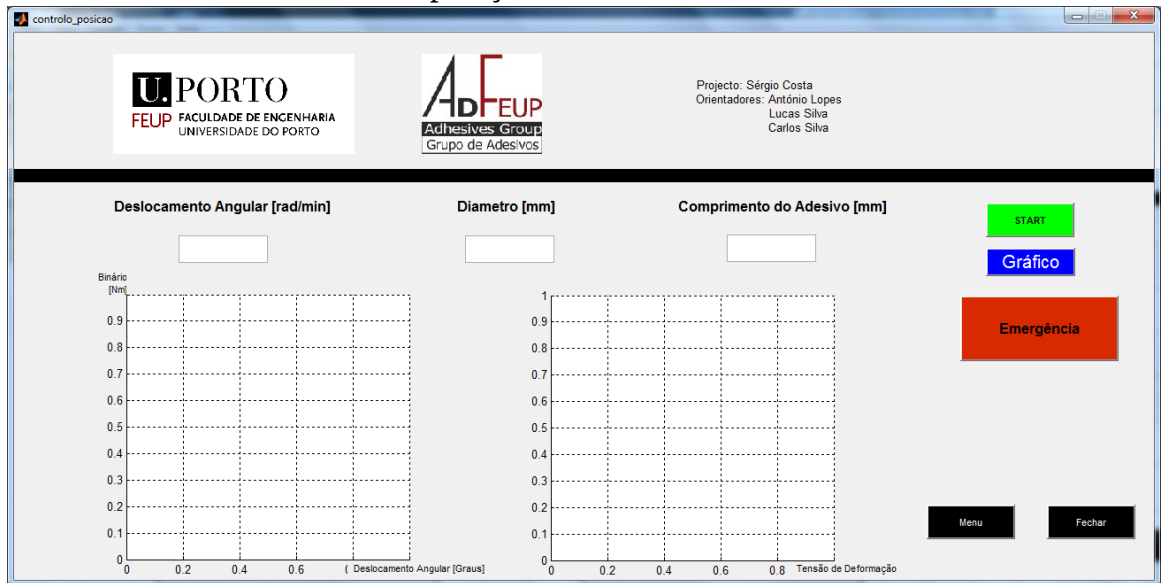
## Brake / Motor Drive

|            |              |           |               |             |
|------------|--------------|-----------|---------------|-------------|
| Project:   | Drawing no.: | Init.:    | Rev.:         | Sheet:      |
| Date:      | Function:    | Location: | Total sheets: | Next sheet: |
| 08-10-2014 |              |           | 8             | 8           |



## **Anexo N: Interface gráfica**

- Interface do teste em controlo posição



- Interface do teste relaxamento

