

Automatização de uma Máquina de Ensaio do tipo *Hounsfield Tensometer*

Mariana Freire Resende de Moura

Dissertação do MIEM

Orientador:

Professor Doutor Joaquim Gabriel Magalhães Mendes

Coorientador:

Professor Doutor António Manuel Ferreira Mendes Lopes



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Especialização de Automação

setembro 2015

Aos meus Pais

Resumo

A requalificação tecnológica de máquinas antigas assume um papel de grande relevância atual pois evita a aquisição de equipamento novo que, em muitas situações, se revela dispendioso. Mantendo o projeto mecânico da máquina original, é possível acrescentar todos os componentes de automação, controlo e medição necessários para dar resposta aos requisitos de cada aplicação. Nesta perspetiva surge a presente dissertação, cujo objetivo principal é a automatização de uma máquina de ensaios mecânicos *Hounsfield Tensometer* (HT), que se encontra fora de uso no Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec), por substituição do modo de controlo manual por um automático, e permitir a sua utilização em contexto académico: didático e de investigação.

O *Hounsfield Tensometer* é uma máquina horizontal de ensaios mecânicos para bancadas de laboratório com capacidade máxima de 20 kN, dispondo de vários acessórios que permitem a sua utilização em diversos tipos de ensaios e para vários tipos de materiais. Após análise do funcionamento da máquina HT e acessórios disponíveis, definiram-se as alterações a serem realizadas, tendo em consideração a sua utilização final para ensaios de tração.

Começou por fazer-se a seleção e aquisição dos componentes de atuação mecânica e instrumentação, tendo sido adquiridos comercialmente um servomotor e *driver*, um redutor planetário e 4 extensómetros, para colocação numa célula de carga, dado que nos ensaios de tração devem ser feitas medições da força (F) e deslocamento (Δl) do provete. Foi ainda projetado um quadro elétrico responsável pelo fornecimento de potência aos vários equipamentos, pelo condicionamento de sinal e corte de energia e pela proteção de equipamentos em situações de emergência. Para preservar a portabilidade da máquina foi desenhada, em perfil *Bosch*, uma mesa suporte para todo o sistema. Foi desenvolvida também uma interface gráfica em *LabVIEW*, que permite ao utilizador definir os parâmetros de ensaio, obter o gráfico F vs. Δl e transformá-lo no gráfico tensão (σ) vs. deformação (ε) após a conclusão do ensaio. A máquina HT é controlada a partir de um computador portátil, que estará localizado junto da mesma, na mesa de suporte.

Deste modo concluiu-se que foi possível proceder-se à automatização do *Hounsfield Tensometer* existente no DEMec para ensaios de tração, a partir da seleção de alguns componentes de automação, controlo e medição. O ensaio obedece a uma lógica específica de comando implementada por *hardware* e por *software*. O controlo do sistema foi feito em *LabVIEW* onde também foi criada uma interface gráfica de uso simples.

Automation of the Testing Machine Hounsfield Tensometer

Abstract

Nowadays, the technological upgrading of old machines assumes an important role since it may avoid the purchase of new equipment which, in some situations, reveals to be expensive. Keeping the mechanical project of the original machine, it is possible to add automation, control and measurement components that are necessary to meet the requirements for each application. In this context, the main objective of this thesis is to perform the automation of a Hounsfield Tensometer (HT), a mechanical testing machine which is out of use in the Department of Mechanical Engineering (DEMec), by replacing the manual control mode by an automatic one, allowing the new system to be used in academic contexts: educational and research.

The HT is a horizontal testing machine for laboratory bench with maximum capacity of 20 kN, offering numerous accessories that allow its use for various types of tests with several materials. After studying the operation of the original HT machine and checking-up of current available accessories, the changes to be included in the upgraded version were defined, taking into consideration its final use for tensile tests.

Firstly, the selection of mechanical actuation and instrumentation components was performed and subsequently they were commercial purchased: one servomotor and driver, one planetary gearbox and 4 strain gauges to be placed in a load cell, as during the tensile tests the measurement of the force (F) and displacement (Δl) need to be done. Furthermore, an electric box was projected for providing the electrical power to the equipment, to do signal conditioning, energy cutting, and equipment protection in emergency situations. To preserve the portability of the HT machine, it was designed, in Bosch profile, a table to support all the system. Moreover, a graphical interface was created in LabVIEW to allow the user to define the test parameters, to obtain the plot F vs. Δl and to convert it into the plot stress (σ) vs. strain (ϵ) after the conclusion of the test. The HT machine is controlled by a laptop which is placed near the machine, in the supporting table.

In conclusion, it was possible to perform the automation of the existing HT for tensile tests through the selection of adequate automation, control and measurement components. The test follows a well-defined logic control implemented by hardware and software. The system control was performed in LabVIEW in which it was also developed a user-friendly graphical interface.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Joaquim Gabriel Mendes e Professor Doutor António Mendes Lopes, pela oportunidade que me deram de desenvolver este trabalho e pelo apoio prestado ao longo do seu desenvolvimento.

Ao Professor Doutor Francisco Freitas, pelos comentários sempre pertinentes que se revelaram bastante úteis para o avanço do projeto.

Ao Professor Doutor António Torres Marques, por ter disponibilizado a máquina *Hounsfield Tensometer* e pela partilha entusiástica de algumas histórias sobre esta.

Aos Engenheiros Fernando Saldanha e Paulo Nóvoa, por me terem facultado documentos importantes sobre o HT. Aos Engenheiros Miguel Figueiredo e Rui Silva do LET, pela disponibilização da máquina de ensaios na fase de caracterização da célula de carga. À D. Andreia Durães pelos ensaios feitos no INEGI na fase de validação do HT.

Ao Sr. Joaquim Silva, técnico do Laboratório de Óleo-Hidráulica, pela sua constante disponibilidade para ajudar e apoiar em todos os momentos desta dissertação, pela amizade e pelos bons momentos proporcionados no laboratório. Ao Sr. António Ramalho, pela colaboração dada na colagem dos extensómetros bem como o apoio prestado no trabalho.

Aos meus colegas e amigos de laboratório, Fábio, Tiago, Vítor e Diogo, pela ajuda preciosa que me deram, pela companhia nas imensas horas no laboratório, sem esquecer a boa disposição e os agradáveis momentos que vivemos ao longo do semestre.

Aos meus Pais por serem o meu grande pilar, por me proporcionarem sempre o melhor e, acima de tudo, por todas as palavras de incentivo e apoio pronunciadas nos momentos certos.

Ao Carlos, por acreditar sempre, e por vezes mais do que eu, nas minhas capacidades, pela força que me transmitiu, pelo carinho e pelo apoio incansável, não só durante esta dissertação, mas também ao longo de todo o curso.

À Joana, pela amizade, por estar sempre presente e por nunca me deixar ir abaixo.

Às amigas que levo da FEUP, por terem sido também elas o meu suporte durante estes 5 anos, em especial durante esta etapa da dissertação.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos amigos de sempre. À Ana, ao Filipe, à Francisca e à Martinha por estarem sempre à distância de apenas um *click*.

A todos, o meu sincero Obrigada!

Índice de Conteúdos

1.	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do Projeto.....	1
1.2	<i>Hounsfield Tensometer</i>	2
1.3	Objetivos do Projeto	3
1.4	Estrutura da Dissertação	4
2.	Máquinas de Ensaio Mecânicos de Materiais	7
2.1	Máquinas de Ensaio Universais	8
2.2	<i>Electronic Tensometer</i>	11
2.2.1	Modelo TM-ER1	11
2.2.2	Modelo TM-ER3	12
2.2.3	Modelo PC-2000	14
3.	Estudo Prévio do <i>Hounsfield Tensometer</i>	17
3.1	Apresentação da Máquina e Descrição do Funcionamento	17
3.2	Determinação das Velocidades de Ensaio	24
3.3	Determinação da Cadeia de Transmissão	25
3.4	Alterações Propostas.....	29
4.	Descrição dos Componentes Principais de Atuação e Instrumentação	31
4.1	Atuação Mecânica.....	33
4.2	Instrumentação.....	38
4.2.1	Extensómetros de Resistência	39
4.2.2	Caracterização da Célula de Carga.....	42
4.2.3	Caracterização do Sistema de Medição do Deslocamento	45
4.3	Quadro Elétrico.....	46

4.3.1	Hardware de Comando	52
4.4	Mesa de Suporte	54
4.5	Placa de Aquisição de Dados	56
5.	Software de Comando e Interface Gráfica com o Utilizador	59
5.1	Diagrama de Estados	59
5.2	Construção da Interface Gráfica	63
6.	Verificação Experimental	71
6.1	Preparação do Ensaio e Resultados Obtidos	71
6.2	Análise Crítica dos Resultados	78
7.	Considerações Finais	83
7.1	Conclusões	83
7.2	Propostas de Trabalho Futuro	85
	Referências	87
	Anexos	89
	Anexo A: Desenho de Construção do Suporte Projetado para o Motor	89
	Anexo B: Resultados das Simulações Realizadas na Célula de Carga	93
	Anexo C: Esquemas Elétricos	97
	Anexo D: Excertos da <i>Datasheet</i> do Integrado PS 2502-4-A	111
	Anexo E: Quadro-resumo das Ligações à Placa de Aquisição de Dados – NI myDAQ	115

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Imagem da máquina <i>Hounsfield Tensometer</i> [1].	2
Figura 2.1 – Esquema de uma máquina de ensaios universal e respetivos constituintes, adaptado de [5].	8
Figura 2.2 – Imagem da máquina de testes mecânicos de acionamento eletromecânico, da <i>Instron</i> , Modelo 5969 do sistema de teste da série 5900 [6].	9
Figura 2.3 – Imagem da máquina de testes mecânicos de acionamento hidráulico da <i>Instron</i> , modelo 3500KPX do sistema de teste KN [7].	10
Figura 2.4 – Imagem da máquina <i>Electronic Tensometer</i> – Modelo TM-ER1 [8].	12
Figura 2.5 – Imagem da máquina <i>Electronic Tensometer</i> – Modelo TM-ER3 [8].	13
Figura 2.6 – Imagem da máquina <i>Electronic Tensometer</i> – Modelo PC-2000 [8].	14
Figura 3.1 – Imagem da máquina <i>Hounsfield Tensometer</i> , tipo W, disponível no DEMec....	18
Figura 3.2 – Imagem da máquina HT com destaque para o local onde se insere a barra.	19
Figura 3.3 – Imagem da caixa das várias barras disponíveis para a máquina HT.....	20
Figura 3.4 – Imagem da máquina HT destacando-se as garras onde se coloca o provete para o ensaio.	20
Figura 3.5 – Exemplo de provete a ser colocado nas garras disponíveis.	21
Figura 3.6 – Imagem da máquina HT mostrando o pormenor do tubo de mercúrio.....	21
Figura 3.7 – Componentes do projeto mecânico do <i>Hounsfield Tensometer</i> , tipo W [11].	22
Figura 3.8 – Imagem da unidade de atuação do HT.....	23
Figura 3.9 – Imagem do componente de registo automático da curva força vs. deslocamento do HT.....	23
Figura 3.10 – Imagem do pormenor do motor e das 3 polias à saída com respetiva notação.	24
Figura 3.11 – Imagem da primeira parte da cadeia de transmissão – polias e correias.....	26
Figura 3.12 – Esquema da primeira parte da cadeia de transmissão.....	26

Figura 3.13 – Imagem da máquina HT onde se realça o par cinemático constituído por parafuso sem fim e roda de coroa.	28
Figura 4.1 – Esquema de um provete submetido a uma solicitação de tração; em que: F é a carga aplicada [N], A_0 é a área inicial da secção do provete [m^2] e l_0 é o comprimento inicial de referência [m] [16].	32
Figura 4.2 – Exemplo de uma representação gráfica F vs. Δl	32
Figura 4.3 – Indicação do local onde se irá ligar o conjunto servomotor + redutor.	33
Figura 4.4 – Esquema de porção de um parafuso de potência quando solicitado por uma carga axial; em que: p é o passo [m], F é a força de compressão axial [N], λ é o ângulo de avanço [°] e ψ é o ângulo de hélice [°], adaptado de [13].	34
Figura 4.5 – Curva característica velocidade vs. binário do conjunto NX610AC-PS10-2 [17].	36
Figura 4.6 – Imagem da montagem do conjunto de atuação com o respetivo suporte.	38
Figura 4.7 – Montagem dos extensómetros na barra seleccionada (frente e verso).	40
Figura 4.8 – Montagem dos extensómetros 1, 2, 3 e 4 em ponte completa de <i>Wheatstone</i>	41
Figura 4.9 – Módulo de amplificação do sinal dos extensómetros da marca HBM, RM4220 [19].	41
Figura 4.10 – Resultados obtidos da tensão provocada na célula de carga, quando solicitada por uma carga de 200 kgf.	43
Figura 4.11 – Representação gráfica F vs. ΔV do resultado da caracterização da célula de carga.	44
Figura 4.12 – Imagem do local onde se situa o fim de curso.	49
Figura 4.13 – Imagem do circuito eletrónico montado para condicionamento de sinal.	50
Figura 4.14 – Imagem do circuito do filtro RC passa-baixo implementado.	50
Figura 4.15 – Imagem da porta do quadro elétrico onde se localizam as botoneiras, interruptores rotativos e sinalizadores, juntamente com a botoneira de emergência.	51
Figura 4.16 – Imagem do interior do quadro elétrico.	52

Figura 4.17 – Lógica elétrica de alimentação do <i>driver</i>	53
Figura 4.18 – Lógica elétrica de alimentação do servomotor.	54
Figura 4.19 – Projeto em <i>SolidWorks</i> da mesa proposta para a máquina HT automatizada.....	55
Figura 4.20 – Imagem do sistema completo desenvolvido.	55
Figura 4.21 – Placa de aquisição de dados, NI myDAQ, da <i>National Instruments</i>	56
Figura 4.22 – Representação do sistema completo desenvolvido, mostrando a interação entre os vários equipamentos.....	57
Figura 5.1 – Diagrama de estados do ensaio de tração a realizar na máquina, com a seguinte legenda:.....	62
Figura 5.2 – Página inicial da interface gráfica desenvolvida.....	64
Figura 5.3 – Página principal de teste da interface gráfica desenvolvida.	65
Figura 5.4 – Mensagem disponibilizada pelo botão ‘Ajuda’ na página de teste.....	66
Figura 5.5 – Mensagens relativas à etapa X4, de acordo com a respetiva transição.....	67
Figura 5.6 – Mensagem relativa à etapa X5.	67
Figura 5.7 – Página dos resultados da interface gráfica desenvolvida.	68
Figura 5.8 – Mensagem disponibilizada pelo botão ‘Ajuda’ na página de resultados.	69
Figura 6.1 – Imagem do Provete tipo 1 antes do ensaio.....	72
Figura 6.2 – Imagem do Provete tipo 2 antes do ensaio.....	72
Figura 6.3 – Imagem do Provete tipo 1 no final do ensaio.....	75
Figura 6.4 – Imagem do Provete tipo 2 no final do ensaio.....	75
Figura 6.5 – Curvas σ vs. ϵ resultantes dos ensaios feitos a três provetes do tipo 1 (Provete A – verde; Provete B – preto; Provete C – vermelho).....	79
Figura 6.6 – Curvas σ vs. ϵ resultantes dos ensaios feitos a três provetes do tipo 2 (Provete A’ – vermelho; Provete B’ – preto; Provete C’ – castanho).....	79
Figura 6.7 – Curvas σ vs. ϵ sobrepostas referentes ao Ensaio 1 dos Provetes A e B testados no HT e do Provete B testado na Instron 4507.....	80

Figura 6.8 – Curvas σ vs. ϵ sobrepostas referentes ao Ensaio 2 dos Provetes A' e C' testados no HT e do Provete B' testado na Instron 4507..... 81

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Especificações técnicas do Modelo TM-ER1 [8].	12
Tabela 2.2 – Especificações técnicas do Modelo TM-ER3 [8].	13
Tabela 2.3 – Especificações técnicas do Modelo PC-2000 [8].	15
Tabela 3.1 – Medições feitas para determinação das velocidades de ensaio.	25
Tabela 3.2 – Quadro-resumo das velocidades de ensaio obtidas.	25
Tabela 3.3 – Diâmetros (ϕ) das polias da primeira parte da cadeia de transmissão.	27
Tabela 3.4 – Quadro-resumo das relações de transmissão calculadas.	27
Tabela 3.5 – Quadro-resumo dos parâmetros usados para o cálculo da razão de transmissão do par cinemático (parafuso sem fim – roda de coroa).	29
Tabela 4.1 – Coeficientes de fricção para pares roscados, adaptado de [13].	35
Tabela 5.1 – Quadro-resumo das entradas e saídas analógicas e digitais do computador.	61
Tabela 6.1 – Dimensões dos provetes tipo 1 e 2 ensaiados.	72
Tabela 6.2 – Curvas F vs. Δl obtidas para os três provetes testados no Ensaio 1.	73
Tabela 6.3 – Curvas F vs. Δl obtidas para os três provetes testados no Ensaio 2.	74
Tabela 6.4 – Curvas σ vs. ε obtidas para os três provetes testados no Ensaio 1.	76
Tabela 6.5 – Curvas σ vs. ε obtidas para os três provetes testados no Ensaio 2.	77
Tabela 6.6 – Quadro-resumo dos valores calculados do módulo de elasticidade (E) e da tensão de rotura (σ_r) de cada provete nos Ensaio 1 e 2, realizados no HT.	78
Tabela 6.7 – Quadro-resumo dos valores calculados do módulo de elasticidade (E) e da tensão de rotura (σ_r) de cada provete nos Ensaio 1 e 2, realizados na Instron 4507.	80
Tabela B.1 – Resultados das simulações realizadas na célula de carga, quando imposta uma carga de 100 kgf.	93
Tabela B.2 – Restantes resultados das simulações realizadas na célula de carga, quando imposta uma carga de 200 kgf.	94
Tabela B.3 – Resultados das simulações realizadas na célula de carga, quando imposta uma carga de 300 kgf.	95

1. Introdução

O capítulo inicial desta dissertação tem como propósito apresentar o tema do trabalho desenvolvido nas suas linhas gerais – Automatização de uma máquina de ensaios do tipo *Hounsfield Tensometer* (HT) – revelando o seu enquadramento, bem como os objetivos específicos que se pretendem alcançar. Apresenta-se também um pouco da história e do aparecimento da máquina HT. Este capítulo termina com uma breve exposição sobre a estrutura da dissertação e dos assuntos que serão abordados nos capítulos seguintes.

1.1 Enquadramento do Projeto

A presença da automação nas várias indústrias tem-se revelado, nos últimos anos, essencial para fazer face a todas as necessidades do seu processo produtivo. Com a evolução das tecnologias e conseqüente aparecimento de soluções mais sofisticadas, torna-se possível melhorar a produtividade, reduzindo tanto os custos como os tempos de operação. Assim, é nesta perspectiva que surge a aquisição de máquinas devidamente equipadas com tecnologia moderna, cada vez mais autónomas e capazes de realizar variadas tarefas com performances inteiramente fiáveis. Em laboratórios de investigação opta-se, em alguns casos, pela requalificação de máquinas antigas já existentes ao invés da aquisição de equipamento novo. O processo de requalificação tecnológica preserva normalmente o projeto mecânico já existente da máquina e acrescenta todos os componentes de automação, controlo e medição adequados aos requisitos das respetivas aplicações de cada máquina, revelando-se menos dispendioso quando comparado com a obtenção de um equipamento totalmente novo com a mesma aplicação.

A vontade de promover uma utilização didática e académica mais regular de uma máquina de ensaios mecânicos a materiais, designada por *Hounsfield Tensometer*, que se encontra fora de uso no Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) da Faculdade de

Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) remete para a sua inevitável requalificação tecnológica. Neste caso concreto, é do interesse conservar todo o sistema mecânico uma vez que este se encontra em bom estado e sem desgaste aparente. Desta forma, a requalificação tecnológica incidirá sobretudo na substituição de todo o sistema de controlo manual por outro totalmente automático, e por todas as alterações necessárias à sua implementação.

1.2 *Hounsfield Tensometer*

O *Hounsfield Tensometer* (HT) desenvolvido por Leslie Hounsfield, em 1931, é uma máquina horizontal de ensaios de tração e de compressão de materiais e foi especificamente projetado para testar e medir as propriedades mecânicas de uma série de materiais, nomeadamente metais, ligas metálicas e molas, que faziam parte dos componentes de um protótipo automóvel (*Trojan*) que por essa altura estava a ser construído pela empresa Hounsfield [1]. O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais permitia garantir a qualidade dos componentes usados na construção do protótipo automóvel, assegurando a sua fiabilidade. Na Figura 1.1 apresenta-se uma imagem do *Hounsfield Tensometer* numa das suas primeiras versões.



Figura 1.1 – Imagem da máquina *Hounsfield Tensometer* [1].

Naquela época só se encontravam disponíveis máquinas de ensaio de grande tamanho e com capacidades de carga elevadas, e por isso desadequadas para testes de pequenas amostras. Aliado a estes fatores, o seu custo era também elevado, o que motivou ainda a criação duma nova máquina de uso simples que, dado o seu reduzido tamanho podia ser colocada em

bancadas de laboratório junto do desenvolvimento da investigação. A criação de uma máquina de ensaios mais pequena permitia também o seu fácil transporte fazendo desta uma máquina portátil. Todos estes aspetos fizeram com que o aparecimento da máquina HT revolucionasse toda a indústria daquele tempo [2].

Como se trata de uma máquina para ensaios de pequenos provetes, a sua capacidade de carga máxima foi estabelecida em 20 kN (≈ 2000 kgf). A criação desta máquina deu igualmente a possibilidade de testar pequenas amostras que provinham de componentes fraturados permitindo obter informação relevante sobre possíveis causas das respetivas fraturas. Como resultados dos ensaios, o *Hounsfield Tensometer* foi pensado para fornecer diretamente a representação gráfica força (F) vs. deslocamento (Δl) que, após transformada na representação tensão (σ) vs. deformação (ε) possibilitaria o cálculo de algumas propriedades mecânicas de interesse, nomeadamente, o módulo de elasticidade (E), a tensão limite de elasticidade ($\sigma_{0,2}$), a tensão de rotura (σ_r), a extensão após rotura (ε_r) e o coeficiente de estrição (ϕ). Os testes elaborados nas mesmas condições, usando o *Hounsfield Tensometer* e uma máquina de ensaios convencional da época, revelaram resultados em tudo idênticos (erro de $\pm 2\%$), dando assim credibilidade à máquina HT [2].

A descrição e o funcionamento mais pormenorizado da máquina HT será feito no capítulo 3 desta dissertação.

1.3 Objetivos do Projeto

A presente dissertação tem como objetivo principal a automatização de uma máquina do tipo *Hounsfield Tensometer* existente no DEMec, promovendo o uso mais regular desta máquina de ensaios mecânicos de materiais não só num contexto de investigação, mas também num contexto didático. Desta forma, pretende-se substituir todo o atual sistema de controlo manual por um sistema de controlo totalmente automático, projetando e desenvolvendo igualmente um sistema para monitorização dos ensaios a realizar. Para tal, é necessário fazer-se um estudo dos vários componentes de controlo e medição necessários e posteriormente conjugá-los de forma a que tudo trabalhe em sintonia. Definidos todos os componentes e para facilitar o uso da máquina por qualquer utilizador, incluindo estudantes, deverá ser desenvolvida uma interface gráfica amigável e capaz de comunicar com todo o sistema, em tempo real. Uma vez que a máquina será maioritariamente usada por estudantes em situação de

aula, na interface gráfica, para além do espaço para se definirem os parâmetros de ensaio e visualização da representação gráfica F vs. Δl , haverá também uma secção para visualização da representação gráfica σ vs. ε . De realçar ainda que a lógica de comando deve prever várias situações possíveis que podem acontecer durante um ensaio, não esquecendo as questões de segurança. Por fim e já com a solução implementada pretende-se testá-la, e assim, validar todo o trabalho desenvolvido.

1.4 Estrutura da Dissertação

Tendo em conta os vários objetivos referidos anteriormente e desejando explicitar com o pormenor exigido todo o trabalho concretizado de forma a facilitar a sua compreensão, a presente dissertação foi dividida em 7 capítulos.

No capítulo 1 – Introdução – faz-se uma introdução ao tema da presente dissertação, apresentando o seu enquadramento e motivação, bem como os objetivos que se propõe alcançar com o seu desenvolvimento. É ainda descrito um pouco da história do surgimento da máquina HT.

No capítulo 2 – Máquinas de Ensaio Mecânicos de Materiais – apresenta-se a pesquisa bibliográfica elaborada sobre máquinas atuais de ensaios mecânicos a materiais, explicitando-se alguns dos modelos existentes, dando especial ênfase aos modelos automáticos já comercializados análogos da máquina em estudo.

No capítulo 3 – Estudo Prévio do *Hounsfield Tensometer* – descreve-se o estudo previamente elaborado da máquina HT. Este capítulo revela-se crucial pois é a partir dele que vão ser definidas todas as alterações a efetuar ao sistema existente.

O capítulo 4 – Descrição dos Componentes Principais de Atuação e Instrumentação – remete para a descrição pormenorizada de todos os componentes escolhidos ou desenvolvidos de forma a implementar o novo sistema automático de monitorização e controlo da máquina.

No capítulo 5 – *Software* de Comando e Interface Gráfica com o Utilizador – expõe-se a lógica de comando desenvolvida, bem como a interface gráfica que permitirá ao utilizador interagir e fazer uso do sistema concebido.

Com o sistema completamente implementado, no capítulo 6 – Verificação Experimental – faz-se o teste de todo o trabalho desenvolvido.

Por fim, no capítulo 7 – Considerações Finais – apresentam-se as conclusões a retirar da elaboração da presente dissertação com referência ainda a possíveis trabalhos a desenvolver futuramente.

2. Máquinas de Ensaio Mecânicos de Materiais

Neste capítulo apresenta-se a pesquisa bibliográfica elaborada sobre os vários tipos de máquinas para ensaios mecânicos de materiais. Vai dar-se também ênfase às máquinas comerciais automatizadas já existentes e análogas da máquina em estudo, que servirão de base ao trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação.

O conhecimento das propriedades mecânicas de qualquer tipo de materiais revela-se de extrema importância no projeto de qualquer equipamento [3]. Desta forma, a escolha do material para um determinado componente ou projeto requer informação relativa ao seu comportamento mecânico, ou seja, informação relativa à relação entre a deformação e a resposta do próprio material quando lhe é aplicada uma carga. A aplicação da carga deve estar de acordo com as condições de serviço para o qual o material está a ser selecionado.

Uma forma possível de determinar as propriedades mecânicas de interesse é a realização de vários ensaios, projetados de forma cuidada e que sejam capazes de reproduzir o mais fiel possível as condições de serviço. No que diz respeito às condições de serviço, deve-se ter em conta a natureza da carga aplicada (tração, compressão ou corte, constante ou variável ao longo do tempo), a duração da sua aplicação (desde poucos segundos até alguns meses) e também as condições ambientais, nomeadamente a temperatura de serviço [3].

Consequentemente, de forma a uniformizar os vários ensaios e a interpretação dos respetivos resultados existem normas que devem ser seguidas. As normas devem então ser consultadas e os ensaios devem estar em conformidade com o descrito.

Nas secções seguintes vai descrever-se alguns tipos de máquinas de realização de ensaios mecânicos já existentes.

2.1 Máquinas de Ensaio Universais

Tradicionalmente, as máquinas mais comuns para ensaios de materiais designam-se por máquinas de ensaio universais, por serem capazes de realizar diferentes tipos de ensaios, entre eles os ensaios de tração, compressão e flexão [4].

Dos componentes que fazem parte destas máquinas destacam-se: a mesa móvel ou travessão móvel, os dispositivos de fixação dos provetes, os fusos, as colunas de sustentação e a base, como se ilustra na Figura 2.1.

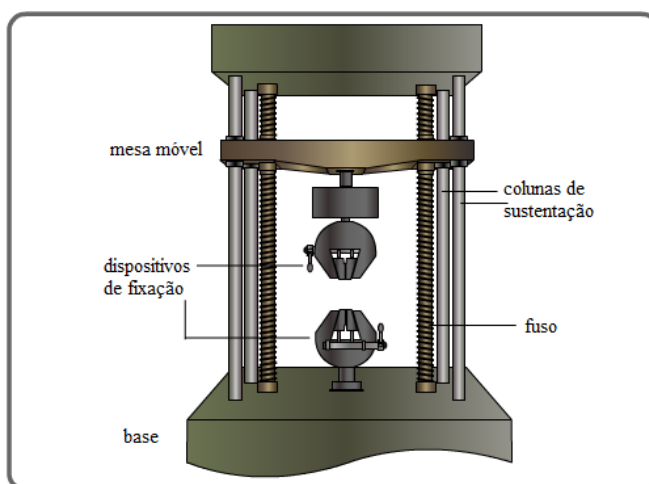


Figura 2.1 – Esquema de uma máquina de ensaios universal e respetivos constituintes, adaptado de [5].

Ao longo do ensaio e com vista à determinação das propriedades mecânicas dos materiais, torna-se necessário fazer a medição da força que está a ser aplicada ao provete e também da deformação que este sofre durante a aplicação da carga. Nas máquinas mais recentes, a medição da força é feita com recurso a uma célula de carga colocada em série com o provete, e a medição da deformação é feita recorrendo a extensómetros de resistência ou indutivos montados diretamente no próprio provete [4]. Estas medições permitem posteriormente construir o gráfico da tensão (σ) vs. deformação (ϵ), e conseqüentemente calcular as propriedades mecânicas de interesse, como por exemplo: módulo de elasticidade (E), tensão limite de elasticidade ($\sigma_{0,2}$), tensão de rotura (σ_r), extensão após rotura (ϵ_r), coeficiente de estrição (φ) e coeficiente de Poisson (ν) [4].

Tendo em conta o tipo de acionamento da mesa móvel, que pode ser eletromecânico ou hidráulico, têm-se máquinas de ensaio equipadas com sistemas eletromecânicos e máquinas de

ensaio equipadas com sistemas hidráulicos, respetivamente. Assim, o que diferencia estes dois tipos de máquinas é a forma como a carga é aplicada.

As máquinas que dispõem de acionamento eletromecânico são maioritariamente usadas para testes estáticos de tração ou compressão numa única estrutura, podendo também realizar testes de corte, curvatura e flexão [6]. O seu funcionamento baseia-se na existência de um motor elétrico com velocidade variável, sistemas de redução com engrenagens e um ou mais parafusos que provocam o movimento do cabeçote na direção vertical. Recorre-se normalmente a um servo sistema para o controlo preciso das velocidades do cabeçote [4]. Em comparação com as máquinas de acionamento hidráulico, as máquina de acionamento eletromecânico permitem uma maior gama de velocidades e maiores deslocamentos do cabeçote. A capacidade destas máquinas varia desde 0,5 kN até 600 kN. A título de exemplo mostra-se na Figura 2.2 uma imagem do modelo disponível da *Instron* da série 5900, mais especificamente o modelo 5969 com capacidade máxima de carga de 50 kN. Este modelo apresenta frequências de aquisição de dados para o PC até 2,5 kHz com uma precisão na leitura da medição da posição de $\pm 0,01$ mm [5]. A precisão na leitura da medição da força está dependente da capacidade da célula de carga escolhida, e como tal, por exemplo, consegue obter-se uma precisão de $\pm 0,4\%$ em leituras até 1/100 da capacidade da célula de carga. De referir, que este modelo dispõe também de uma gama alargada de velocidades para ensaio que vai desde 0,001 mm/min até 600 mm/min. Por último, resta salientar que o curso máximo disponível é de 1212 mm.



Figura 2.2 – Imagem da máquina de testes mecânicos de acionamento eletromecânico, da *Instron*, Modelo 5969 do sistema de teste da série 5900 [6].

As máquinas que dispõem de acionamento hidráulico são usadas para testes de tração, compressão, corte e curvatura e são máquinas de alta capacidade, uma vez que usam um sistema hidráulico para proporcionar as forças necessárias aos referidos testes [6]. O seu funcionamento é baseado no movimento de um atuador hidráulico (cilindro de simples e/ou duplo efeito) que permite acionar o cabeçote móvel num movimento vertical. Em comparação com as máquinas de acionamento eletromecânico, as máquinas de acionamento hidráulico permitem gerar maiores forças de carregamento [4]. Assim, a sua capacidade varia desde 150 kN até 600 kN (sistemas de teste DX e LX da *Instron*) ou de 300 kN até 3500 kN (sistemas de teste KN da *Instron*). Mais uma vez, a título de exemplo, na Figura 2.3 apresenta-se uma imagem do modelo 3500KPX do sistema de teste KN da *Instron*, que apresenta uma capacidade de carga de 3500 kN. Este modelo apresenta frequências de aquisição de dados através do *software* de 1 kHz com uma precisão na leitura da medição da posição de $< \pm 0,13$ mm [7]. No que diz respeito à precisão na leitura da medição da força, consegue obter-se uma precisão de $\pm 0,5\%$ em leituras até 1/100 da capacidade da célula de carga. De referir ainda que este modelo apresenta uma velocidade máxima de ensaio permitida de 102 mm/min. Por último resta salientar que o curso máximo disponível, que corresponde à distância medida entre as garras, pode ir até aos 1086 mm.



Figura 2.3 – Imagem da máquina de testes mecânicos de acionamento hidráulico da *Instron*, modelo 3500KPX do sistema de teste KN [7].

2.2 *Electronic Tensometer*

Atualmente já se encontram comercializados pelo menos três exemplos de modelos do *Hounsfield Tensometer* na sua versão eletrônica e automática: o Modelo TM-ER1, o Modelo TM-ER3 e o Modelo PC-2000, que serão descritos seguidamente [8]. Estes modelos foram desenvolvidos tendo como base o projeto mecânico existente no *Hounsfield Tensometer*, o qual foi posteriormente adaptado à introdução de instrumentação necessária para fazer o controlo automático do ensaio. Tal como o *Hounsfield Tensometer*, o *Electronic Tensometer* é uma máquina horizontal de ensaios mecânicos para operar em bancas de trabalho de laboratórios de investigação com capacidade máxima de carga de 20 kN. Está equipado com os acessórios adequados para ser adaptável aos ensaios de tração, compressão, corte ou flexão. Neste tipo de máquina podem ser testados diversos materiais tais como metais ou ligas metálicas, polímeros, cerâmicos, entre outros, dependendo do tipo de garras disponíveis [9, 10].

2.2.1 Modelo TM-ER1

Dos três modelos destacados, este foi o primeiro a surgir, e como tal é o menos desenvolvido relativamente ao grau de automação. É equipado com células de carga para medição da força, tendo à disposição três diferentes capacidades de carga (0,2 kN, 2 kN e 20 kN). A medição do deslocamento é feita através de um *encoder* ótico para medições de 0 a 500 mm. Os valores medidos pela instrumentação referida são mostrados ponto a ponto por um sistema de aquisição de dados digital. Neste modelo o uso de motor é opcional, sendo apenas utilizado nos casos em que é importante haver velocidades de ensaio constantes. Caso contrário, o ensaio é feito manualmente pelo próprio utilizador [8]. Na Figura 2.4 apresenta-se um exemplo do modelo TM-ER1 e na Tabela 2.1 destacam-se algumas características técnicas deste equipamento.



Figura 2.4 – Imagem da máquina *Electronic Tensometer* – Modelo TM-ER1 [8].

Tabela 2.1 – Especificações técnicas do Modelo TM-ER1 [8].

Descrição	Modelo TM-ER1
Capacidade da Estrutura Mecânica	20 kN máx. (\approx 2000 kgf);
Unidade de Atuação	Motor opcional: Motor AC, monofásico, 230 V, P = $\frac{3}{4}$ hp; n = 1440 rpm;
Medição da Força	Células de Carga permutáveis (0,2 kN, 2 kN e 20 kN);
Medição do Deslocamento	Encoder ótico, 0-500 mm; Resolução = 0,1 mm;
Gráfico do Teste	Não disponível;
Recurso a Interface em Computador	Não disponível.

2.2.2 Modelo TM-ER3

O Modelo TM-ER3 é uma versão melhorada e atualizada do modelo descrito anteriormente (Modelo TM-ER1). Está equipado com microcontroladores responsáveis por todo o controlo e dispõe também de uma unidade digital que monitoriza e mostra os valores medidos ao longo do teste. A medição da força é também feita com recurso a células de carga com diferentes capacidades de carga (0,2 kN, 2 kN e 20kN) de acordo com as necessidades do provete em teste. A medição do deslocamento é conseguida recorrendo a um *encoder* ótico para medições compreendidas entre 0 e 500 mm. O relatório de ensaio pode ser impresso diretamente

da impressora que faz parte deste modelo, não sendo necessário ligar a um computador; no entanto, é possível descarregar a informação do teste para um computador. Além do gráfico F vs. Δl , o relatório do teste indica igualmente os valores da força máxima registada e do deslocamento máximo. A informação referente ao teste, nomeadamente o nome, data e referência da amostra, pode ser inserida na unidade digital, e desta forma, o relatório de teste ao ser impresso apresenta esse conteúdo facilitando a identificação do provete e do ensaio realizado [8]. Na Figura 2.5 apresenta-se um exemplo do modelo TM-ER3 e na Tabela 2.2 destacam-se algumas características técnicas deste equipamento.

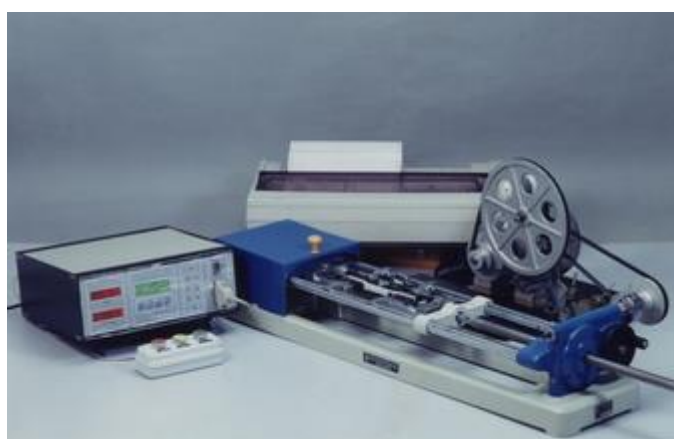


Figura 2.5 – Imagem da máquina *Electronic Tensometer* – Modelo TM-ER3 [8].

Tabela 2.2 – Especificações técnicas do Modelo TM-ER3 [8].

Descrição	Modelo TM-ER3
Capacidade da Estrutura Mecânica	20 kN máx. (\approx 2000 kgf);
Unidade de Atuação	Motor opcional: Motor AC, monofásico, 230 V, P = $\frac{3}{4}$ hp; n = 1440 rpm;
Medição da Força	Células de Carga permutáveis (0,2 kN, 2 kN e 20 kN);
Medição do Deslocamento	Encoder ótico, 0-500 mm; Resolução = 0,1 mm;
Gráfico do Teste	Gráfico <i>offline</i> através de: - impressora conectada à unidade digital; - computador com recurso a acessórios opcionais (DTU e <i>software</i>);
Recurso a Interface em Computador	Possibilidade de operar com ou sem computador.

2.2.3 Modelo PC-2000

O Modelo PC-2000, terceiro e último desta série, é o mais desenvolvido, e por isso considerado o topo das máquinas *Electronic Tensometer* comerciais. Esta versão combina toda a tecnologia mais recente de computadores com técnicas de precisão de produção, originando uma máquina horizontal de ensaios mecânicos única. O uso de uma unidade de atuação com um motor e o uso de um computador são essenciais para este modelo, garantindo assim ensaios a velocidades constantes e o acompanhamento, em tempo real, da performance do material durante o ensaio com o aparecimento da representação gráfica F vs. Δl mostrada no computador. O recurso a *software* adequado permite fazer face às crescentes exigências nos testes mecânicos a materiais em controlo de qualidade. A medição da força é novamente feita com recurso a células de carga de diferentes capacidades, estando disponíveis as seguintes capacidades: 0,2 kN, 2 kN, 5 kN, 10 kN e 20 kN. A medição do deslocamento é feita recorrendo a um *encoder* angular ótico com gama de medição no intervalo 0-500 mm, proporcionando uma medição precisa do deslocamento [8]. Na Figura 2.6 apresenta-se um exemplo do modelo PC-2000 e na Tabela 2.3 destacam-se algumas características técnicas deste equipamento.



Figura 2.6 – Imagem da máquina *Electronic Tensometer* – Modelo PC-2000 [8].

Tabela 2.3 – Especificações técnicas do Modelo PC-2000 [8].

Descrição	Modelo PC-2000
Capacidade da Estrutura Mecânica	20 kN máx. (\approx 2000 kgf);
Unidade de Atuação	Motor essencial: Servomotor DC de ímanes permanentes; 3,6 V, 4,8 A, P = 0,16 kW, n = 1600 rpm;
Medição da Força	Células de Carga permutáveis (0,2 kN, 2 kN, 5 kN, 10 kN e 20 kN);
Medição do Deslocamento	<i>Encoder</i> angular ótico, 0-500 mm; Resolução = 0,1 mm;
Gráfico do Teste	Gráfico <i>online</i> através do PC por <i>software</i> ou qualquer impressora;
Recurso a Interface em Computador	Todo o controlo feito por computador.

3. Estudo Prévio do *Hounsfield Tensometer*

No presente capítulo descreve-se o estudo inicial do HT com o objetivo de conhecer e caracterizar a sua forma de funcionamento. Esta é uma fase crucial, pois é a partir dela que se irão definir as especificações que se pretendem dar à máquina na sua versão automatizada. Assim, descreve-se o modo de funcionamento da máquina, incluindo-se a posterior determinação das velocidades de ensaio e caracterização da cadeia de transmissão existente. O capítulo termina com a apresentação das propostas de alteração da máquina com vista à sua requalificação tecnológica.

3.1 Apresentação da Máquina e Descrição do Funcionamento

Antes de se iniciar o processo de automatização da máquina, é importante ter conhecimento do seu funcionamento e dos elementos mecânicos que a constituem, para posteriormente adaptá-los, se necessário, às modificações impostas pela própria requalificação tecnológica.

Na Figura 3.1 apresenta-se uma imagem do *Hounsfield Tensometer* – Tipo W (*Serial No: 7522*) disponível no DEMec.

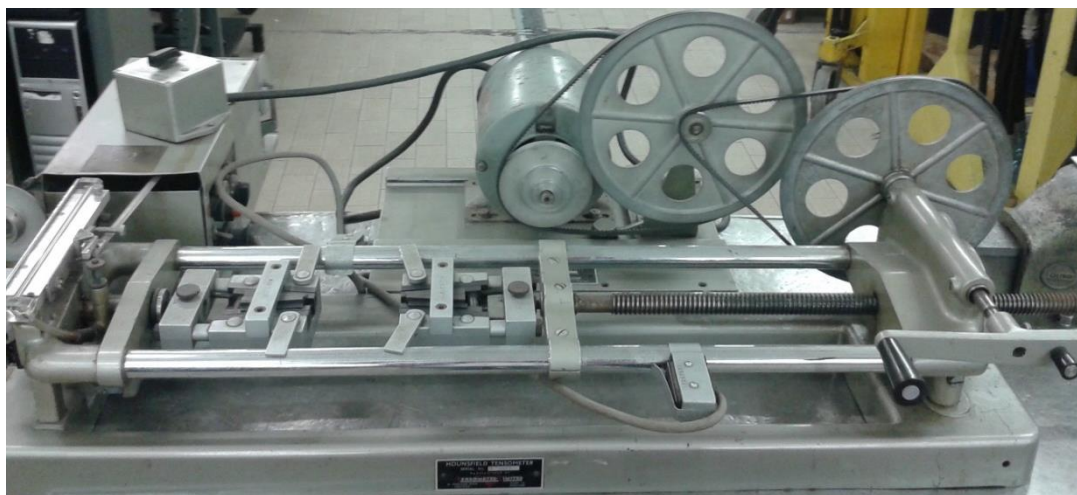


Figura 3.1 – Imagem da máquina *Hounsfield Tensometer*, tipo W, disponível no DEMec.

O HT é uma máquina compacta, versátil, com dimensões globais de aproximadamente 965 mm (comprimento) \times 235 mm (largura) \times 230 mm (altura), precisa e de baixo custo, com um bom compromisso qualidade/preço. Apesar de dispor de uma unidade de atuação com motor elétrico, é também possível que esta seja atuada manualmente.

Este tipo de HT tem uma grande versatilidade em termos de testes mecânicos que pode realizar, nomeadamente, ensaios de tração, de compressão, de dureza Brinell, entre outros [11]. Como todos estes ensaios têm funcionamentos e exigências diferentes, a versatilidade referida é conseguida com recurso aos inúmeros acessórios que se encontram disponíveis para este modelo, conseguindo-se desta forma ir ao encontro de todos os requisitos dos diferentes ensaios e contribuir tanto para estudos de investigação, como para o desenvolvimento e controlo de qualidade na indústria.

Os ensaios mecânicos a materiais são usados na investigação como meio de quantificar propriedades mecânicas com vista à comparação e seleção de materiais para os mais diversos projetos; na indústria são maioritariamente usados para controlo de qualidade [4]. No caso do presente trabalho pretende-se dar um uso exclusivamente académico com um objetivo didático, de modo a poder proporcionar aos alunos a possibilidade de interagir diretamente com a máquina. Além da versatilidade demonstrada nos tipos de teste que permite realizar, esta máquina permite também a realização de testes a uma grande variedade de materiais, tais como metais, plásticos, cerâmicos e até madeira, cimento ou tecido. No entanto, este facto só é possível desde que se disponham de garras adaptadas ao tipo de material e à forma do seu provete.

O princípio de funcionamento da máquina é bastante simples: um conjunto de barras a trabalhar como molas (*spring beams*) são usadas para dar o *feedback* de força a partir da sua deformação, que naturalmente será proporcional à carga aplicada. As barras são solicitadas à flexão e encontram-se fixas nas suas extremidades, enquanto que a carga é aplicada no seu eixo, como se pode ver na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Imagem da máquina HT com destaque para o local onde se insere a barra.

As barras são disponibilizadas com diferentes capacidades de carga, para um intervalo de 300 N a 20 kN, em que o valor de 20 kN corresponde à capacidade máxima de carga da própria máquina. De notar, que em alguns casos a capacidade da máquina pode ser limitada pelos próprios acessórios de cada tipo de ensaio. A escolha adequada da barra deve ter em conta a força máxima que se espera ter, de forma a não solicitar uma barra com força superior à respetiva capacidade. A mudança de barra é simples e rápida, pelo que pode ser facilmente feita pelo próprio utilizador da máquina. Na Figura 3.3 mostra-se uma imagem da caixa acessório onde se apresentam os diferentes tipos de barras; todas são semelhantes, com a exceção da sua espessura, que é maior ou menor em função da sua capacidade de carga.



Figura 3.3 – Imagem da caixa das várias barras disponíveis para a máquina HT.

Aquando da utilização da máquina, o provete deve ser colocado entre umas garras que variam de acordo com a forma e o material do provete. Na Figura 3.4 pode ver-se um exemplo das garras existentes na máquina e na Figura 3.5 representa-se a forma dos provetes adequados a estas garras. Para efeitos deste trabalho vão ser apenas consideradas estas garras como acessórios disponíveis, e por isso os ensaios a realizar na máquina ficam limitados aos ensaios de tração de materiais poliméricos.

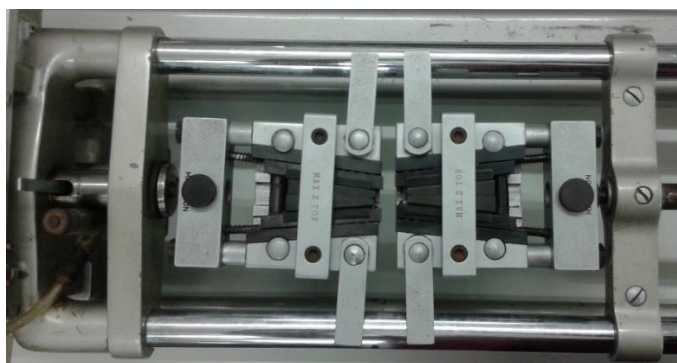


Figura 3.4 – Imagem da máquina HT destacando-se as garras onde se coloca o provete para o ensaio.

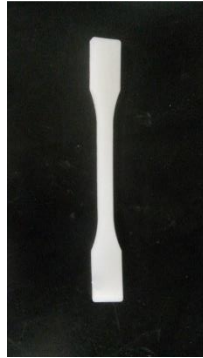
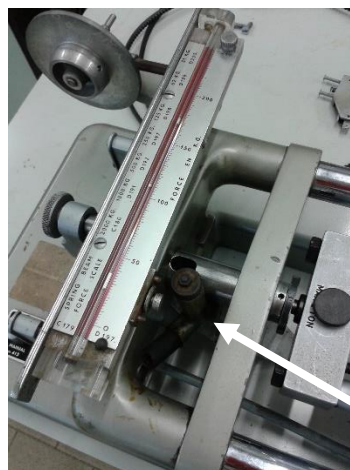


Figura 3.5 – Exemplo de provete a ser colocado nas garras disponíveis.

Durante o decorrer do ensaio é exercida uma força axial que provoca a extensão do provete em teste. Esta força produz uma deformação na barra, que por sua vez ativa uma alavanca que impulsiona um pistão de um cilindro que contém mercúrio. Com a força imposta, o mercúrio desloca-se ao longo de um tubo de vidro possibilitando a leitura do valor da força exercida em cada momento através de uma escala; realça-se que existe uma escala calibrada para cada barra. A existência deste cilindro e todos os componentes mecânicos de ligação ampliam a deformação da barra em cerca de 160 vezes [11]. Para garantir a fiabilidade da medição da força através do mercúrio, o diâmetro interno do tubo onde este se encontra está calibrado com um elevado grau de precisão e é feito recorrendo a equipamento especial. Na Figura 3.6 apresenta-se uma imagem da máquina HT mostrando o pormenor do tubo de mercúrio existente juntamente com o cilindro que o armazena, bem como todo o sistema que é responsável pelo seu impulso.



Cilindro que armazena o mercúrio seguido do sistema responsável pelo seu impulso

Figura 3.6 – Imagem da máquina HT mostrando o pormenor do tubo de mercúrio.

O registo gráfico do ensaio é feito através da colocação de papel milimétrico num tambor cilíndrico cuja velocidade de rotação está relacionada com a velocidade do ensaio e com a seleção da razão de transmissão que dispõe, pelo que o deslocamento pode ser ampliado segundo as razões de 16:1, 8:1 ou 4:1. Com o desenrolar do ensaio, a coluna de mercúrio vai subindo com o aumento da força imposta ao provete e o seu desenvolvimento pode ser registado através de um cursor manual, que na sua extremidade apresenta uma agulha, que irá furar o papel do gráfico, marcando os pontos que no seu conjunto irão dar origem à representação gráfica da força (F) vs. deslocamento (Δl); note-se que este processo é inteiramente manual. Na Figura 3.7 mostra-se um esquema da máquina dando relevância aos componentes do seu projeto mecânico.

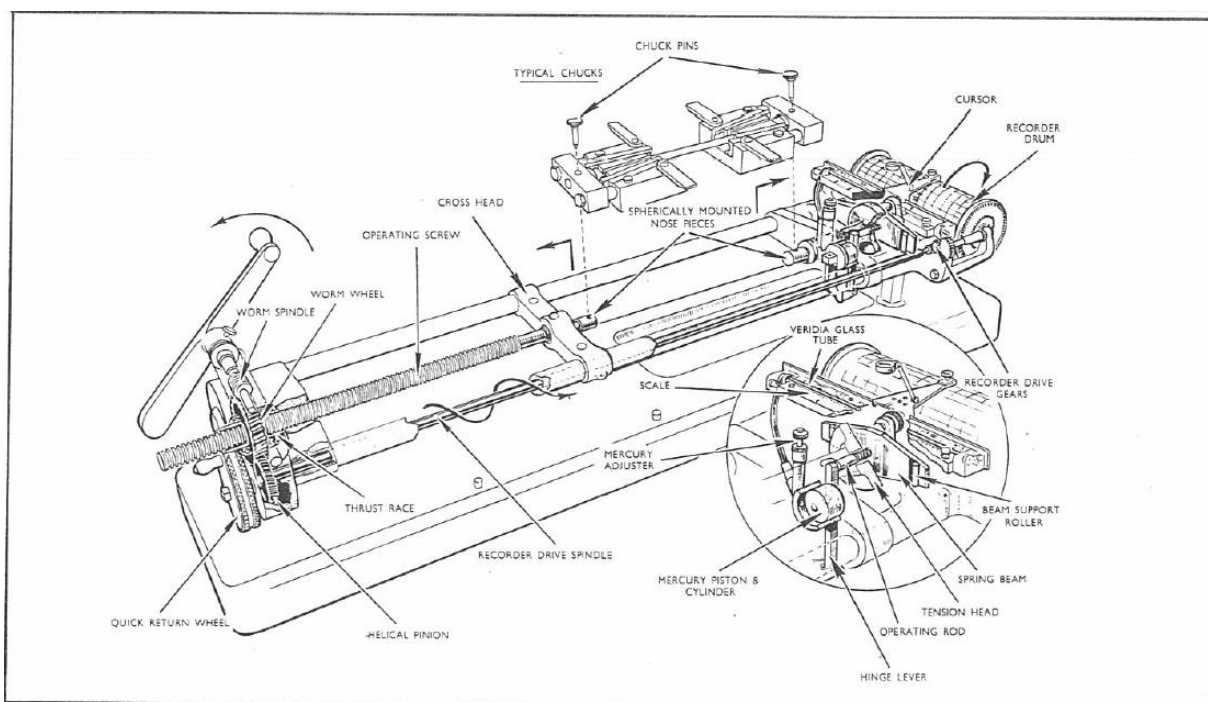


Figura 3.7 – Componentes do projeto mecânico do *Hounsfield Tensometer*, tipo W [11].

A máquina que se encontra no DEMec disponibiliza ainda dois componentes extra. O primeiro é a unidade de atuação, constituída por um motor elétrico monofásico, AC de indução com uma potência de ¼ hp (186,5 W) e velocidade nominal de 1425 rpm e pela cadeia de transmissão necessária para fazer a ligação do motor à própria máquina. Esta unidade é essencial para vários tipos de testes, nomeadamente, quando a velocidade de ensaio seja um requisito bem definido, para ensaios em que a velocidade destes deva ser constante ou para velocidades de ensaio mais elevadas não passíveis de serem atingidas manualmente. À saída do

motor existem três polias permitindo assim a realização do ensaio a três velocidades diferentes e bem definidas.

Nas próximas secções (3.2 e 3.3) descrevem-se com mais pormenor toda a cadeia de transmissão, bem como os valores das velocidades de ensaio disponibilizadas por este mecanismo. Na Figura 3.8 mostra-se uma imagem da unidade de atuação que acompanha a máquina; fazem também parte desta unidade de atuação, dois fim de curso eletromecânicos de forma a sinalizar e evitar qualquer funcionamento anormal além do curso disponibilizado pelo parafuso de avanço.



Figura 3.8 – Imagem da unidade de atuação do HT.

O segundo componente extra existente na máquina é um registador automático para a obtenção do gráfico força vs. deslocamento, Figura 3.9. A extremidade contrária ao tambor cilíndrico é ligada ao tubo de mercúrio. O registador automático revela-se importante em situações em que as velocidades de ensaio são elevadas ou quando os valores da força variam rapidamente.



Tambor
cilíndrico

Figura 3.9 – Imagem do componente de registo automático da curva força vs. deslocamento do HT.

3.2 Determinação das Velocidades de Ensaio

Dada a falta de informação disponível sobre a máquina HT, foi necessário encontrar um método experimental para se determinarem as velocidades de ensaio disponibilizadas pelo conjunto de atuação. Tal como referido anteriormente, à saída do motor existem 3 polias, pelo que a cada uma delas corresponde um valor de velocidade bem definida. Com este mecanismo apenas é possível obterem-se valores discretos de velocidades de ensaio. Assim, o objetivo da experiência a efetuar não será determinar as velocidades com precisão, mas apenas obter uma ordem da sua grandeza. Com o conhecimento destes valores será possível definir posteriormente o intervalo de velocidades de ensaio que se pretende disponibilizar na máquina requalificada. Na Figura 3.10 mostra-se uma imagem onde se destaca o pormenor do motor e das 3 polias à saída com a respetiva notação que será usada ao longo da presente dissertação. A 1ª velocidade é definida quando se coloca a correia na polia de maior diâmetro, a 2ª velocidade quando se coloca a correia na polia do meio e a 3ª velocidade quando se coloca a correia na polia de menor diâmetro.

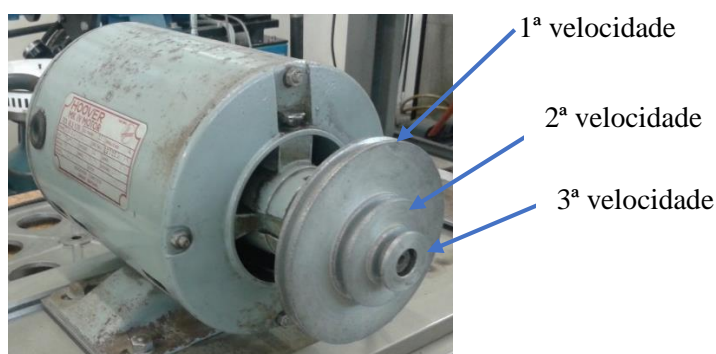


Figura 3.10 – Imagem do pormenor do motor e das 3 polias à saída com respetiva notação.

Para a determinação das velocidades, dispuseram-se as garras juntas uma à outra, ligou-se o motor e esperou-se um período de tempo, que se achou conveniente, até que a distância entre as garras fosse suficiente para se proceder a uma correta medição da distância entre elas. Desta forma, foram medidas as distâncias finais entre as duas garras (de notar que apenas uma garra se desloca, sendo a outra fixa) ao fim de 6 minutos para as designadas 1ª e 2ª velocidades e ao fim de 12 minutos para a 3ª velocidade. Na Tabela 3.1 apresentam-se os valores das medições da distância feitas para determinação das velocidades de ensaio. Para cada velocidade foram realizados 5 ensaios e, a partir do valor médio da distância medido calcularam-se os valores pretendidos, que se encontram resumidos na Tabela 3.2. De notar mais uma vez que o

procedimento usado introduz alguns erros experimentais e, como tal, não se revela muito rigoroso; porém, para a aproximação que se pretendia, foi suficiente.

Tabela 3.1 – Medições feitas para determinação das velocidades de ensaio.

	1ª Velocidade Distância em 6 min [mm]	2ª Velocidade Distância em 6 min [mm]	3ª Velocidade Distância em 12 min [mm]
Ensaio 1	43,0	20,7	23,8
Ensaio 2	42,2	21,8	23,1
Ensaio 3	43,0	22,4	22,4
Ensaio 4	43,8	22,3	24,0
Ensaio 5	44,8	22,3	22,7
Valor Médio ± Desvio Padrão	43,4 ± 0,5	21,9 ± 0,3	23,2 ± 0,3

Tabela 3.2 – Quadro-resumo das velocidades de ensaio obtidas.

1ª Velocidade	7,23 mm/min
2ª Velocidade	3,65 mm/min
3ª Velocidade	1,93 mm/min

3.3 Determinação da Cadeia de Transmissão

Após a determinação dos valores das velocidades de ensaio foi necessário caracterizar toda a cadeia de transmissão que liga o motor até ao parafuso de avanço que é o responsável final pela transformação do movimento angular em movimento linear.

A cadeia de transmissão é constituída por alguns componentes mecânicos, nomeadamente polias e correias, parafuso sem fim e roda de coroa. Na Figura 3.11 mostra-se a imagem da primeira parte da cadeia de transmissão, da qual fazem parte as polias e as correias, enquanto que na Figura 3.12 mostra-se um esquema exemplificativo da mesma. A divisão foi feita pois a requalificação/substituição de materiais incidirá sobretudo na primeira parte da cadeia (conjunto polias e correias), pois a restante, como faz parte da própria máquina, dificilmente será alterada.



Figura 3.11 – Imagem da primeira parte da cadeia de transmissão – polias e correias.

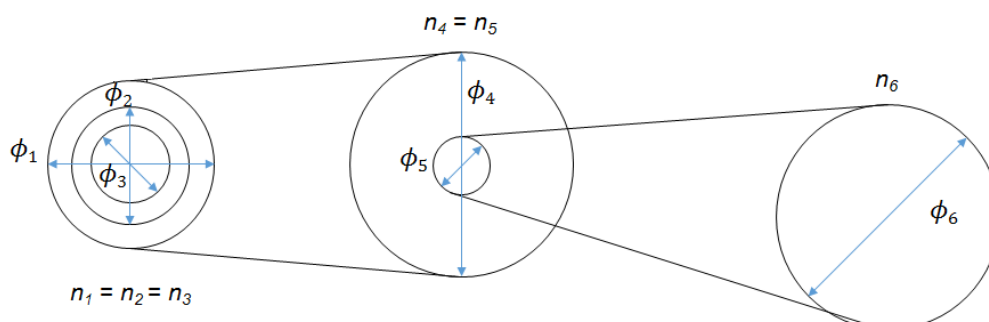


Figura 3.12 – Esquema da primeira parte da cadeia de transmissão.

Com o estudo da cadeia de transmissão pretende determinar-se as relações de transmissão existentes. Considerando então a primeira parte da cadeia de transmissão, a relação de transmissão em polias e correias pode ser calculada a partir da razão dos diâmetros das polias ou a partir da razão entre as velocidades de rotação, Equação 3.1.

$$i = \frac{D_2}{D_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.1)$$

Em que: i é a relação de transmissão, D_1 e D_2 são os diâmetros da polia menor e maior [mm], respetivamente, e n_1 e n_2 são as velocidades de rotação da polia menor e maior [rpm], respetivamente [12, 13].

Para a aplicação da Equação 3.1 é necessário medir os diâmetros das várias polias, dado desconhecer-se as suas velocidades de rotação. De notar que esta medição não foi muito rigorosa uma vez que não foram considerados os diâmetros primitivos das mesmas, e como tal, os resultados devem ser considerados aproximados. Na Tabela 3.3 apresentam-se os valores medidos dos diâmetros das várias polias; convém referir que a notação usada para denominar

os parâmetros descritos na Tabela 3.3 encontra-se em concordância com a notação usada na Figura 3.12.

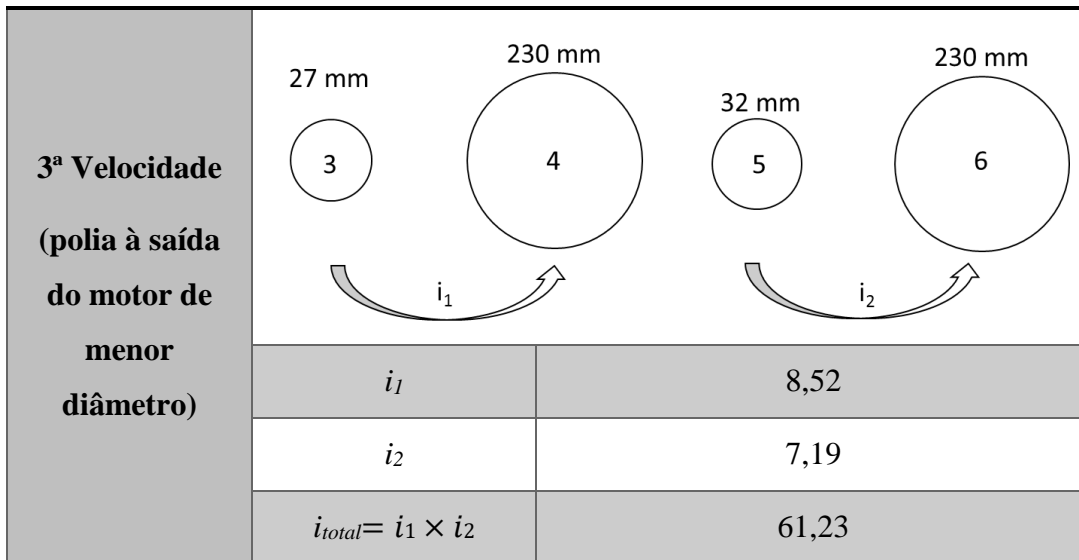
Tabela 3.3 – Diâmetros (ϕ) das polias da primeira parte da cadeia de transmissão.

ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6
95 mm	50 mm	27 mm	230 mm	32 mm	230 mm

A partir dos valores dos diâmetros das polias medidos é possível calcular as várias relações de transmissão existentes; na Tabela 3.4 encontram-se resumidos os resultados obtidos.

Tabela 3.4 – Quadro-resumo das relações de transmissão calculadas.

1ª Velocidade (polia à saída do motor de maior diâmetro)		
	i_1	2,42
	i_2	7,19
	$i_{total} = i_1 \times i_2$	17,40
2ª Velocidade (polia à saída do motor de diâmetro intermédio)		
	i_1	4,60
	i_2	7,19
	$i_{total} = i_1 \times i_2$	33,06



No que se refere à segunda parte da cadeia de transmissão, fazem parte um parafuso sem fim e uma roda de coroa, como se apresenta na Figura 3.13. De referir que a roda de coroa de menor tamanho presente é usada para fazer manualmente o ajuste da posição das garras e também para transmitir o movimento ao mecanismo responsável pela construção do gráfico força *vs.* deslocamento, uma vez que está também ela engrenada à roda de coroa de maior tamanho. O ajuste manual através da roda de coroa mais pequena, só é possível depois do parafuso sem fim estar desengatado. Este par cinemático (parafuso sem fim e roda de coroa) é, geralmente, utilizado para transmissão de movimento de rotação entre dois veios dispostos a 90°, quando se pretendem obter relações de transmissão elevadas, normalmente entre 40:1 e 100:1 [14].

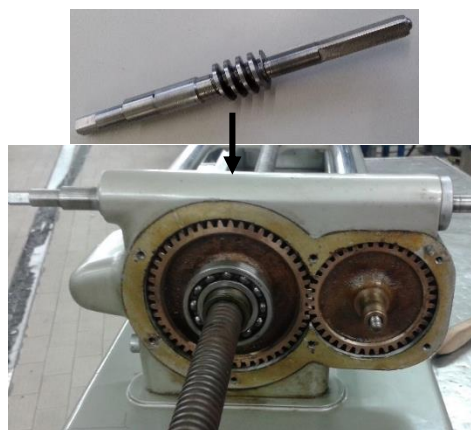


Figura 3.13 – Imagem da máquina HT onde se realça o par cinemático constituído por parafuso sem fim e roda de coroa.

O cálculo da razão de transmissão do conjunto parafuso sem fim e roda de coroa é dado pela Equação 3.2.

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.2)$$

Em que: i é a razão de transmissão, z_1 é o número de entradas do parafuso sem fim, z_2 é o número de dentes da roda de coroa e n_1 e n_2 são as velocidades de rotação do parafuso sem fim e da roda de coroa [rpm], respetivamente [14]. Como as velocidades de rotação, tanto do parafuso sem fim, como da roda de coroa são desconhecidas, a razão de transmissão vai ser obtida a partir do número de entradas do parafuso sem fim e do número de dentes da roda de coroa. Na Tabela 3.5 apresentam-se os valores do número de dentes da roda de coroa e do número de entradas do parafuso sem fim e o valor da razão de transmissão calculado a partir destes; convém realçar que em nenhum dos cálculos foi tido em atenção possíveis folgas existentes na própria transmissão.

Tabela 3.5 – Quadro-resumo dos parâmetros usados para o cálculo da razão de transmissão do par cinemático (parafuso sem fim – roda de coroa).

z_1	z_2	$i = 50$
1	50	

3.4 Alterações Propostas

Após o estudo do modo de funcionamento e conhecimento do projeto mecânico da máquina original são propostas as seguintes alterações para a requalificação tecnológica da máquina HT:

- 1- Substituição completa do que se definiu como a primeira parte da cadeia de transmissão (conjunto de polias e correias), não só devido ao desalinhamento verificado entre as polias que, compromete a boa performance da transmissão, mas também devido ao ruído existente durante o seu funcionamento. Propõe-se a troca destes elementos por um redutor;
- 2- Substituição da unidade de atuação por um conjunto constituído por um servomotor, capaz de fazer o controlo da velocidade durante o ensaio;

- 3- Substituição da coluna de mercúrio por outro método capaz de devolver os valores da força medidos ao longo do ensaio. Esta alteração deve-se ao facto de o mercúrio já se encontrar fora de uso e que se deve evitar usar por razões ambientais e de saúde pública, uma vez que este apresenta características altamente tóxicas que podem pôr em perigo o utilizador da máquina. A segurança deve ser um fator a ter em conta tanto no projeto de novas máquinas, como na requalificação de máquinas antigas, e ainda mais no presente caso quando se pretende dar uma utilização maioritariamente em aulas. Desta forma, pretende-se substituir a coluna de mercúrio por um sistema automático e digital de aquisição e registo das medições a fazer.

Assim, no próximo capítulo, capítulo 4, serão descritas com mais detalhe as alterações necessárias para se atingir o objetivo final de requalificação tecnológica do HT existente no DEMec.

4. Descrição dos Componentes Principais de Atuação e Instrumentação

O capítulo 4 inicia-se com uma breve introdução aos ensaios mecânicos com incidência nos ensaios de tração, para uma melhor compreensão e contextualização das alterações, em termos de instrumentação e atuação, que vão ser aplicadas na máquina. Após este enquadramento será feita a descrição dos principais componentes escolhidos bem como a justificação das suas escolhas. Vão ser também apresentadas todas as alterações propostas e concebidas na máquina de forma a garantir os requisitos propostos e a alcançar os objetivos finais deste trabalho.

Tendo em conta o que foi descrito no capítulo anterior, capítulo 3, e atendendo ao limitado número de acessórios disponíveis na máquina, a sua requalificação irá ser feita limitando o seu uso a ensaios de tração.

Os ensaios mecânicos a materiais permitem quantificar as propriedades mecânicas e dar a conhecer a forma como estes se comportam quando lhes são aplicados determinados esforços (tração, compressão, corte, flexão ou torção) e, conseqüentemente, ajudar a fazer escolhas conscientes dos materiais para cada projeto, tendo em conta as necessidades e requisitos do próprio projeto. A escolha do tipo de materiais é de extrema importância de forma a evitar deformações indesejáveis ou falhas em serviço ou até mesmo o encarecimento do produto final em função do sobredimensionamento dos seus componentes [4, 15]. Os ensaios mecânicos têm como objetivo reproduzir o mais fiel possível as condições de trabalho e serviço, testando assim a performance do material em condições muito próximas da realidade. A gama de ensaios mecânicos existentes é vasta e a sua escolha em determinada situação é função das propriedades mecânicas que se desejam conhecer, do tipo de solicitação a que a peça estará sujeita e das especificações a que o produto final deverá obedecer. Todos os procedimentos a serem seguidos nos ensaios mecânicos devem sempre ser referenciados a ensaios normalizados [15].

Os ensaios de tração são considerados um dos ensaios mais usados e mais universais pela facilidade de execução e pela reprodutibilidade dos resultados obtidos. Este tipo de ensaio consiste em aplicar, ao provete de geometria bem definida e adequada, uma força de tração uniaxial, continuamente crescente até à sua rotura. Na Figura 4.1 mostra-se um esquema de um provete quando é submetido a uma carga de tração. Ao longo do ensaio é feito o registo da força e do deslocamento sofrido pelo provete através de instrumentação apropriada, obtendo-se assim um gráfico da força (F) vs. deslocamento (Δl), apresentando-se na Figura 4.2 um possível exemplo da sua representação.

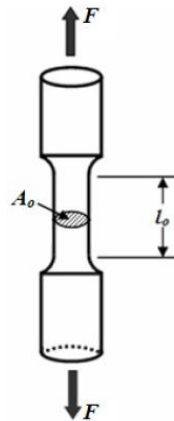


Figura 4.1 – Esquema de um provete submetido a uma solicitação de tração; em que: F é a carga aplicada [N], A_0 é a área inicial da secção do provete [m^2] e l_0 é o comprimento inicial de referência [m] [16].

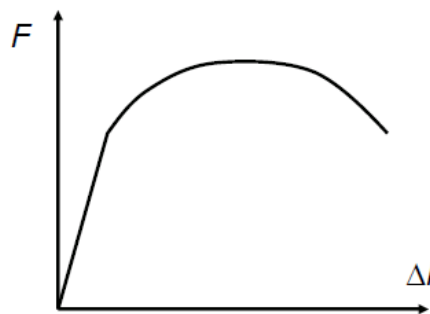


Figura 4.2 – Exemplo de uma representação gráfica F vs. Δl .

Este tipo de ensaio é maioritariamente usado na indústria como ensaio de controlo de qualidade e na investigação como suporte para quantificar propriedades mecânicas com vista à seleção de materiais em projetos. Através dos resultados obtidos, é possível transformar-se a curva F vs. Δl em gráfico tensão (σ) vs. deformação (ϵ) (também designado por curva de engenharia), como se verá mais à frente, e a partir deste último determinar propriedades

relevantes tais como: a rigidez, dada pelo módulo de elasticidade, a resistência, dada pela tensão de rotura e pela tensão limite de elasticidade, a ductilidade, dada pela extensão após rotura e pelo coeficiente de estrição, entre outras [15].

Assim, para a realização deste ensaio é necessário fazer-se a medição da força e do deslocamento ao longo do ensaio e garantir que este é feito a uma velocidade de extensão constante. Desta forma, o controlo do ensaio terá de ser feito através da velocidade do mesmo.

4.1 Atuação Mecânica

A escolha certa de todo o conjunto de atuação mecânica está dependente de todos os requisitos e necessidades da sua aplicação. Neste caso concreto pretende-se ter um conjunto constituído por um servomotor elétrico e um redutor planetário que seja capaz de realizar o controlo do ensaio, com a possibilidade de poder trabalhar com um intervalo de velocidades de ensaio compreendido entre 2-20 mm/min. Há que ter ainda em consideração que deve ser capaz de suportar e assegurar a capacidade máxima de ensaio de 20 kN, apesar das garras atualmente disponíveis apenas suportarem 10 kN.

Definidos os requisitos do ensaio, procedeu-se então ao dimensionamento do servomotor, como se mostra de seguida. Tal como se disse anteriormente, a cadeia de transmissão composta pelas polias e correias passa a não ser usada na versão requalificada da máquina, e como tal o conjunto servomotor + redutor deverá ser ligado à máquina diretamente no parafuso sem fim, como se indica na Figura 4.3. Assim, é necessário calcular o binário necessário à entrada do parafuso sem fim.

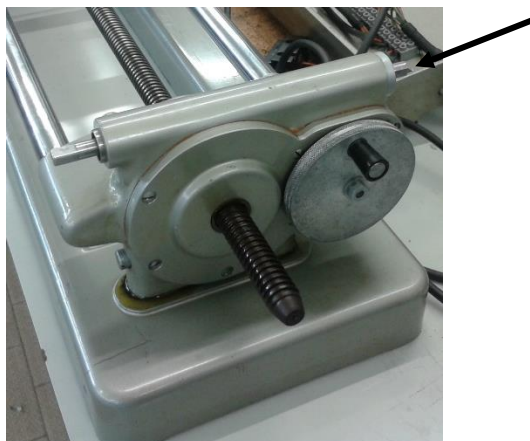


Figura 4.3 – Indicação do local onde se irá ligar o conjunto servomotor + redutor.

Para o cálculo do binário no parafuso de avanço considerou-se a capacidade de carga máxima da máquina igual a 2000 kgf, e por conseguinte, uma carga desse valor para dimensionar o motor. Na Figura 4.4 pode ver-se um esquema de uma porção de um parafuso quando solicitado por uma carga axial de compressão (F), juntamente com os parâmetros que posteriormente serão usados no cálculo do respetivo binário; a Equação 4.1 exprime a forma de cálculo do binário no parafuso de avanço, Tr [13].

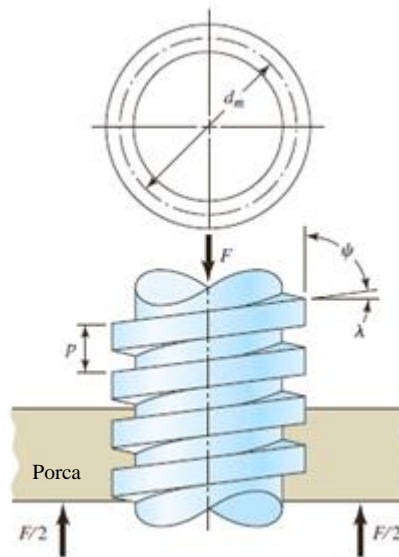


Figura 4.4 – Esquema de porção de um parafuso de potência quando solicitado por uma carga axial; em que: p é o passo [m], F é a força de compressão axial [N], λ é o ângulo de avanço [°] e ψ é o ângulo de hélice [°], adaptado de [13].

$$Tr = \frac{F \times d_m}{2} \times \left(\frac{l + \pi \times f \times d_m}{\pi \times d_m - f \times l} \right) \quad (4.1)$$

Em que: F é a força de compressão axial a que o parafuso de avanço está sujeito [N], d_m é o diâmetro médio dado pela diferença entre o diâmetro do fuso (d_{fuso}) e a metade do passo (p) [m], l é o avanço do parafuso e é dado pelo produto do número de roscas do parafuso de avanço (n) e do seu passo (p) [m] e f é o coeficiente de fricção do par roscado. Para aplicar a Equação 4.1 assumiu-se uma carga de 2000 kgf e, conseqüentemente, o valor de F vem igual a 19600 N ($2000 \times 9,8$). Os parâmetros relativos ao fuso (d_{fuso} e p) foram medidos e os seus resultados foram, respetivamente, $d_{fuso} = 19$ mm e $p = 4$ mm. Os parâmetros definidos por d_m e l são calculados a partir das características do fuso e, como tal, $d_m = 19 - 4/2 = 17$ mm e $l = 1 \times 4 = 4$ mm. De notar que o número de roscas do parafuso de avanço (n) é igual a 1 e, por isso,

o parâmetro designado por l é numericamente igual ao passo (p). Na Tabela 4.1 estão resumidos os valores dos coeficientes de fricção para os vários materiais do parafuso e da porca, tendo em conta igualmente o tipo de lubrificação existente no par roscado.

Tabela 4.1 – Coeficientes de fricção para pares roscados, adaptado de [13].

Material do Parafuso	Material da Porca			
	Aço	Bronze	Latão	Ferro Fundido
Aço, seco	0,15-0,25	0,15-0,23	0,15-0,19	0,15-0,25
Aço, lubrificado com óleo	0,11-0,17	0,10-0,16	0,10-0,15	0,11-0,17
Bronze	0,08-0,12	0,04-0,06	-	0,06-0,09

Assim, a partir da Equação 4.1 e considerando ainda um coeficiente de fricção de 0,25 (par aço, seco – aço) obteve-se um valor de binário no parafuso de avanço de aproximadamente: $Tr = 55$ Nm. Para se obter o binário desejado (à entrada do parafuso sem fim) é então necessário dividir este valor pela razão de transmissão existente entre a roda de coroa e o parafuso sem fim. Tal como foi explicitado no capítulo 3, este valor da razão de transmissão é de 50, e desta forma, o binário à entrada do parafuso sem fim vem aproximadamente igual a 1,1 Nm.

Com os requisitos definidos, partiu-se para uma avaliação da oferta do mercado, de forma a que a escolha destes elementos se demonstrasse também viável economicamente. Tendo em consideração todos estes aspetos e aplicando um coeficiente de segurança (2,5) ao binário necessário calculado, devido à não consideração de possíveis folgas nas várias transmissões mecânicas nos cálculos, optou-se por um conjunto compacto de atuação (servomotor e redutor num só equipamento) *NX Series* da *Oriental Motors*, do tipo PS. Este tipo de equipamento caracteriza-se, essencialmente, por ser compacto e leve [17]. Apresentam-se de seguida as especificações mais relevantes do conjunto escolhido:

- NX610AC-PS10-2 [17]

- *Absolute encoder* (1 rotação – 20 bits; múltiplas rotações – 16 bits), integrado no motor. Para usufruir de um sistema completamente absoluto é necessário associar uma bateria opcional;
- *Backlash* de (no máximo) 0,25°;

- Resolução do *encoder* no veio de saída de 100 a 10000 P/R (pulsos por rotação), com valor de fábrica pré definido de 1000 P/R;
- Potência nominal de saída = 100 W;
- Velocidade de rotação permitida no motor = 3000 rpm;
- Gama de velocidades de rotação permitidas à saída do conjunto = 0-300 rpm;
- Binário nominal = 2,86 Nm;
- Binário máximo = 8,59 Nm;
- Razão de transmissão do redutor = 10.

Na Figura 4.5 apresenta-se a curva característica velocidade (n) vs. binário (T) do conjunto descrito.

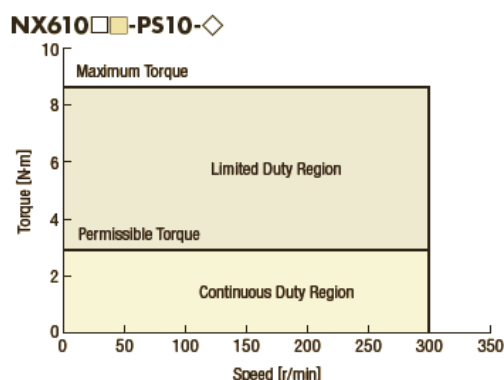


Figura 4.5 – Curva característica velocidade vs. binário do conjunto NX610AC-PS10-2 [17].

O *driver* associado ao equipamento escolhido tem como referência NXD20-C e é responsável por fazer a ligação entre o servomotor e o controlador, que no presente trabalho é um computador utilizando o *software LabVIEW*. As suas características podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- NXD20-C [17]

- 4 modos distintos de controlo: controlo de posição (posicionamento realizado com base em pulsos de *input*), controlo de velocidade (velocidade de operação controlada por sinais I/O), controlo de binário (o servomotor opera a binário constante) e controlo de tensão (o binário gerado e a velocidade de operação são ajustados para manter uma tensão constante);

- Várias funções de proteção que quando ativas, disparam um sinal de alarme provocando a paragem do motor;
- Comando da velocidade e do binário através de sinais analógicos em tensão ($\pm 10V$).

Tal como referido nas especificações do equipamento NX610AC-PS10-2, este conjunto vem equipado também com um *encoder* que apresenta uma resolução que pode ser ajustada consoante as necessidades de cada aplicação (existe uma gama de resoluções disponíveis). Fazendo a leitura dos sinais do *encoder* em quadratura e considerando a resolução máxima de 10000 P/R, obtem-se uma resolução na leitura da posição do conjunto dada por:

$$Resolução_angular_conj_atuação = \frac{360^\circ}{10000 \times 4} = 0,009^\circ \quad (4.2)$$

De notar que a hipótese de escolha da resolução só é possível com recurso ao *software MEXE02* (disponível para uso neste sistema) ou ao módulo de controlo (OPX-2A). A resolução da leitura de posição calculada ($0,009^\circ$) é à saída do conjunto de atuação e, como o interesse é medir o deslocamento linear do parafuso de avanço, nas Equações 4.3 e 4.4 mostram-se os cálculos efetuados para se obter a resolução na leitura da posição linear. De notar que se tem uma redução de 50:1 proveniente da existência do par cinemático constituído pelo parafuso sem fim e pela roda de coroa (ver secção 3.3). Para transformar o deslocamento angular do parafuso de avanço no deslocamento linear que este provoca, recorre-se ao parâmetro designado por avanço do parafuso (l), que é o deslocamento longitudinal para uma rotação completa (360°). Tal como foi dito anteriormente, este parâmetro é igual a 4 mm.

$$Resolução_pos_angular_parafuso = \frac{0,009^\circ}{50} = 1,8 \times 10^{-4} \quad (4.3)$$

$$Resolução_deslocamento_linear = \frac{1,8 \times 10^{-4} \times 4}{360} = 2 \times 10^{-6} \text{ mm} = 2 \text{ nm} \quad (4.4)$$

A resolução calculada para o deslocamento linear (2 nm) é um valor que teoricamente se dispõe, o que não significa necessariamente que depois na prática se faça uso deste. Consoante as necessidades de cada aplicação faz-se uso de uma resolução na medição que se considere conveniente.

Por fim, como se pretende aplicar diretamente o conjunto de atuação ao parafuso sem fim da própria máquina e dada a diferença dos valores dos diâmetros das duas partes ($d_{saída_redutor} = 12 \text{ mm}$ e $d_{entrada_parafuso_sem_fim} = 9,5 \approx 10 \text{ mm}$) foi necessário arranjar uma solução que permitisse esta ligação e a correspondente transmissão de potência. Neste contexto, e aproveitando os produtos disponibilizados pela *Oriental Motors*, optou-se pelo uso de um acoplamento flexível (*MCV Couplings*) com a referência MCV251012. Este acoplamento é dotado da capacidade de absorver vibrações, apresentar uma resposta dinâmica elevada, *backlash* nulo e exibe as mesmas características de funcionamento independentemente do sentido de rotação do veio de saída do conjunto de atuação [17].

Para fixar o conjunto de atuação (servomotor + redutor) e de forma a garantir o seu correto alinhamento com o parafuso sem fim, foi desenvolvido um suporte em *SolidWorks*. Este suporte é constituído por 2 cantoneiras ($30 \times 30 \times 3 \text{ mm}$) que fazem a respetiva fixação à mesa de suporte desenvolvida (ver secção 4.4) e no Anexo A apresenta-se o desenho de construção do suporte desenvolvido. Na Figura 4.6 mostra-se uma imagem da montagem do conjunto de atuação com o respetivo suporte, juntamente com o acoplamento flexível.



Figura 4.6 – Imagem da montagem do conjunto de atuação com o respetivo suporte.

4.2 Instrumentação

Definido o conjunto de atuação, torna-se necessário estabelecer toda a instrumentação, ao nível de transdutores, necessária às exigências do tipo de ensaio a realizar na máquina. Uma vez que se pretende a realização de um ensaio de tração é preciso fazer tanto a medição da força

que é aplicada ao provete em cada instante, como também a medição do deslocamento que este sofre ao longo do tempo, de forma a permitir, durante o ensaio, a criação da curva F vs. Δl .

Após alguma pesquisa da oferta de mercado e, tendo conhecimento das várias possibilidades existentes, optou-se por uma solução de baixo custo, aproveitando material já existente da máquina mas aplicando ligeiras alterações. Desta forma, no que diz respeito à medição da força, readaptaram-se as barras existentes (ver Figura 3.3) com a colocação de extensómetros de resistência, transformando-as assim em células de carga. Em relação à medição do deslocamento, aproveitou-se o facto de se dispor de um servomotor com um *encoder* integrado para, a partir deste, fazer-se a medição desejada.

Seguidamente será apresentada toda a instrumentação implementada e respetiva forma de implementação.

4.2.1 Extensómetros de Resistência

Os extensómetros de resistência são sensores constituídos por um condutor ou semicondutor cuja resistência varia diretamente com a deformação a que é sujeito quando submetido a uma tensão mecânica [18]. Assim, é possível medir-se a deformação e todo um conjunto de grandezas mensuráveis a partir desta, como por exemplo a força, o binário e a pressão com a utilização de extensómetros. No caso do presente trabalho, pretende-se fazer a medição da força, pelo que os extensómetros do tipo *bonded* vão ser colados nas barras que se deformam de acordo com a carga aplicada durante o ensaio. A resistência elétrica (R_e) do elemento condutor ou semicondutor é dada pela seguinte expressão:

$$R_e = \rho \times \frac{l}{A} \quad (4.5)$$

em que: ρ é a resistividade do material [Ωm], l é o comprimento do elemento [m] e A é a área de secção circular do elemento [m^2] [18]. Nos extensómetros do tipo *bonded* a variação relativa da resistência ($\Delta R/R_0$) relaciona-se com a deformação axial ($\varepsilon_a = \Delta l/l_0$) de acordo com a equação que se segue:

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} \quad (4.6)$$

em que: GF é o fator do extensómetro ou *gauge factor*, característica do próprio extensómetro, ΔR é a variação da resistência [Ω], R_0 é a sua resistência nominal [Ω], Δl é a variação de

comprimento [m] e l_0 é o seu comprimento inicial [m] [18]. Dada a fragilidade destes sensores e o seu reduzido tamanho, o elemento condutor ou semiconductor é colocado através de fotogravura, em forma de grelha, que por sua vez é protegida com um filme muito fino. Além de proporcionar um manuseamento mais fácil do extensómetro aquando da sua instalação, este filme protetor permite o isolamento elétrico entre o extensómetro e o dispositivo ao qual este é colado. No contexto deste trabalho, os extensómetros usados apresentam um GF de 2,1 e uma resistência nominal (R_0) de 120 Ω . Na Figura 4.7 apresentam-se estes mesmos extensómetros já implementados na barra seleccionada.

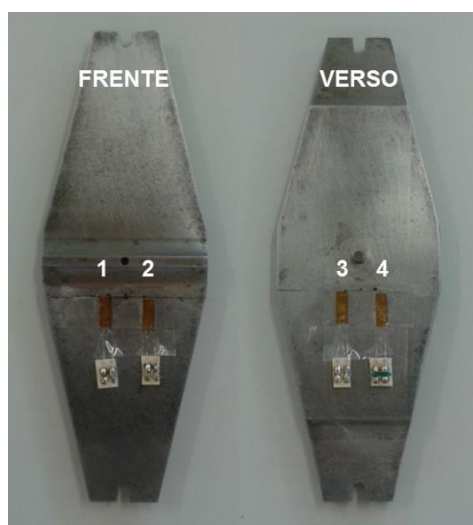


Figura 4.7 – Montagem dos extensómetros na barra seleccionada (frente e verso).

A variação da resistência do extensómetro provocada por uma deformação deve ser transformada num sinal elétrico, que permitirá posteriormente determinar o valor de deformação. As variações relativas de resistência são muito pequenas, geralmente inferiores a 1%, o que provoca variações também muito pequenas do sinal elétrico em relação ao seu valor nominal; desta forma, o condicionamento de sinal deve incluir uma montagem em ponte de *Wheatstone*. No presente trabalho foi feita uma montagem em ponte completa, com 4 extensómetros, em que 2 se encontram na parte da frente da barra e os outros 2 no verso. Uma vez que durante o ensaio a barra é solicitada à flexão, os extensómetros colocados na parte da frente encontram-se à tração e os colocados no verso encontram-se à compressão. Esta implementação conveniente em ponte de medição completa permite, assim, compensar os efeitos de temperatura causadores de deformações aparentes, que se iriam manifestar em variações de resistência dos extensómetros, originando medições incorretas das deformações. Na Figura 4.8 apresenta-se o esquema da ponte de *Wheatstone* usada na presente dissertação.

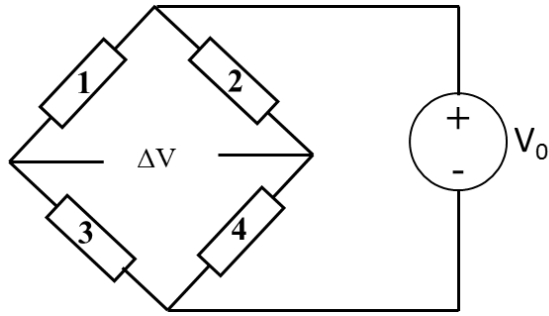


Figura 4.8 – Montagem dos extensômetros 1, 2, 3 e 4 em ponte completa de *Wheatstone*.

Como se trata de uma montagem em ponte completa, a variação da tensão da ponte (ΔV), também designada por desequilíbrio da ponte, pode ser dada por:

$$\Delta V = V_0 \times \frac{\Delta R}{R_0} = V_0 \times \varepsilon_a \times GF \quad (4.7)$$

em que V_0 é a tensão de alimentação da ponte [V] e as restantes grandezas têm o significado referido anteriormente [18].

Além da montagem em ponte de *Wheatstone* é também conveniente fazer-se uso de um equipamento que seja capaz de amplificar o sinal dos extensômetros. Para tal, utilizou-se um módulo de amplificação a aplicar em sensores com extensômetros de referência RM4220 da marca HBM, como se pode ver na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Módulo de amplificação do sinal dos extensômetros da marca HBM, RM4220 [19].

Este módulo possibilita a conexão do transdutor ao próprio módulo através de uma ligação de 4 ou 6 fios; optou-se pela conexão com 6 fios, de forma a poder desprezar-se a influência da flutuação da tensão de alimentação [19].

4.2.2 Caracterização da Célula de Carga

Como referido anteriormente, pretende fazer-se a medição da força (F) através da colocação de 4 extensómetros nas barras, transformando-as desta forma em células de carga. Uma vez que os extensómetros apenas medem diretamente a deformação, é necessário proceder-se à caracterização de cada célula de carga, para que seja possível obter-se também diretamente o valor da força aplicada a cada instante. Convém salientar que apenas foi instrumentada uma das barras disponíveis e, como tal, a caracterização referida vai ser aplicada somente a essa barra.

O principal objetivo da caracterização da célula de carga é conhecer a relação direta entre a força aplicada na barra e o respetivo desequilíbrio da ponte medido (ΔV). Para que tal fosse possível foram criadas as condições de solitação a que a barra está sujeita durante o ensaio de tração na máquina, e foram sendo aplicadas cargas de valor conhecido. Este processo de caracterização foi feito com recurso a uma máquina de ensaios universal disponível no Laboratório de Ensaio Tecnológicos (LET) do DEMec. Para cada valor conhecido de carga aplicada foi medido o valor do ΔV tendo sido realizado um número de medições que se achou conveniente para posteriormente se obter uma curva da F vs. ΔV .

É importante referir que antes da realização do processo de caracterização foi necessário determinar uma aproximação da capacidade de carga máxima da barra porque inicialmente não se dispunha de qualquer informação em relação a este aspeto. Este parâmetro (capacidade de carga máxima) é bastante importante, pois tem de se garantir que a barra não entra em regime plástico, e por isso apresenta deformação plástica, que por definição corresponde a uma mudança dimensional permanente e, como tal, irreversível [15]. Assim, o processo de caracterização solicitaria a barra num intervalo de valores de carga até à sua capacidade de carga máxima. Para determinar a capacidade de carga máxima da barra instrumentada recorreu-se a uma simulação por método dos elementos finitos, disponível no *software SolidWorks*. Nesta simulação é necessário definir as condições a que a barra estará sujeita ao nível dos apoios e da solitação a que estará submetida, condições estas que se estabeleceram de forma a serem o mais próximo das condições reais de serviço. Um outro fator que tem de ser escolhido, é o

material do objeto de estudo da simulação, neste caso, a barra. Como este parâmetro era desconhecido, considerou-se que se tratava de um aço, mais especificamente o aço CK35 (AISI 1035). Foram realizadas simulações com as mesmas condições de serviço para cargas de 100 kgf, 200 kgf e 300 kgf. A escolha destes valores foi feita por aproximação, tendo em conta a existência de 5 barras disponíveis, a capacidade de carga máxima da máquina de 20 kN e o facto de a barra instrumentada ser uma das que apresenta menores espessuras (o que equivale a dizer menor capacidade de carga). Comparando os resultados obtidos nas 3 simulações realizadas e, tendo em consideração um coeficiente de segurança, definiram-se 200 kgf para a capacidade máxima da célula de carga. Na Figura 4.10 mostra-se o resultado da simulação referente à tensão provocada quando aplicada uma carga de 200 kgf na célula de carga instrumentada. Os resultados referentes à tensão, deformação e deslocamento provocados das restantes simulações (cargas de 100 kgf e de 300 kgf, e também para a carga de 200 kgf) encontram-se reunidas no Anexo B.

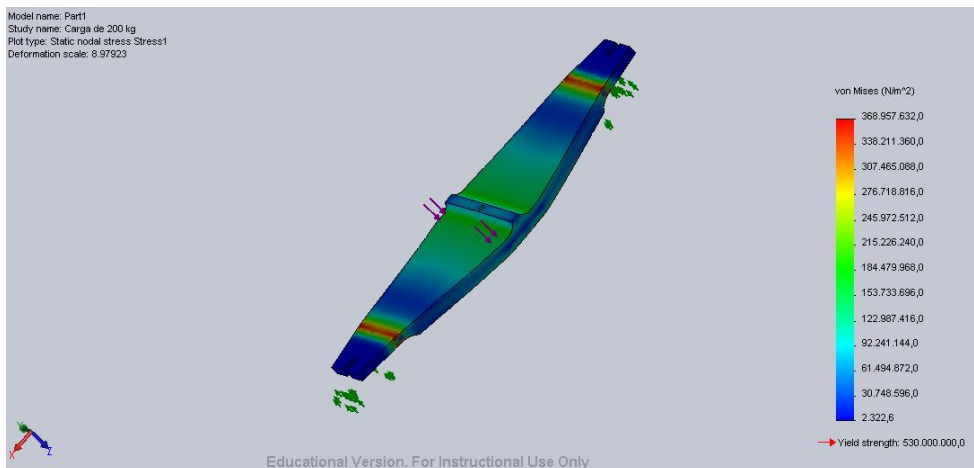


Figura 4.10 – Resultados obtidos da tensão provocada na célula de carga, quando solicitada por uma carga de 200 kgf.

Com a definição da capacidade de carga máxima da célula de carga instrumentada ficam reunidas todas as condições para se proceder à sua caracterização. A partir do processo de caracterização foi possível obter o gráfico F vs. ΔV , como se mostra na Figura 4.11.

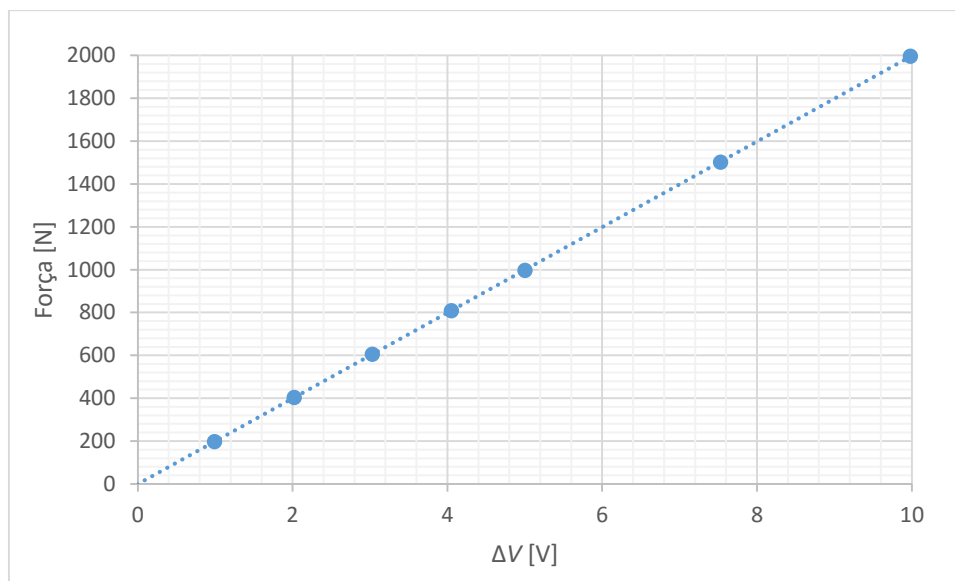


Figura 4.11 – Representação gráfica F vs. ΔV do resultado da caracterização da célula de carga.

A partir dos pontos do gráfico F vs. ΔV foi traçada a reta de tendência que neste caso poderá também ser designada por reta de caracterização da célula de carga. Esta equação descreve o modo como as duas grandezas (força e variação de tensão na ponte de medição) se relacionam entre si, relação esta que vai ser usada posteriormente em programação, de forma a que o utilizador disponha diretamente da medição da força que é pretendida; a relação de caracterização determinada é definida na Equação 4.8.

$$F = 199,766 \times \Delta V - 0,296 \quad (4.8)$$

Por último, e aquando da caracterização da célula de carga, o ganho do módulo RM4220 foi ajustado de forma a ter-se uma tensão de 10 V à sua saída quando era aplicada uma carga de 2000 N. Como a carta de I/O do referido módulo é de 12 bit e selecionando como gama de entrada ± 10 V, a resolução na medição de tensão será de, aproximadamente, 4,9 mV ($20/2^{12}$). Assim, a resolução na medição da força vem igual a 0,98 N ($4,9 \times 10^{-3} \times 2000/10$), aproximadamente.

4.2.3 Caracterização do Sistema de Medição do Deslocamento

Tal como já tem sido referido ao longo do presente relatório, a medição do deslocamento sofrido pelo provete será realizada através dos sinais do *encoder* integrado no motor. Neste contexto, os sinais do *encoder* não correspondem diretamente ao valor do deslocamento linear do parafuso de avanço (responsável pelo movimento das garras que irão segurar o provete), pelo que deve ser encontrada a forma de conversão de uma grandeza na outra, que será implementada posteriormente em programação.

Num primeiro momento, fez-se a referida conversão usando a razão de transmissão do par cinemático (parafuso sem fim – roda de coroa) seguido de novo cálculo para transformar o deslocamento angular do parafuso de avanço no seu deslocamento linear efetivo. De forma a verificar este método, recorreu-se a um comparador digital que mostrou algumas diferenças (± 1 mm para distâncias superiores a 10 mm), entre o valor medido pelo sistema e o valor medido pelo comparador. Esta diferença pode ser explicada pela existência de possíveis folgas em toda a transmissão mecânica e que não foram consideradas nos referidos cálculos. No contexto dos ensaios mecânicos e dado que, por vezes, as variações de deslocamento verificadas se encontram na ordem dos 0,1 mm, optou-se por determinar novo fator de conversão, que permitirá transformar diretamente os sinais adquiridos do *encoder* (deslocamento angular à saída do conjunto de atuação) no deslocamento linear do parafuso de avanço, que se pretende efetivamente medir.

Este fator de conversão foi determinado experimentalmente; colocou-se o conjunto de atuação em funcionamento tendo sido impostas sucessivas paragens, sempre que se achou conveniente para que fosse possível ler o deslocamento angular dado pelo *encoder* e ao mesmo tempo guardar o correspondente valor do deslocamento linear sofrido pelo parafuso de avanço, lido no comparador digital. Assim, foi determinada a relação entre as duas grandezas referidas que viria a substituir, em programação, a conversão baseada nas relações de transmissão do sistema mecânico. De realçar ainda que, recorrendo ao novo fator de conversão obtido e invertendo os cálculos, determina-se que a razão de transmissão efetiva do par cinemático (parafuso sem fim – roda de coroa) é, aproximadamente, de 46,9.

4.3 Quadro Elétrico

A maior parte dos equipamentos descritos carecem de alimentação elétrica e, como tal, é necessário projetar um quadro elétrico que seja capaz de garantir todo o condicionamento de sinal, disponibilizando a potência e a tensão de alimentação requerida pelos referidos equipamentos. Além deste fator, o quadro elétrico deve ser também responsável por combinar toda a lógica de comando com a proteção e corte de energia, assegurando assim a segurança quando se verificam situações anormais que possam pôr em perigo, tanto o utilizador da máquina como os equipamentos que fazem parte desta. Para que tal seja possível, devem ser escolhidos vários componentes elétricos com diferentes funções e características que trabalhem em conformidade e devidamente sintonizados de forma a garantir todos os requisitos mencionados. Assim, os componentes do quadro elétrico proposto são: relés, contactores, disjuntores, interruptor diferencial, relé térmico, fonte de tensão 24V DC, filtro eletrónico (utilização recomendada pelo fabricante do *driver*), botoneiras/interruptores manuais rotativos e sinalizadores. Uma grande parte dos componentes supracitados foram incluídos por se acharem convenientes e para assegurarem todo o funcionamento previsto para o sistema.

De seguida vai fazer-se um resumo das características de cada um destes componentes para justificar o seu uso no presente trabalho. Os esquemas elétricos completos encontram-se no Anexo C.

- **Interruptor Diferencial (ID)** – dispositivo cuja função é proteger tanto as pessoas como os dispositivos de possíveis contactos diretos ou indiretos com partes do quadro elétrico. Tal facto é conseguido uma vez que se está na presença de um dispositivo responsável pela proteção contra os efeitos de correntes de fuga à terra, que possam existir em circuitos elétricos. No que diz respeito ao seu modo de funcionamento, o interruptor diferencial mede em permanência a soma vetorial das correntes que percorrem os condutores de um circuito. Quando não há problema a registar, essa soma toma valores praticamente nulos, enquanto que quando se verifica uma falha de isolamento num equipamento, ou o utilizador toca num equipamento ativo do circuito, o valor da soma vetorial deixa de ser nulo e o interruptor diferencial deteta essa diferença, interrompendo o circuito. O interruptor diferencial proposto apresenta uma corrente diferencial residual nominal de atuação, também designada por sensibilidade, de 30 mA. Este valor corresponde a uma sensibilidade considerada alta e adequada para a proteção total do utilizador

(proteção contra contactos indirectos e proteção complementar contra contactos directos) [20].

- **Filtro Eletrónico** – dispositivo cuja utilização é recomendada pelo fabricante do *driver*. Este componente deve ser usado para atenuar os efeitos provocados pelo ruído gerado no próprio *driver*, evitando a sua propagação ao longo da linha de alimentação; de notar que o filtro deve estar localizado o mais próximo possível do *driver* [21].
- **Disjuntor (D1, D2 e D3)** – dispositivos responsáveis pela proteção das instalações elétricas contra curto-circuitos e contra sobrecargas elétricas, no caso em que o disjuntor apresente um elemento térmico. Desta forma, o disjuntor interrompe automaticamente o circuito na presença de valores de pico de corrente que ultrapassem os valores adequados para o referido circuito, protegendo todos os elementos que façam parte deste. Deve ser localizado a montante dos equipamentos a proteger. Apresenta a vantagem de poder ser manualmente rearmado sem necessidade de substituição, após ter interrompido a corrente em consequência da ocorrência de uma falha [22]. No presente trabalho foram colocados disjuntores para proteção da tomada para ligar o computador responsável pelo controlo e monitorização do ensaio (D1), para proteção do *driver* (D2) e para proteção do circuito de comando (D3).
- **Contactador (KM1 e KM2)** – dispositivos eletromecânicos vocacionados, tipicamente, para o comando de motores. Apresentam um princípio de funcionamento similar aos relés, com a vantagem de poderem operar com valores de corrente superiores, e por isso aconselhados para o comando de motores elétricos, em particular quando se pretende efetuar o comando desses equipamentos à distância. Os contactores são constituídos por um conjunto de contactos elétricos que são acionados eletromagneticamente quando a bobine do solenóide é alimentada pela corrente elétrica. Relativamente aos contactos que dispõe, estes podem ser designados por contactos principais ou contactos auxiliares [22]. Os primeiros são usados no circuito de potência e são responsáveis por estabelecer ou cortar a passagem de corrente neste, enquanto que os segundos são usados no circuito de comando para assegurar a sua auto alimentação ou para assumir funções de sinalização e comando de outros equipamentos. No presente trabalho dispõe-se de 2 contactores responsáveis pelo comando do *driver* e do motor, KM1 e KM2, respetivamente.

- **Relé Térmico (RT1)** – elemento responsável pela proteção de equipamentos contra sobrecargas elétricas (corrente acima da nominal). Este dispositivo é constituído por lâminas bimetálicas, através das quais circula a corrente elétrica. A passagem de corrente provoca um aquecimento das lâminas por efeito de Joule, produzindo uma deformação. A partir de um valor de corrente, a deformação vai ser tal que vai ser capaz de comutar os contactos elétricos do relé térmico, sinalizando a sobrecarga e posteriormente fazendo o corte da corrente no circuito [22]. No presente trabalho dispõe-se de um relé térmico (RT1) localizado a montante do *driver*, com contactos dispostos no circuito de comando.
- **Fonte de Tensão 24V DC (PS1)** – componente cuja função é transformar a tensão de alimentação da rede de 230V AC em tensão de alimentação de 24V DC. Este equipamento é fundamental uma vez que a maior parte dos componentes elétricos do quadro elétrico funcionam a 24V DC, como por exemplo, os relés, os contactores, os sinalizadores, as botoneiras, os interruptores manuais rotativos e o módulo de amplificação do sinal dos extensómetros.
- **Relés (EMERG, RFDC, OK ENSAIO, PC EMERG, FIM ENSAIO)** – dispositivos eletromecânicos que permitem combinar lógicas de comando, devendo ser aplicados em circuitos de comando. Exibem um princípio de funcionamento semelhante aos contactores apesar de disporem de uma capacidade de corte inferior a estes. Como tal, o relé é constituído igualmente por uma bobine, que quando alimentada por corrente elétrica, provoca a comutação dos contactos elétricos respetivos [22]. No presente trabalho dispõe-se de alguns relés que são responsáveis por estabelecer ou cortar a passagem de corrente em determinadas situações, nomeadamente, a atuação de emergência, o alcance do fim de curso e a associação aos sinais digitais que saem do computador e que influenciam o funcionamento de todo o sistema.
- **Botoneiras/Interruptores Manuais Rotativos** – dispositivos cuja função é facilitar a interação do operador com o sistema em causa, solicitando um determinado serviço, configurando parâmetros ou forçando a paragem do sistema imposta por uma situação de emergência [22]. Neste trabalho dispõe-se de uma botoneira de arranque (A), uma botoneira de paragem (P), uma botoneira de emergência (EMER), uma botoneira de *reset* do alarme do *driver* (ALM-RST), um interruptor rotativo para seleccionar o sentido de rotação do motor (ESQ ou DIR) e um interruptor rotativo para seleccionar se a referência enviada para o *driver* provém

de uma definição interna ou de um dispositivo externo (CONTROLO INT ou EXT). De notar que todos se encontram devidamente identificados.

- **Sinalizadores** – elementos responsáveis por darem conhecimento de determinados eventos através de meios luminosos ou acústicos. Neste trabalho dispõe-se apenas de sinalizadores luminosos referentes aos contactos dos contactores KM1 e KM2 (LKM1 e LKM2) e do relé térmico (LRT1), sinalizando igualmente situações em que é atuada a emergência (LEMERG) ou quando o alarme do *driver* dispara (LALM).
- **Interruptor de Posição - Fim de Curso (FDC)** – dispositivo eletromecânico instalado no extremo do curso da máquina de forma a que o motor pare quando o curso máximo é atingido. Assim, este fim de curso é acionado pela parte móvel da máquina e foi implementado por razões de segurança, garantindo a paragem do sistema quando é atingido o curso máximo permitido na máquina. Na Figura 4.12 ilustra-se o local onde se encontra situado o fim de curso. De notar que este componente foi readaptado, uma vez que já estava incluído na máquina em questão.



Figura 4.12 – Imagem do local onde se situa o fim de curso.

Além dos referidos componentes, o quadro elétrico tem também instalado um pequeno circuito eletrónico constituído por dois integrados, do tipo acopladores óticos, PS 2502-4-A, cujos excertos da *datasheet* se encontram no Anexo D, e por um número de resistências necessárias e recomendadas de 390Ω (ver Figura 4.13). Este circuito é responsável pelo condicionamento de sinal necessário de forma a possibilitar a interface entre os sinais provenientes dos componentes do quadro elétrico e os sinais vindos do computador, uma vez que o computador recebe e gera sinais a 5V e os componentes do quadro elétrico funcionam a 24V.

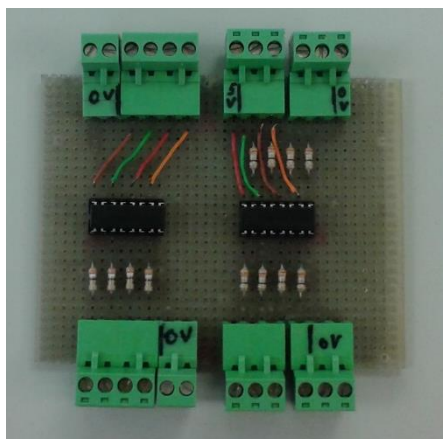


Figura 4.13 – Imagem do circuito eletrónico montado para condicionamento de sinal.

Além do referido circuito, implementou-se também através de *hardware*, um filtro RC passa-baixo, constituído por um condensador de 100 nF e uma resistência de 100 kΩ (ver Figura 4.14), com o objetivo de reduzir o ruído do sinal proveniente da medição da força (sinal analógico). Este filtro é responsável por atenuar as frequências superiores à frequência de corte, deixando passar apenas as baixas frequências [23]. A partir das escolhas do condensador e da resistência calcula-se a frequência de corte (f_c) que pode ser obtida recorrendo à Equação 4.9:

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} \quad (4.9)$$

em que: R é o valor da resistência elétrica escolhida [Ω] e C é o valor da capacidade do condensador escolhido [F]. Assim, obtém-se uma frequência de corte aproximadamente igual a 16 Hz.



Figura 4.14 – Imagem do circuito do filtro RC passa-baixo implementado.

Relativamente aos botões/interruptores rotativos e aos sinalizadores, dado que são uma forma do utilizador interagir com o sistema, devem estar bem visíveis e o seu acesso deve ser fácil. Assim, foram dispostos na face frontal do quadro elétrico, com a exceção da botoneira de

emergência, que foi colocada do lado direito da estrutura da mesa projetada para a máquina, ficando ainda mais acessível de forma a que na presença de uma situação anormal o utilizador seja capaz de ativá-la rapidamente. Na Figura 4.15 ilustra-se a disposição dos botões, dos interruptores rotativos e dos sinalizadores na porta do quadro elétrico, bem como o pormenor da localização da botoneira de emergência.



Figura 4.15 – Imagem da porta do quadro elétrico onde se localizam as botoneiras, interruptores rotativos e sinalizadores, juntamente com a botoneira de emergência.

Por fim, na Figura 4.16 mostra-se o interior do quadro elétrico descrito com todos os seus componentes montados. De salientar que o quadro usado apresenta dimensões menores comparativamente ao que se tinha projetado inicialmente e, como tal, teve de ser feito um esforço extra de aproveitamento de espaço, evitando a aquisição de um novo quadro e fazendo uso do que já se dispunha.



Figura 4.16 – Imagem do interior do quadro elétrico.

4.3.1 Hardware de Comando

O comando de todo o sistema deve adotar uma lógica bem definida, que por sua vez deve ser implementada tanto por *software* como por *hardware*. Nesta secção pretende-se explicitar toda a lógica posta em prática ao nível do *hardware* através da exposição e descrição das ligações elétricas feitas, bem como da forma de interação dos vários componentes elétricos. A lógica implementada por *software* será descrita no capítulo 5.

Considere-se então como momento inicial o instante em que todos os equipamentos elétricos, incluindo o próprio quadro elétrico, se encontram desligados. Supõe-se agora que se pretende realizar um ensaio na máquina. Num primeiro momento deve então fornecer-se corrente ao quadro elétrico, ligando-o à tomada, e colocando os disjuntores e o interruptor diferencial operacionais. Nesta fase, a tomada extra que servirá para alimentar o computador que apoiará o ensaio está pronta a usar. Existe também um interruptor geral (IG) que terá de ser colocado na posição '1' e, com isto, a fonte de tensão de 24V DC passa a ser alimentada, colocando todos os equipamentos aptos a funcionar. Para finalmente o *driver* ser ligado, é necessário pressionar a botoneira de arranque (A), que fará com que a bobine do contactor KM1 seja alimentada e, conseqüentemente, os contactos principais do KM1 fecham o circuito, fazendo com que a corrente chegue ao *driver*. O *driver* só será alimentado caso não se verifiquem situações anormais que possam disparar o disjuntor (D2) e/ou o relé térmico (RT1). Finalizado o ensaio, e quando se pretender desligar o *driver*, basta pressionar a botoneira de

paragem (P), que provoca uma abertura do circuito e, conseqüentemente, a não alimentação da bobine do KM1. Na Figura 4.17 pode ver-se em pormenor a lógica elétrica de alimentação do *driver* que foi descrita.

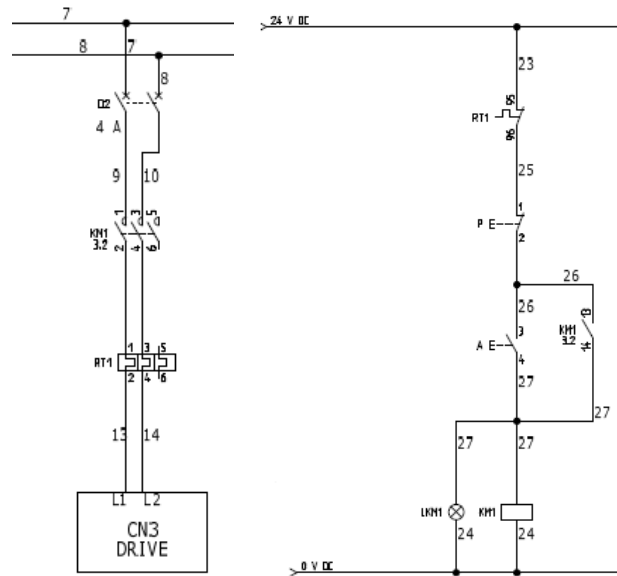


Figura 4.17 – Lógica elétrica de alimentação do *driver*.

Após definida a lógica elétrica de alimentação do *driver*, segue-se a descrição da lógica elétrica de alimentação do servomotor. A alimentação deste último é feita através do *driver* e o comando da comunicação de potência entre os dois é feita recorrendo ao contactor KM2, como se pode ver na Figura 4.18. No entanto, existe ainda uma série de condições a cumprir para que o servomotor se mantenha efetivamente em funcionamento. Assim, a sua alimentação é interrompida nos seguintes casos: i) se o botão de emergência (EMER) for premido tanto fisicamente como através de um botão virtual de emergência (PC EMERG) existente no computador (sinal enviado por *software*), ii) se o fim de curso (RFDC) for atingido, iii) se for detetado através de *software* que o ensaio terminou (FIM ENSAIO), ou seja, quando se dá a rotura do provete e iv) se os parâmetros a registar antes do próprio ensaio não estiverem completamente definidos (OK ENSAIO). Este último fator é dado por um sinal digital que vem do computador e que assume o valor '1' quando: o conjunto de variáveis a registar antes do início do ensaio se encontra bem definido, o utilizador confirma que a seleção do sentido de rotação do motor e a seleção de controlo externo estão feitas, e o computador está preparado para iniciar o ensaio. Naturalmente que o servomotor só deve funcionar com o *driver* alimentado, daí a presença do contacto NA do contactor KM1 no comando do motor. De salientar que os sinais das saídas digitais do computador (OK ENSAIO, PC EMERG e FIM



Figura 4.19 – Projeto em *SolidWorks* da mesa proposta para a máquina HT automatizada.

Analisando o projeto elaborado é de salientar que a travessa de baixo foi colocada de forma a situar o quadro elétrico, e na travessa de cima deixou-se espaço para colocar o computador portátil, que fará todo o controlo do ensaio, e como tal, é um equipamento essencial neste sistema desenvolvido. A solução final obtida e montada encontra-se representada na Figura 4.20.



Figura 4.20 – Imagem do sistema completo desenvolvido.

4.5 Placa de Aquisição de Dados

Para se proceder ao controlo da máquina durante o ensaio vai usar-se um computador portátil que será localizado junto à própria máquina na mesa que se projetou (secção 4.4). Como tal, de modo a que seja possível a obtenção dos sinais no computador vindos dos transdutores e de outros sinais de relés responsáveis por monitorizações, é necessário o uso de uma placa de aquisição de dados compatível com os equipamentos, e que vá de encontro às necessidades ao nível de entradas/saídas analógicas e digitais. Uma vez que o *software* usado para controlo e para criação de interface vai ser o *LabVIEW*, a placa de aquisição de dados a usar é um produto também da *National Instruments* e designa-se por NI myDAQ (ver Figura 4.21). Esta placa é ligada ao computador portátil através de uma entrada USB e como tal é alimentada a 5V.



Figura 4.21 – Placa de aquisição de dados, NI myDAQ, da *National Instruments*.

A placa de aquisição de dados apresenta as características funcionais que se transcrevem de seguida: tem 2 canais de entradas analógicas com possibilidade de medição de sinais até $\pm 10V$, com uma frequência de amostragem máxima de 200 kS/s (*kilo samples per second*) ou 200 kHz, por canal, tornando-os úteis para aquisição de sinais apresentados sob a forma gráfica. Estas entradas analógicas são multiplexadas pelo que é usado apenas um conversor analógico-digital (ADC) para os dois canais, com 16 bit de resolução. Em relação às saídas analógicas, a placa possui igualmente 2 canais, que apresentam um conversor digital-analógico (DAC) dedicado a cada um, de forma a que a respetiva atualização seja feita de forma simultânea, também com 16 bit de resolução. Estas saídas analógicas podem ser atualizadas a uma frequência até 200 kS/s, por canal. No que respeita às entradas e saídas digitais, a NI myDAQ

possui 8 linhas reservadas a sinais digitais. Cada linha é uma *Programmable Function Interface* (PFI) ou Interface de Função Programável, o que significa que pode ser configurada através de *software* para ser uma entrada ou saída digital, ou até para atuar como uma função especial de entrada ou saída para um contador digital. Dentro destas funções especiais, destacam-se nas linhas DIO 0, 1 e 2, a possibilidade de ligar diretamente os sinais vindos do *encoder* em quadratura, A, Z e B respetivamente [24].

As ligações à referida placa encontram-se no conjunto dos esquemas elétricos, e podem ser consultadas no Anexo C. Também no Anexo E disponibiliza-se um quadro-resumo dos sinais que se encontram ligados na placa de aquisição de dados usada na presente dissertação, NI myDAQ com a respetiva descrição, tipo de sinal e o canal onde cada um está associado.

Por último apresenta-se, na Figura 4.22, um esquema ilustrativo do modo como todos os componentes e equipamentos do sistema desenvolvido se encontram interligados.

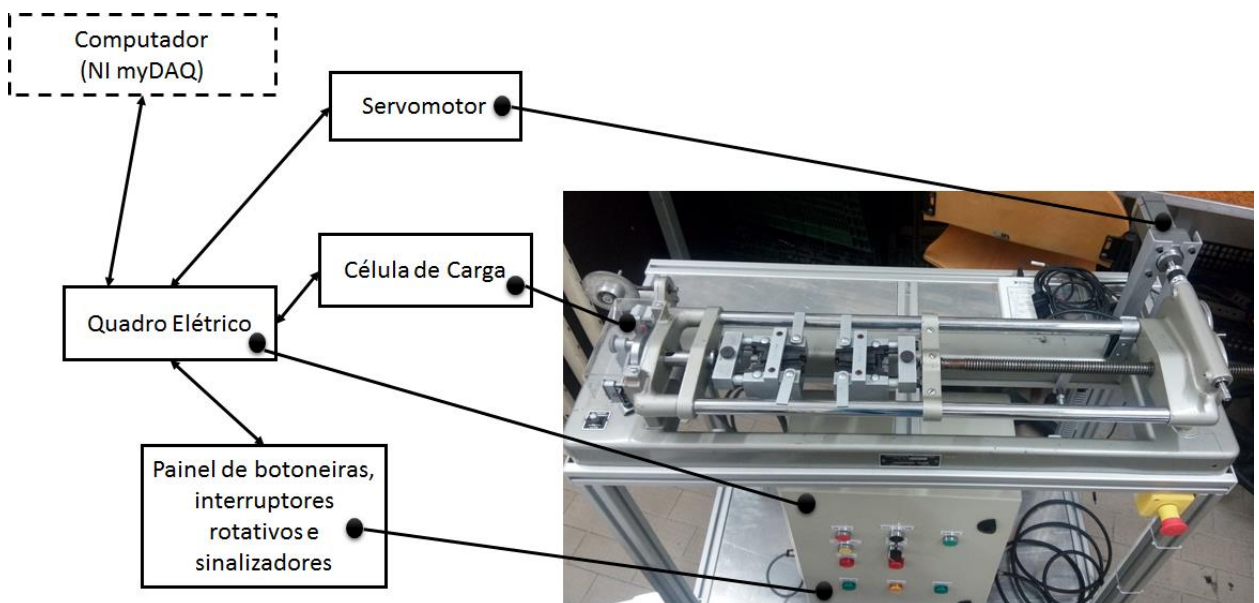


Figura 4.22 – Representação do sistema completo desenvolvido, mostrando a interação entre os vários equipamentos.

5. Software de Comando e Interface Gráfica com o Utilizador

O presente capítulo tem como objetivo apresentar a lógica de comando imposta por *software*, de forma a complementar o que foi implementado por *hardware*, e que foi descrito no capítulo anterior. Desta forma, vão ser descritas as etapas previstas, bem como as transições responsáveis pela evolução do sistema para um estado bem definido. Neste contexto, descreve-se o diagrama de estados criado que servirá de base para a compreensão do comportamento do presente sistema, mostrando igualmente a forma de interação deste com o *hardware*. Ainda neste capítulo, mostra-se a interface gráfica desenvolvida a partir do *software LabVIEW*, que será o meio através do qual o utilizador irá interatuar com o sistema e onde se poderá visualizar, posteriormente, todos os resultados do ensaio. No tema da interface gráfica vão ser explicadas as suas diversas funcionalidades e os elementos que a compõem.

5.1 Diagrama de Estados

Tal como já foi mencionado, o comando da máquina é feito a partir de um computador portátil ao qual está ligada uma placa de aquisição de dados NI myDAQ, que por sua vez estabelece a comunicação entre o computador e os vários componentes do sistema, nomeadamente os relés do quadro elétrico, o *driver* e o módulo de amplificação dos sinais dos extensómetros. No computador, a interface criada em *LabVIEW* é também responsável pelo controlo do ensaio, enviando para o *driver* uma referência constante da velocidade a impor ao servomotor. O valor da velocidade do ensaio é um parâmetro a ser definido pelo utilizador (num intervalo compreendido entre 2 e 20 mm/min), e através de programação esse valor é transformado numa referência em tensão de forma a ser interpretada pelo próprio *driver*. Ao longo do ensaio esta velocidade deve manter-se sempre constante.

A lógica de comando implementada, além de ter em conta as situações possíveis de ocorrerem durante um ensaio, contempla também algumas medidas de segurança, de forma a salvaguardar o utilizador e o equipamento em situações de emergência.

Idealmente devem ser feitas monitorizações dos estados de determinados equipamentos para que se possa conhecer e garantir o bom funcionamento de tudo durante o ensaio e também, em caso de avaria, ser mais simples de detetar a sua causa. Neste caso deveria então ser feita a monitorização do sinal dos contactores KM1 e KM2, a monitorização do estado da fonte de tensão 24V DC, a monitorização da situação de alarme do *driver*, a monitorização do estado de emergência e a monitorização do sinal vindo do fim de curso. Todos estes aspetos, sendo monitorizações, fazem referência a sinais vindos de *hardware* para *software*, ou seja, do quadro elétrico para o computador. Relativamente aos sinais que devem ser enviados do computador para o quadro elétrico, podem enumerar-se: i) o comando relativo ao fim do ensaio que deve implicar a paragem do motor, ii) o comando relativo à possibilidade de início do ensaio que só é ativo depois do utilizador, através de *software*, definir os parâmetros iniciais do ensaio e iii) o comando relativo ao botão virtual de emergência também presente na interface.

Este último, tal como a botoneira física de emergência, deve interromper de forma imediata o ensaio. Todos os sinais referidos são sinais digitais que devem passar pela placa de aquisição de dados; no entanto, esta placa tem apenas 8 canais disponíveis para entradas e saídas digitais. Assim, e uma vez que 3 desses canais já se encontram ocupados com os sinais (A, Z e B) do *encoder*, foi necessário limitar em parte as monitorizações que se iam fazer, isto porque os sinais enviados do computador para o quadro elétrico, implicam mudanças nos estados do sistema, e como tal, não podiam deixar de ser considerados. No caso das monitorizações, mantiveram-se as referentes à situação de emergência e à situação do fim de curso atingido. As restantes, relativas ao sinal dos contactores KM1 e KM2 e ao sinal de alarme do *driver*, apesar de se ter optado por não as adquirir, foram colocados 3 sinalizadores luminosos (LKM1, LKM2 e LALM), que ligam e desligam em função dos estados dos respetivos contactores, e da existência ou não de uma situação de alarme do *driver*, respetivamente. Desta forma, o utilizador poderá, a todo o instante, ter conhecimento sobre o estado de cada contactor, e se o *driver* está a funcionar corretamente. A monitorização da fonte de tensão (PS1) foi dispensada, ainda que se faça a sugestão da sua inclusão em possíveis trabalhos futuros. Apesar disso, e em caso de necessidade, é possível abrir o quadro elétrico e verificar a partir do próprio equipamento, se este se encontra com um funcionamento adequado ou não. Além dos sinais já referidos, existem outros dois atuados através de um interruptor rotativo físico ao invés da seleção virtual, mais uma vez, devido à limitação do número de canais existentes na placa de

aquisição de dados disponível. Estes dois sinais são referentes a funções do *driver*: escolha do sentido de rotação do servomotor e escolha do modo de controlo, devendo ser corretamente seleccionados para o bom funcionamento do sistema. Na Tabela 5.1 apresenta-se um resumo dos sinais analógicos e digitais que entram e saem do computador.

Tabela 5.1 – Quadro-resumo das entradas e saídas analógicas e digitais do computador.

Entrada Analógica	Saída Analógica	Entrada Digital	Saída Digital
Sinal dos extensómetros	Referência de velocidade para o <i>driver</i>	Sinais do <i>encoder</i> (A, Z, B)	Fim ensaio
-	-	Botoneira de emergência (EMERG)	OK ensaio
-	-	Fim de curso (RFDC)	PC emerg

Nesta fase convém relembrar que toda a interface elaborada e a lógica de comando implementada incidem apenas na execução do ensaio de tração, uma vez que para efeitos desta dissertação este vai ser o único tipo de ensaio disponível na máquina requalificada.

Naturalmente, durante o ensaio o computador estará a receber e a enviar sinais, em tempo real, através das entradas e saídas digitais ou analógicas da placa de aquisição de dados, e como tal, as transições entre estados do sistema podem ser impostas tanto por *software* como por *hardware*. A Figura 5.1 mostra o diagrama de estados que se aplica ao sistema desenvolvido, mais concretamente ao ensaio de tração a executar na máquina requalificada. Logo de seguida, e de forma a facilitar a sua compreensão, são descritas com algum pormenor todas as ações, transições e etapas consideradas.

- X3 Início do ensaio;
Motor para. Aparece mensagem de alerta informando que foi ativada uma situação de emergência, ou que o fim de curso foi atingido, ou ainda que o valor da capacidade máxima da célula de carga foi alcançado. Aqui, o utilizador deve ser reencaminhado para fazer o *reset* dos parâmetros;
- X4 Motor para. Aparece mensagem a comunicar que o ensaio terminou, uma vez que se deu a rotura do provete, reencaminhando o utilizador para a página referente aos resultados do ensaio;
- X5 Motor para. O sinalizador LALM é ligado, indicando que o *driver* não está bem.

5.2 Construção da Interface Gráfica

Na presente dissertação, a interface gráfica exerce um papel fundamental uma vez que o público alvo da máquina, isto é, os seus utilizadores serão maioritariamente alunos, e como tal, o seu uso será sobretudo de natureza académica. Desta forma, a interface deve ser construída e pensada com esse pressuposto para que seja o mais adequada e *user friendly* para os seus utilizadores. Aliado a este fator, pretende-se que a máquina requalificada apresente as características funcionais da máquina na sua versão antiga, nomeadamente a oportunidade de registo ao longo do ensaio do gráfico força *vs.* deslocamento, de forma a acompanhar o desempenho do material em tempo real.

Tal como já foi referido anteriormente, o *software* escolhido para o desenvolvimento quer da interface, quer de todo o comando do sistema, foi o *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)*, programa desenvolvido pela *National Instruments*. Trata-se de um *software* que permite a aquisição de dados a partir de variados instrumentos, o processamento de sinal, a análise dos dados, bem como o controlo de equipamentos e instrumentos [25]. Para garantir a facilidade do processo de aquisição de dados, a *National Instruments* disponibiliza um conjunto de placas de aquisição de dados, que são imediatamente reconhecidas pelo *software*, fazendo com que a configuração das respetivas portas seja acessível e rápida. O *LabVIEW* faz uso de uma linguagem de programação gráfica, e como tal, encontram-se disponíveis inúmeras funções sob a forma de blocos, que devidamente conetados, executam as mais diversas tarefas. Este *software* foi criado com o principal objetivo de proporcionar a aquisição de sinais de equipamentos e, por esse motivo, dispõe de ferramentas muito diversificadas e variadas para a criação de interfaces interativas e atrativas.

Um projeto em *LabVIEW* é designado por *Virtual Instrument (VI)* ou, em português, Instrumento Virtual e é composto por duas partes. A primeira, o painel frontal (*front panel*)

representa a interface gráfica desenvolvida, onde se podem incluir por exemplo, botões, sinalizadores, gráficos e indicadores. A segunda, o diagrama de blocos (*diagram block*) contém todos os elementos de programação que são ligados entre si, e que são responsáveis pelo comando do sistema.

De seguida mostra-se a interface construída com referências oportunas às etapas retratadas no diagrama de estados descrito na secção 5.1.

A janela inicial é ilustrada na Figura 5.2 e, como se pode ver, além da apresentação do trabalho e das respetivas informações técnicas, dispõe apenas de um botão ‘Início’ que quando premido remete o utilizador para a página principal do teste. De notar que todas as páginas podem ser acessíveis na parte superior através do respetivo separador, apesar de existirem em todas as páginas mecanismos (botões) para navegar entre elas sem necessidade de recorrer aos separadores.



Figura 5.2 – Página inicial da interface gráfica desenvolvida.

Neste momento e ao avançar para a página do teste, o sistema já se deve encontrar na etapa X2 (diagrama de estados, Figura 5.1), aguardando que as condições para o início do ensaio sejam cumpridas. Na Figura 5.3 mostra-se a página principal de teste.

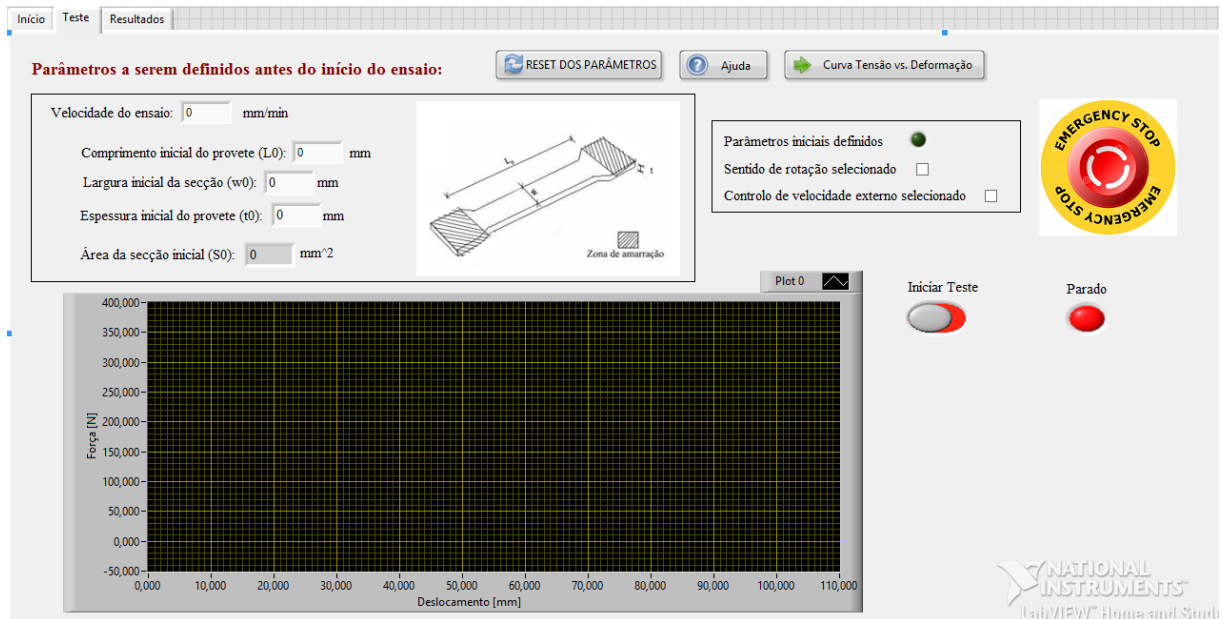


Figura 5.3 – Página principal de teste da interface gráfica desenvolvida.

Nesta janela poder-se-á acompanhar a formação do gráfico força vs. deslocamento durante o ensaio; no entanto, antes disso, e para que seja possível dar-se início ao ensaio, é necessário definir os parâmetros: velocidade do ensaio e as características dimensionais do provete a ensaiar. Estas últimas características são bastante importantes para, numa fase posterior à conclusão do ensaio, ser possível construir o gráfico tensão (σ) vs. deformação (ϵ). Assim, através de programação o ensaio está impedido de ser iniciado enquanto esses parâmetros não estiverem definidos. Quando estiver tudo parametrizado, o indicador luminoso ‘Parâmetros iniciais definidos’ acende-se. Adicionalmente, deve ser confirmado que foi feita, através dos interruptores rotativos adequados, a seleção tanto do sentido de rotação do motor, como da forma de controlo da velocidade. Colocando *check* nestes dois pontos, e tendo o sinalizador luminoso (‘Parâmetros iniciais definidos’) ligado, está tudo pronto para se premir o botão ‘Iniciar Teste’ e o ensaio começar: está-se então na etapa X3 (diagrama de estados, Figura 5.1). De realçar que se incluiu, sempre que se achou conveniente, um botão ‘Ajuda’ que faz surgir uma mensagem explicativa dos passos a serem seguidos para assegurar um correto uso da interface e do sistema por parte do utilizador. Este botão ‘Ajuda’ remete para a mensagem que se ilustra na Figura 5.4.

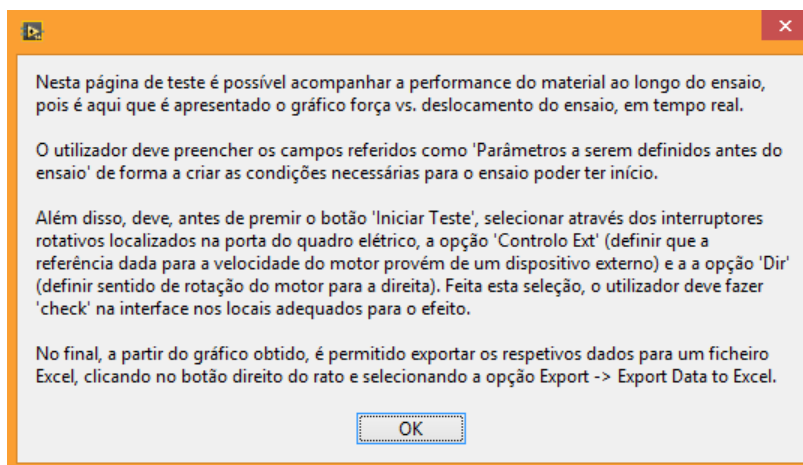
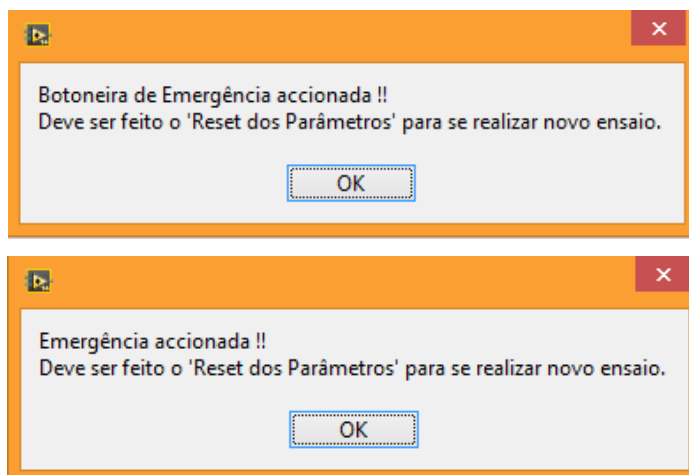


Figura 5.4 – Mensagem disponibilizada pelo botão ‘Ajuda’ na página de teste.

A página do teste contém ainda um botão de emergência que deve ser acionado pelo utilizador em situações de emergência. Neste caso, ou quando ocorre a atuação da botoneira de emergência física, ou o fim de curso é atingido ou ainda quando a capacidade máxima da célula de carga é atingida, a etapa X4 (diagrama de estados, Figura 5.1) é ativada e aparecem as mensagens apresentadas na Figura 5.5, conforme a transição verificada. Em qualquer um dos casos remete-se ao utilizador que faça o ‘Reset dos Parâmetros’, clicando no botão virtual adequado para o efeito.



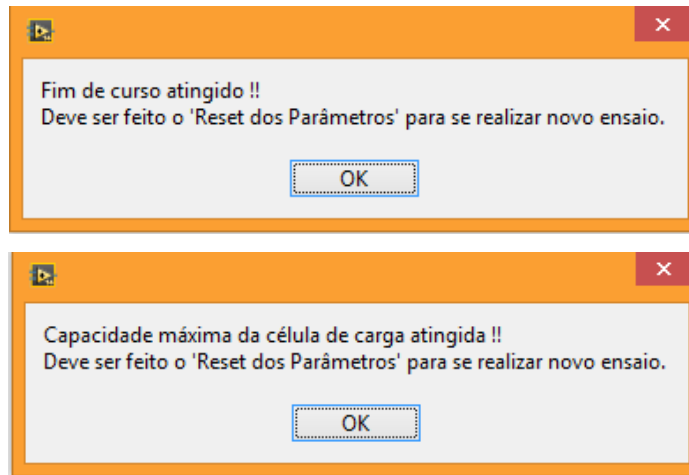


Figura 5.5 – Mensagens relativas à etapa X4, de acordo com a respetiva transição.

Feito o *reset* dos parâmetros, o sistema volta à etapa X2 (diagrama de estados, Figura 5.1).

Em situações em que o ensaio não seja interrompido, o fim do ensaio é determinado pelo momento da rotura do provete. A deteção do fim do ensaio está implementada por *software* e é feita a partir de uma avaliação dos valores de força obtidos. Quando se dá a rotura do provete, o valor da força medida sofre uma variação considerável, caindo para um valor que, idealmente, será zero. Pretende-se então determinar em permanência a diferença entre o valor medido e um determinado valor anterior, de forma a que a diferença entre eles seja suficiente para ser detetada. Quando essa diferença for superior a um determinado limiar, por exemplo 20 N, e quando o valor atual medido for inferior a 40 N, é enviado um sinal que provocará a paragem do motor. Neste instante é ativada a etapa X5 (diagrama de estados, Figura 5.1) e mostrada uma mensagem a informar que o ensaio chegou ao fim, tal como exemplificado na Figura 5.6.

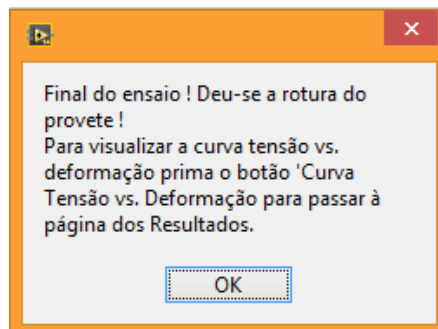


Figura 5.6 – Mensagem relativa à etapa X5.

De realçar ainda que clicando no botão do lado direito do rato sobre o gráfico força vs. deslocamento há a possibilidade de exportar os referidos dados para um ficheiro *Excel*, tanto numa perspetiva de guardar a informação relativa ao ensaio, como também de a partir daí fazer o tratamento de resultados que se pretender. Posto isto e concluído o ensaio, o utilizador poderá premir o botão ‘Curva Tensão vs Deformação’ que o irá remeter para a página corresponde aos resultados, representada na Figura 5.7.

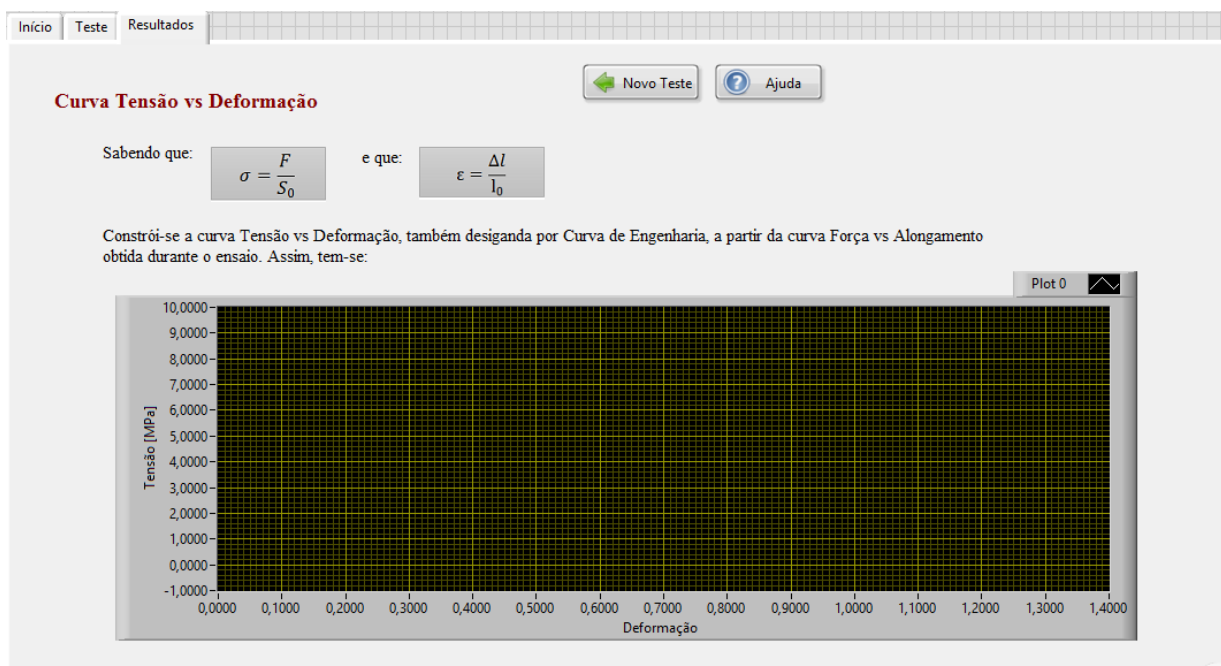


Figura 5.7 – Página dos resultados da interface gráfica desenvolvida.

Neste momento, o gráfico força vs. deslocamento obtido é convertido num gráfico tensão vs. deformação; a conversão é feita com recurso à programação. Mais uma vez, dispõe-se de um botão de ‘Ajuda’ com a mensagem que se mostra na Figura 5.8. Clicando com o botão do lado direito do rato sobre o gráfico tensão vs. deformação, há a possibilidade de exportar os referidos dados para um ficheiro *Excel*, tanto numa perspetiva de guardar a informação relativa ao ensaio, como também de a partir daí fazer o tratamento de resultados. Com estes dados torna-se possível o cálculo de algumas propriedades mecânicas, como por exemplo: o módulo de elasticidade, a tensão limite de elasticidade, a tensão de rotura, a extensão após rotura, entre outras que se considerem relevantes.

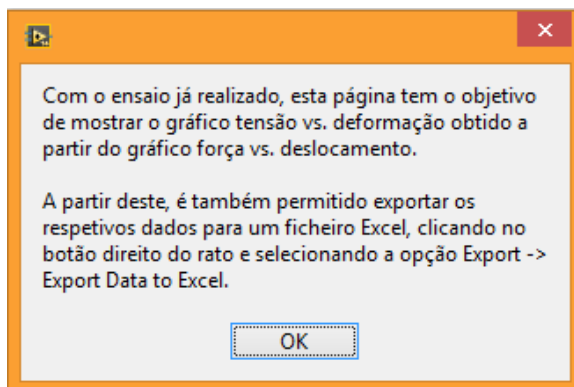


Figura 5.8 – Mensagem disponibilizada pelo botão ‘Ajuda’ na página de resultados.

Além do botão de ‘Ajuda’ disponibiliza-se também um botão de ‘Novo Teste’. Este botão permite que se retorne à página de teste onde deverá ser feito o *reset* dos parâmetros, de forma a reunir as condições necessárias à execução de novo ensaio. Feito o *reset* dos parâmetros do ensaio anterior, o sistema volta à etapa X2 (diagrama de estados, Figura 5.1).

6. Verificação Experimental

O presente capítulo tem como principal objetivo fazer a validação do funcionamento de todo o sistema concebido. Assim, procedeu-se à execução do ensaio de tração no HT de dois provetes de diferentes polímeros e de dimensões normalizadas. Para cada caso, apresentam-se os resultados obtidos tanto na forma gráfica de força (F) vs. deslocamento (Δl) como na forma gráfica de tensão (σ) vs. deformação (ε). Adicionalmente foram calculados o módulo de elasticidade (E) e a tensão de rotura (σ_r) para possibilitar a comparação entre os parâmetros obtidos a partir do ensaio de cada provete no HT e os mesmos valores obtidos, com as mesmas condições de ensaio realizado numa outra máquina de ensaios mecânicos (Instron 4507), disponível no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI).

6.1 Preparação do Ensaio e Resultados Obtidos

Tal como referido no capítulo anterior, capítulo 5, antes de se proceder ao ensaio é necessário fazer algumas medições no que diz respeito às dimensões do provete a ser utilizado no ensaio. Este passo é de extrema importância, uma vez que sem ele não seria possível a construção do gráfico tensão (σ) vs. deformação (ε). Como foram executados dois ensaios à tração a materiais distintos, vai-se, a partir deste momento designar como Ensaio 1, o ensaio realizado aos provetes que não atingiram a rotura (Provetes tipo 1) e Ensaio 2, o ensaio realizado aos provetes que atingiram a rotura (Provetes tipo 2). Usou-se esta designação uma vez que se desconhecia à partida o material polimérico de cada provete. Nas Figuras 6.1 e 6.2 ilustram-se os provetes usados nos Ensaio 1 e 2, respetivamente.



Figura 6.1 – Imagem do Provete tipo 1 antes do ensaio.



Figura 6.2 – Imagem do Provete tipo 2 antes do ensaio.

Uma vez que se tratam de provetes normalizados, as suas dimensões são semelhantes, pelo que, e apesar de terem sido ensaiados 3 provetes de cada tipo, as suas dimensões, resumidas na Tabela 6.1, devem ser consideradas iguais para todos os provetes de cada tipo.

Tabela 6.1 – Dimensões dos provetes tipo 1 e 2 ensaiados.

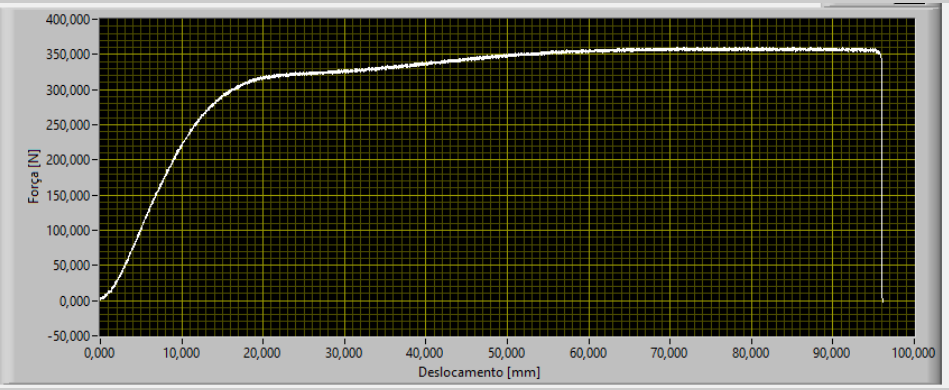
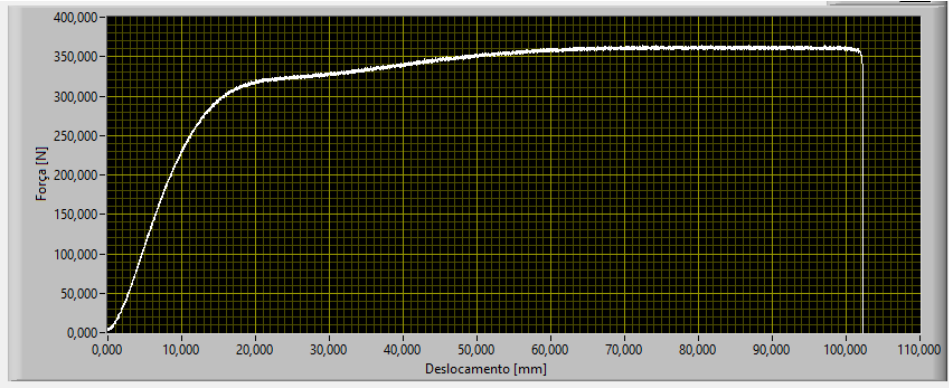
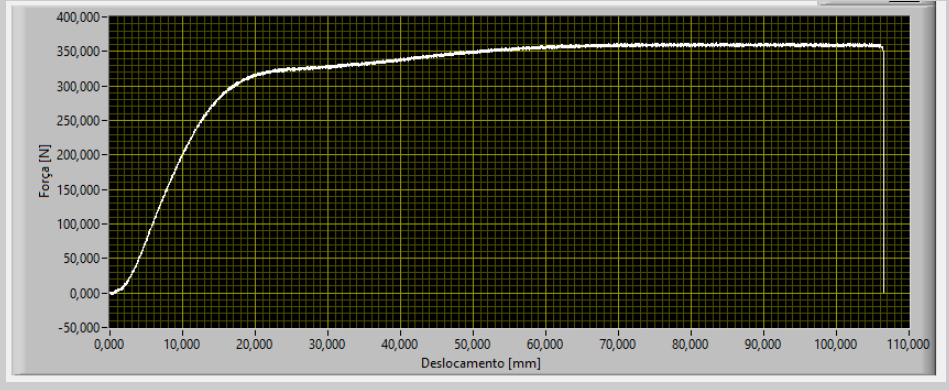
	Provete tipo 1	Provete tipo 2
Comprimento inicial do provete (l_0)	77,2 mm	77,2 mm
Largura inicial da secção (w_0)	10 mm	10 mm
Espessura inicial do provete (t_0)	4 mm	4 mm

Além dos parâmetros dimensionais deve-se igualmente definir a velocidade do ensaio. Com a requalificação tecnológica feita à máquina relembra-se que é possível escolher uma velocidade de ensaio compreendida entre 2 a 20 mm/min. De realçar que tanto o Ensaio 1 como o Ensaio 2 foram realizados à velocidade máxima permitida de 20 mm/min. Reunidas todas as condições para o início do ensaio, foi premido o botão virtual ‘Iniciar Teste’ e desta forma deu-se lugar ao ensaio. Ao longo do ensaio é possível acompanhar a performance do material através da construção sucessiva, ao longo do tempo, da curva F vs. Δl . De notar que não se deu a rotura do Provete 1 e como tal, o ensaio foi interrompido manualmente. No entanto, para efeitos de validação do trabalho realizado, os resultados obtidos, até esse instante, revelaram-se suficientes. Nas Tabelas 6.2 e 6.3 mostram-se os gráficos da F vs. Δl obtidos, para cada provete testado (3 testes para cada tipo de provete), no final do Ensaio 1 e 2, respetivamente.

Tabela 6.2 – Curvas F vs. Δl obtidas para os três provetes testados no Ensaio 1.

Provetes tipo 1	Curva F vs. Δl
Provete A	
Provete B	
Provete C	

Tabela 6.3 – Curvas F vs. Δl obtidas para os três provetes testados no Ensaio 2.

Provetes tipo 2	Curva F vs. Δl
Provete A'	 <p>The graph for specimen A' shows a force-displacement curve. The y-axis is labeled 'Força [N]' and ranges from -50,000 to 400,000 with major ticks every 50,000. The x-axis is labeled 'Deslocamento [mm]' and ranges from 0,000 to 100,000 with major ticks every 10,000. The curve starts at (0,0), rises steeply to about 300,000 N at 20,000 mm, then continues to rise more gradually to a peak of approximately 360,000 N at 95,000 mm, before dropping sharply to zero.</p>
Provete B'	 <p>The graph for specimen B' shows a force-displacement curve. The y-axis is labeled 'Força [N]' and ranges from 0,000 to 400,000 with major ticks every 50,000. The x-axis is labeled 'Deslocamento [mm]' and ranges from 0,000 to 110,000 with major ticks every 10,000. The curve starts at (0,0), rises steeply to about 300,000 N at 20,000 mm, then continues to rise more gradually to a peak of approximately 360,000 N at 105,000 mm, before dropping sharply to zero.</p>
Provete C'	 <p>The graph for specimen C' shows a force-displacement curve. The y-axis is labeled 'Força [N]' and ranges from -50,000 to 400,000 with major ticks every 50,000. The x-axis is labeled 'Deslocamento [mm]' and ranges from 0,000 to 110,000 with major ticks every 10,000. The curve starts at (0,0), rises steeply to about 300,000 N at 20,000 mm, then continues to rise more gradually to a peak of approximately 360,000 N at 105,000 mm, before dropping sharply to zero.</p>

Nas Figuras 6.3 e 6.4 ilustra-se um exemplo do estado final dos provetes tipo 1 e 2 após realização do ensaio, respetivamente.



Figura 6.3 – Imagem do Provete tipo 1 no final do ensaio.



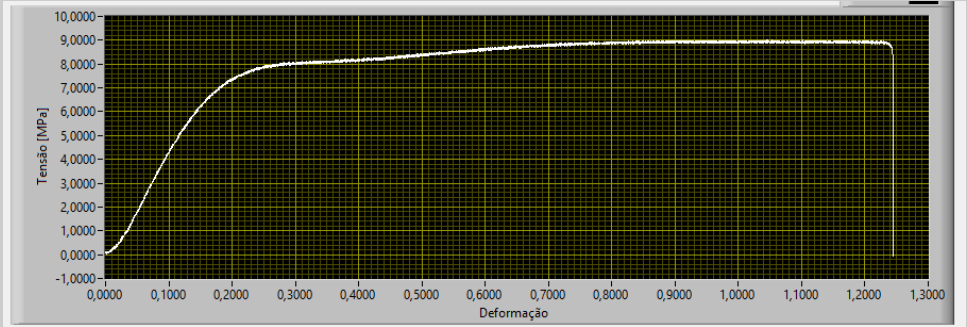
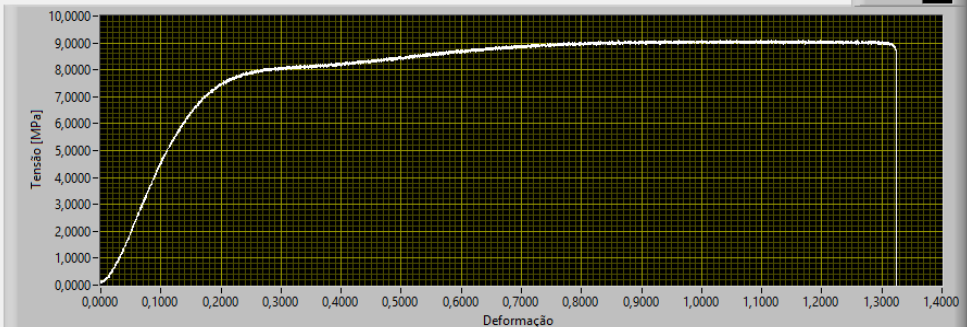
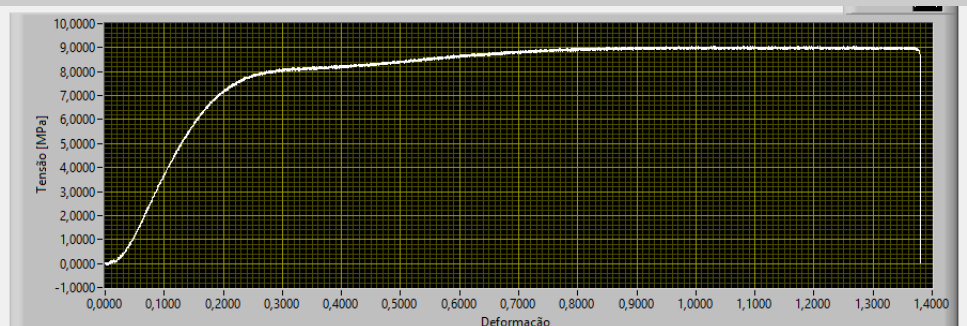
Figura 6.4 – Imagem do Provete tipo 2 no final do ensaio.

No final dos ensaios, e com as curvas F vs. Δl completas, torna-se possível exportar o conjunto desses dados para uma folha de cálculo em *Excel* de forma a posteriormente poder ser feito o tratamento dos respetivos dados de acordo com a vontade de cada utilizador. Passando para a página de resultados da interface gráfica, é possível observar-se a representação gráfica da curva σ vs. ε , da qual é igualmente permitido exportar o conjunto dos seus dados para outra folha de cálculo em *Excel*, e a partir daí proceder-se ao cálculo das várias propriedades mecânicas que sejam relevantes. Nas Tabelas 6.4 e 6.5 mostram-se os gráficos da σ vs. ε obtidos, para cada provete testado, no final do Ensaio 1 e 2, respetivamente.

Tabela 6.4 – Curvas σ vs. ϵ obtidas para os três provetes testados no Ensaio 1.

Provetes tipo 1	Curva σ vs. ϵ
Provete A	
Provete B	
Provete C	

Tabela 6.5 – Curvas σ vs. ϵ obtidas para os três provetes testados no Ensaio 2.

Provetes tipo 2	Curva σ vs. ϵ
Provete A'	 <p>Gráfico de tensão vs. deformação para o provete A'. O eixo vertical (Tensão [MPa]) varia de -1.0000 a 10.0000. O eixo horizontal (Deformação) varia de 0,0000 a 1,3000. A curva mostra um comportamento elástico inicial, seguido por uma região de escoamento e uma região de endurecimento até atingir uma tensão máxima de aproximadamente 8.8000 MPa antes de romper.</p>
Provete B'	 <p>Gráfico de tensão vs. deformação para o provete B'. O eixo vertical (Tensão [MPa]) varia de 0,0000 a 10,0000. O eixo horizontal (Deformação) varia de 0,0000 a 1,4000. A curva mostra um comportamento elástico inicial, seguido por uma região de escoamento e uma região de endurecimento até atingir uma tensão máxima de aproximadamente 9.0000 MPa antes de romper.</p>
Provete C'	 <p>Gráfico de tensão vs. deformação para o provete C'. O eixo vertical (Tensão [MPa]) varia de -1,0000 a 10,0000. O eixo horizontal (Deformação) varia de 0,0000 a 1,4000. A curva mostra um comportamento elástico inicial, seguido por uma região de escoamento e uma região de endurecimento até atingir uma tensão máxima de aproximadamente 8.8000 MPa antes de romper.</p>

Com os dados referentes à tensão e à deformação dispostos numa folha de cálculo, foi determinado o módulo de elasticidade e a tensão de rotura para cada provete dos tipos 1 e 2. Para isso, selecionaram-se apenas os valores relativos à parte elástica dos mesmos gráficos e a partir da determinação das retas de tendência, obtiveram-se os módulos de elasticidade que são numericamente iguais aos valores dos declives das referidas retas. A tensão de rotura é dada pela tensão máxima verificada na curva σ vs. ϵ , e por isso, é facilmente determinada. Os valores obtidos para o módulo de elasticidade e para a tensão de rotura de cada provete dos tipos 1 e 2, encontram-se resumidos na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Quadro-resumo dos valores calculados do módulo de elasticidade (E) e da tensão de rotura (σ_r) de cada provete nos Ensaio 1 e 2, realizados no HT.

Ensaio/Proвете		Módulo de Elasticidade (E) [MPa]	Tensão de Rotura (σ_r) [MPa]
Ensaio 1	Proвете A	241,26	27,93
	Proвете B	233,51	27,87
	Proвете C	215,61	27,40
Ensaio 2	Proвете A'	46,45	9,00
	Proвете B'	48,21	9,11
	Proвете C'	40,12	9,06

6.2 Análise Crítica dos Resultados

A partir dos ensaios de tração descritos e fazendo uma apreciação global aos resultados obtidos pode-se considerar que estes ensaios correram dentro do que era esperado. Apesar de se tratar de um ensaio de tração, que deve terminar com a rotura do provete, verificou-se que no Ensaio 1 não se deu a rotura, terminando assim o ensaio quando foi atingido o fim de curso. Neste caso, as dimensões do provete tipo 1 usado não se encontram adequadas ao HT, dada a sua limitação ao nível do curso disponível para o ensaio e da velocidade máxima de ensaio permitida. No entanto, e como já foi dito, este fator não pôs em causa a validade dos resultados obtidos.

Ainda, e considerando apenas os resultados obtidos nesta verificação experimental do trabalho, conclui-se que estes possuem reprodutibilidade, salvo ligeiras diferenças que podem ser explicadas por pequenas divergências existentes no material de cada provete e por eventuais diferenças dimensionais entre os provetes testados.

Dado desconhecer-se o material dos dois tipos de provetes ensaiados, a validação dos resultados obtidos é feita por comparação dos resultados alcançados pelo HT, com os resultados alcançados por uma máquina de ensaios universal, Instron 4507, disponível no INEGI. Foram criadas as mesmas condições de ensaio (velocidade de ensaio de 20 mm/min) e foram

tracionados três provetes de cada tipo com dimensões semelhantes aos provetes testados no HT. Nas Figuras 6.5 e 6.6 apresentam-se as curvas σ vs. ε resultantes dos ensaios feitos no INEGI, em três provetes dos tipos 1 e 2, respectivamente.

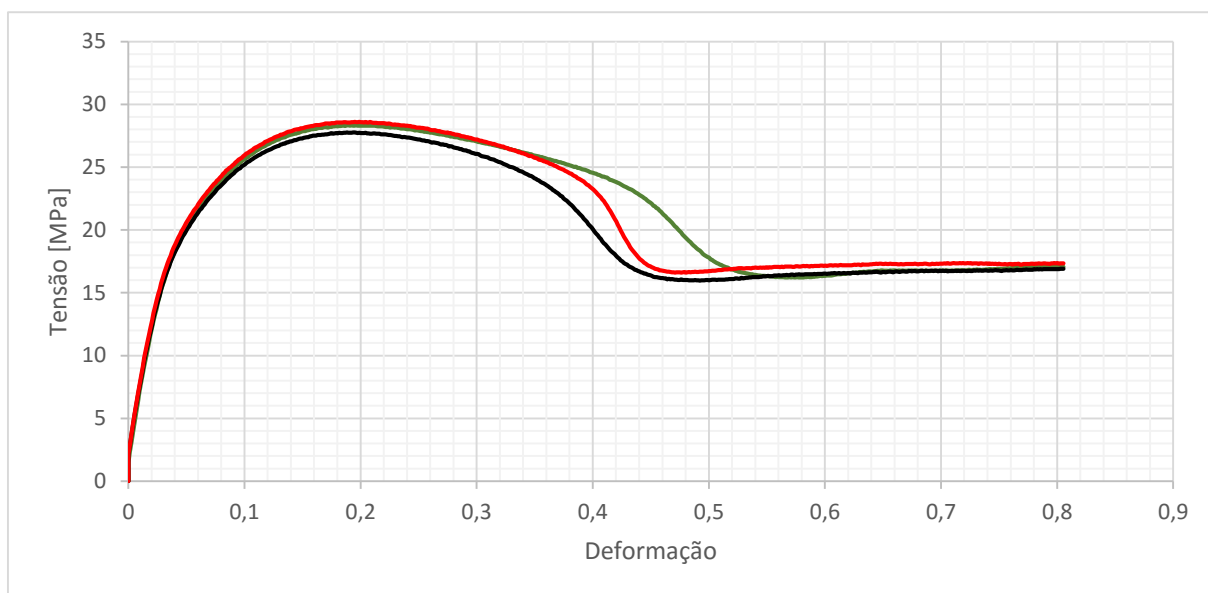


Figura 6.5 – Curvas σ vs. ε resultantes dos ensaios feitos a três provetes do tipo 1 (Provete A – verde; Provete B – preto; Provete C – vermelho).

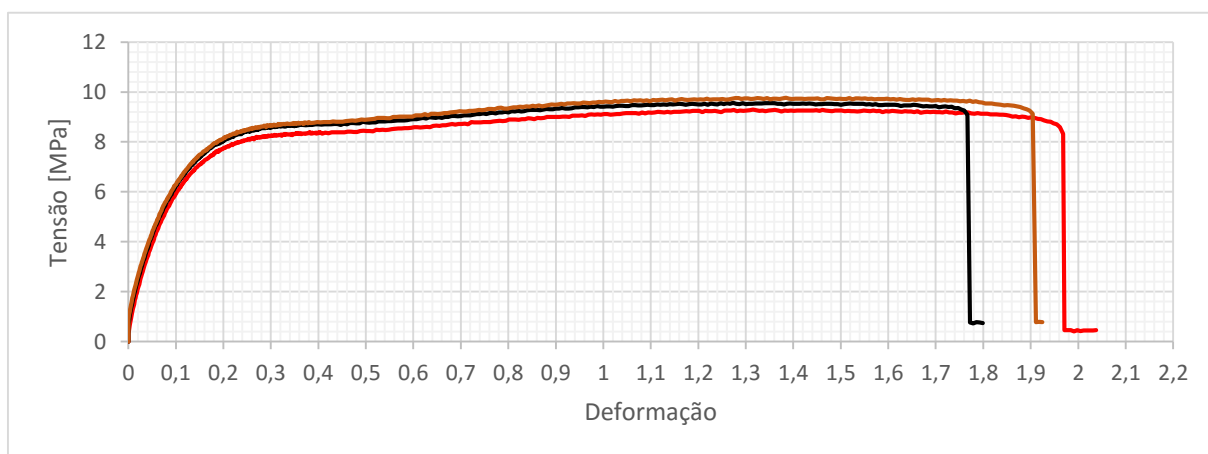


Figura 6.6 – Curvas σ vs. ε resultantes dos ensaios feitos a três provetes do tipo 2 (Provete A' – vermelho; Provete B' – preto; Provete C' – castanho).

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5 com as curvas apresentadas nas Figuras 6.5 e 6.6, respectivamente, conclui-se que apresentam formas muito semelhantes, o que sugere uma boa correlação entre os resultados obtidos nas duas máquinas. Com os dados obtidos a partir das curvas σ vs. ε , Figuras 6.5 e 6.6, foram igualmente calculados

o módulo de elasticidade e a tensão de rotura para cada provete ensaiado; os resultados encontram-se resumidos na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Quadro-resumo dos valores calculados do módulo de elasticidade (E) e da tensão de rotura (σ_r) de cada provete nos Ensaio 1 e 2, realizados na Instron 4507.

Ensaio/Provette		Módulo de Elasticidade (E) [MPa]	Tensão de Rotura (σ_r) [MPa]
Ensaio 1	Provette A	362,22	28,32
	Provette B	255,27	27,76
	Provette C	246,51	28,61
Ensaio 2	Provette A'	42,89	9,29
	Provette B'	44,53	9,56
	Provette C'	43,72	9,77

Comparando os valores do E e da σ_r apresentados na Tabela 6.6 (HT) com os mesmos valores apresentados na Tabela 6.7 (Instron 4507) conclui-se que, salvo algumas diferenças, os valores obtidos são em tudo semelhantes, apresentando-se dentro da mesma ordem de grandeza.

Por último e de forma a ilustrar as semelhanças mencionadas, sobrepôs-se a curva σ vs. ϵ referente ao Provete B do Ensaio 1, testado na Instron 4507, com as curvas σ vs. ϵ referentes aos Provetes A e B também do Ensaio 1, testados no HT, como se apresenta na Figura 6.7.

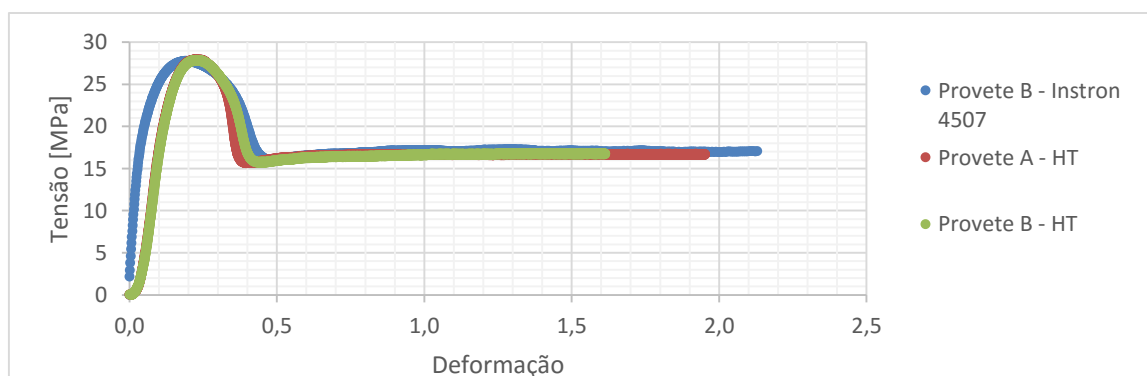


Figura 6.7 – Curvas σ vs. ϵ sobrepostas referentes ao Ensaio 1 dos Provetes A e B testados no HT e do Provete B testado na Instron 4507.

Simultaneamente apresenta-se na Figura 6.8 as curvas σ vs. ϵ sobrepostas referentes ao Ensaio 2 dos Provete A' e C' testados no HT e do Provete B' testado na Instron 4507.

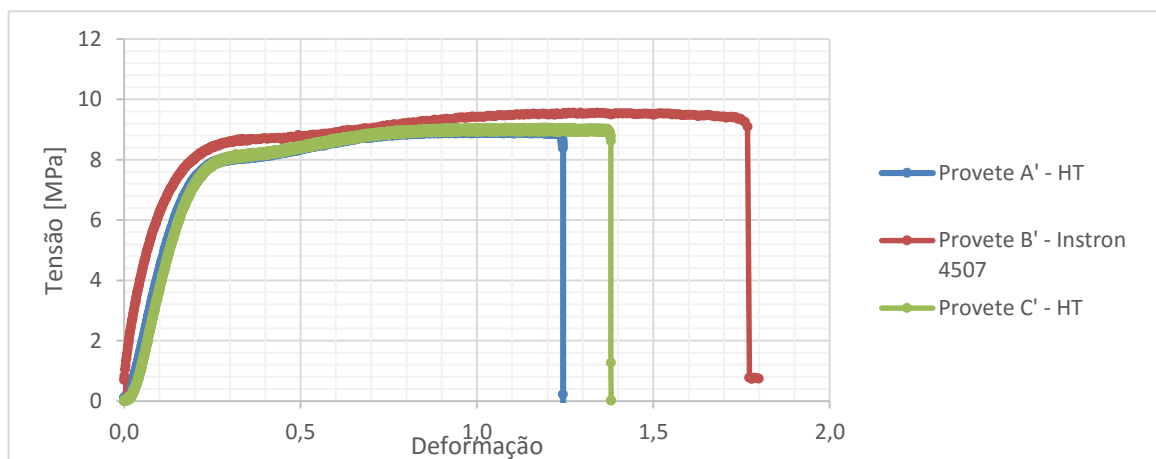


Figura 6.8 – Curvas σ vs. ϵ sobrepostas referentes ao Ensaio 2 dos Provete A' e C' testados no HT e do Provete B' testado na Instron 4507.

Assim, e perante os resultados obtidos foi possível validar todo o trabalho realizado na requalificação tecnológica da máquina de ensaios *Hounsfield Tensometer*.

7. Considerações Finais

7.1 Conclusões

Neste trabalho procedeu-se à automatização de uma máquina *Hounsfield Tensometer* para ensaios mecânicos, existente no DEMec, que se encontrava tecnologicamente desatualizada, e por isso fora de uso. Atualmente existem vários modelos da referida máquina à disposição de estudantes em universidades estrangeiras. Assim, aliado ao desejo de ter a máquina *Hounsfield Tensometer* existente no DEMec operacional, decidiu proceder-se à sua requalificação tecnológica de forma a proporcionar também o seu uso aos estudantes da FEUP.

Numa primeira fase do trabalho, foi feita uma pesquisa alargada sobre as máquinas de ensaios mecânicos, dando-se especial ênfase aos modelos da *Hounsfield Tensometer* comerciais e automatizados, designados por *Electronic Tensometer*.

Após o estudo dos referidos modelos reuniu-se um conjunto de informações relevantes sobre o seu funcionamento, os seus componentes mecânicos e componentes extra, entre eles o conjunto de atuação (motor e sistema de transmissão) e o aparelho de registo automático das representações gráficas. Paralelamente, foi também feito o estudo de alguns aspetos fundamentais da máquina *Hounsfield Tensometer* antiga, tais como as determinações experimentais das velocidades de ensaio e da cadeia de transmissão, ainda com os componentes originais. As experiências permitiram conhecer melhor o comportamento de alguns constituintes da máquina, definir o tipo de ensaios a realizar – ensaios de tração – e, em função disso propuseram-se as primeiras alterações a realizar.

Concluída a análise prévia do sistema, passou-se à definição do projeto de automação. Desta forma, começou por fazer-se a seleção e aquisição dos componentes de atuação mecânica e instrumentação. Relativamente ao primeiro, foi escolhido um conjunto compacto constituído por um servomotor e um redutor planetário, de acordo com o dimensionamento realizado e com as especificações relativas às velocidades de ensaio definidas. Para fazer o controlo do

servomotor foi necessário também fazer a aquisição de um *driver*, compatível com o conjunto selecionado. Por sua vez, o *driver* é controlado através de um computador portátil recorrendo ao *software LabVIEW*, usado também para o controlo de todo o sistema. Os sinais do *driver* são enviados para o computador através de uma placa de aquisição de dados NI myDAQ, que permite receber e enviar sinais analógicos e digitais para o comando e controlo da máquina automatizada.

Durante um ensaio de tração, as grandezas importantes a medir são a força e o deslocamento do provete. Assim, projetou-se que a medição da força fosse feita a partir de uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kgf, construída a partir da implementação de 4 extensómetros, numa montagem em ponte de *Wheastone* usando as barras, que na versão antiga da máquina, faziam parte do processo de medição da força. A medição do deslocamento do provete, passou a ser realizada a partir dos sinais do *encoder*, integrado no servomotor, e provenientes do *driver*.

Como todos os componentes referidos necessitam de energia elétrica para funcionarem foi indispensável fazer também o projeto de um quadro elétrico que fosse capaz não só de fornecer a potência requerida pelos vários componentes do sistema, como também de ser capaz de realizar o condicionamento de sinal e o corte de energia e proteção dos equipamentos em situações anormais ou em situações de emergência, salvaguardando tanto os utilizadores da máquina, como todo o sistema que a constitui.

Com o intuito de utilizar a máquina de forma correta e efetuar o ensaio pretendido de uma forma simples e clara, foi desenvolvida uma interface gráfica em *LabVIEW*. A partir desta, o utilizador pode definir todos os parâmetros de ensaio, acompanhar a performance do material durante o ensaio com a obtenção do gráfico força (F) vs. deslocamento (Δl) e obter a partir deste o gráfico tensão (σ) vs. deformação (ϵ).

De realçar ainda que, toda a lógica de comando implementada, tanto por *software* como por *hardware*, visou abranger as várias situações que possam ocorrer durante um ensaio de tração, não desprezando nunca a questão da segurança.

Por fim e já com todo o sistema montado e implementado foi possível testá-lo, executando alguns ensaios de tração na máquina e, a partir daí, verificar experimentalmente a validade do que foi feito. Os resultados obtidos no HT foram comparados diretamente com os resultados obtidos nos mesmos ensaios realizados numa outra máquina de ensaios universal, Instron 4507, tendo-se verificado boa correlação, demonstrando assim o bom funcionamento

da máquina *Hounsfield Tensometer* requalificada. De salientar ainda que o preço total desta requalificação foi de, aproximadamente, € 4000.

7.2 Propostas de Trabalho Futuro

As principais propostas de trabalho futuro estão diretamente relacionadas com a possibilidade de estender as capacidades de ensaio da máquina *Housfield Tensometer* já na versão automatizada.

Assim, sugere-se a limpeza das restantes células de carga que se encontram disponíveis e a posterior implementação de novos extensómetros, para se dispor efetivamente de uma máquina de ensaios mecânicos com uma capacidade máxima de 20 kN.

Seria igualmente interessante a aquisição dos acessórios e garras necessários para a realização de ensaios de compressão e de dureza e tornar possível a concretização destes ensaios em materiais metálicos e cerâmicos, devolvendo a versatilidade da máquina original à máquina automatizada. No entanto, este facto implicará várias adaptações na interface gráfica criada, bem como na lógica de comando implementada.

Ao nível da instrumentação sugere-se ainda a aquisição de um transdutor de deslocamento, a ser colocado junto ao local do ensaio, de forma a medir-se diretamente o valor do deslocamento efetivo do provete, não sendo desta forma o valor medido influenciado pelas folgas existentes nas transmissões mecânicas entre o *encoder* e o parafuso de avanço que movimenta as garras. Aliado a isto, e de forma a se obter uma medição da força com mais precisão e rigor, aconselha-se igualmente a aquisição de uma célula de carga adequada às necessidades e requisitos deste tipo de máquinas de ensaios mecânicos a materiais.

Por último, o uso de uma placa de aquisição de dados com mais canais disponíveis para sinais digitais, permitirá a realização de todas as monitorizações propostas inicialmente. Relativamente ao sistema de controlo desenvolvido em *LabVIEW*, sugere-se ainda a sua otimização.

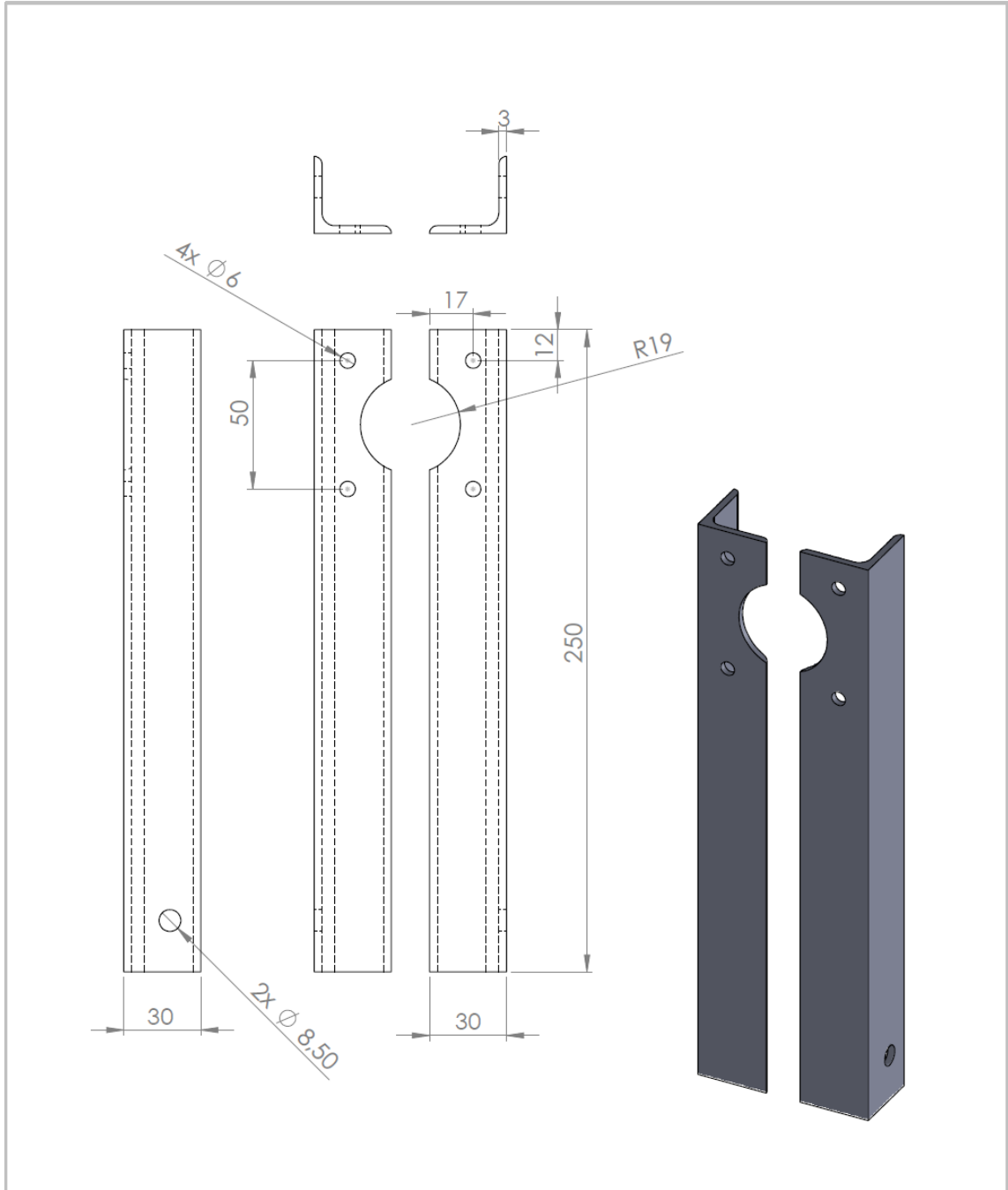
Referências

- [1] <http://www.schooloftesting.com/hounsfield/3-historyhounsfield>, acessado em 30/03/2015.
- [2] *The Hounsfield Tensometer – A Portable Testing Machine with a Wide Range of Utility*, Extracts from *The Automobile Engineer*, The Cornwell Press Ltd, Londres, 1932.
- [3] William D. Callister, Jr. 2007. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Editado por John Wiley & Sons Ltd. USA.
- [4] Davim, J. P. e Magalhães, A. G. 1992. *Ensaio Mecânicos e Tecnológicos*. Editado por Estante Editora. Aveiro, Portugal.
- [5] http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6545#.VcMu3flVhHx, acessado em 15/03/2015.
- [6] Instron, 5960 Dual Column Series for Mechanical Testing, 2013.
- [7] Instron, Industrial Series KPX Models, 2014.
- [8] <http://www.kudaleinstruments.com/pdf/electronic-tensometer-08-09.pdf>, acessado em 10/03/2015.
- [9] Rao, A. P., Murty, B. S., & Chakraborty, M. 2005. Improvement in tensile strength and load bearing capacity during dry wear of Al–7Si alloy by combined grain refinement and modification. *Materials Science and Engineering: A*, 395(1), 323-326.
- [10] Rust, N., Ferg, E. E., & Masalova, I. 2006. A degradation study of isotactic virgin and recycled polypropylene used in lead acid battery casings. *Polymer testing*, 25(1), 130-139.
- [11] Technical Bulletin – Tensometer W, Materials Testing Machine. Monsanto.

- [12] Branco, C. M., Ferreira, J. M., Costa, J. D., Ribeiro, A. S. 2008. Projecto de Órgãos de Máquinas. Editado por Fundação Calouste Gulbenkian. Portugal.
- [13] Budynas, R. G. e Nisbett, J. K. 2015. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Editado por Mc Graw Hill Education. EUA. ISBN: 978-0-07-339820-4.
- [14] http://elearning.iefp.pt/pluginfile.php/47218/mod_resource/content/0/CD-rom/Estudo/Mecanica/D_-_Transmissao_de_Movimento/frame_11.htm, acessado em 18/03/2015.
- [15] Smith, William F. 1996. Principles of Materials Science and Engineering. Editado por Mc Graw-Hill, Inc. 3ª Ed. Nova Iorque, EUA.
- [16] <https://jorgeteofilos.files.wordpress.com/2010/08/epm-apostila-capitulo09-ensaios-mod1.pdf>, acessado em 20/04/2015.
- [17] Oriental Motors, Tuning-Free AC Servo Motor Unit, NX Series – Catalogue.
- [18] Restivo, M. T, Almeida, F. G, Chouzal, M. F, Mendes, J. G, Lopes, M. A. 2008. *Laboratórios de Instrumentação para Medição*. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica. ISBN: 978-972-8025-67-0.
- [19] HBM, Operating Manual, S.G. Amplifier – RM4220.
- [20] <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Protecao-de-Circuitos-Eletricos/Interruptores-Diferenciais-Residuais-DRs-RDW>, acessado em 28/07/2015.
- [21] Oriental Motors, Tuning-Free AC Servo Motor Unit, NX Series – User Manual.
- [22] Paul, C. R., Nasar, S. e Unnewehr, L. E. 1992. *Introduction to Electrical Engineering*. Editado por McGraw- Hill Int Editions, Nova Iorque, EUA.
- [23] Morris, A. S., 2001. *Measurement and Instrumentation Principles*. Editado por Butterworth-Heinemann. 3ª Ed. Oxford, Reino Unido.
- [24] National Instruments, User Guide – NI myDAQ.
- [25] Larsen, R. W. 2011. *LabVIEW for Engineers*. Editado por Prentice Hall. New Jersey, EUA.

Anexos

Anexo A: Desenho de Construção do Suporte Projetado para o Motor



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:				
CHK'D									
APP'V'D									
MFG									
G.A.		SolidWorks Student Edition.			DWG NO.		conjunto_suporte		A4
		For Academic Use Only.			SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1		
		WEIGHT:							

Anexo B: Resultados das Simulações Realizadas na Célula de Carga

Tabela B.1 – Resultados das simulações realizadas na célula de carga, quando imposta uma carga de 100 kgf.

	Carga a 100 kgf
Resultados da tensão provocada	<p>Model name: Part1 Study name: Carga de 100 kg Plot type: Static nodal stress Stress1 Deformation scale: 17.9585</p> <p style="text-align: right;">von Mises (N/m²)</p> <p style="text-align: right;">184.478.816,0 169.105.680,0 153.732.544,0 138.359.408,0 122.986.256,0 107.613.120,0 92.239.984,0 76.866.848,0 61.493.708,0 46.120.572,0 30.747.436,0 15.374.288,0 1.161,3</p> <p style="text-align: right;">→ Yield strength: 530.000.000,0</p> <p style="text-align: center;">Educational Version. For Instructional Use Only</p>
Resultados da deformação provocada	<p>Model name: Part1 Study name: Carga de 100 kg Plot type: Static strain Strain1 Deformation scale: 17.9585</p> <p style="text-align: right;">ESTRN</p> <p style="text-align: right;">6.079e-004 5.572e-004 5.066e-004 4.559e-004 4.053e-004 3.546e-004 3.040e-004 2.533e-004 2.026e-004 1.520e-004 1.013e-004 5.067e-005 7.804e-009</p> <p style="text-align: center;">Educational Version. For Instructional Use Only</p>
Resultados do deslocamento provocado	<p>Model name: Part1 Study name: Carga de 100 kg Plot type: Static displacement Displacement1 Deformation scale: 17.9585</p> <p style="text-align: right;">URES (mm)</p> <p style="text-align: right;">9.338e-001 9.049e-001 8.761e-001 8.472e-001 8.184e-001 7.896e-001 7.607e-001 7.319e-001 7.030e-001 6.742e-001 6.453e-001 6.165e-001 5.877e-001</p> <p style="text-align: center;">Educational Version. For Instructional Use Only</p>

Tabela B.2 – Restantes resultados das simulações realizadas na célula de carga, quando imposta uma carga de 200 kgf.

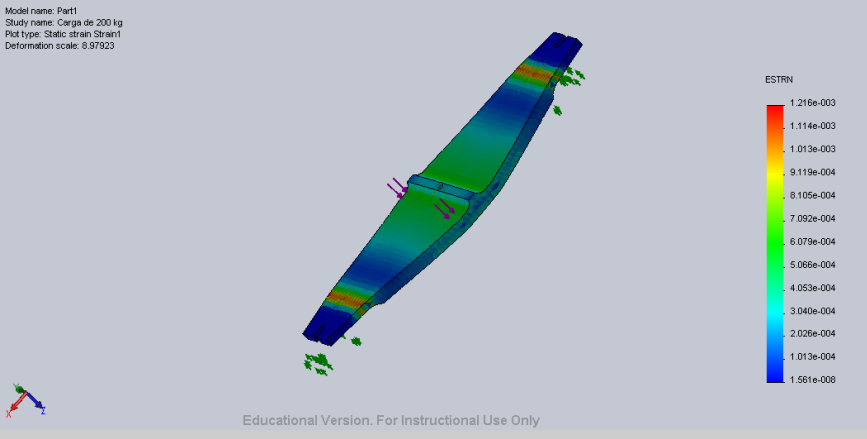
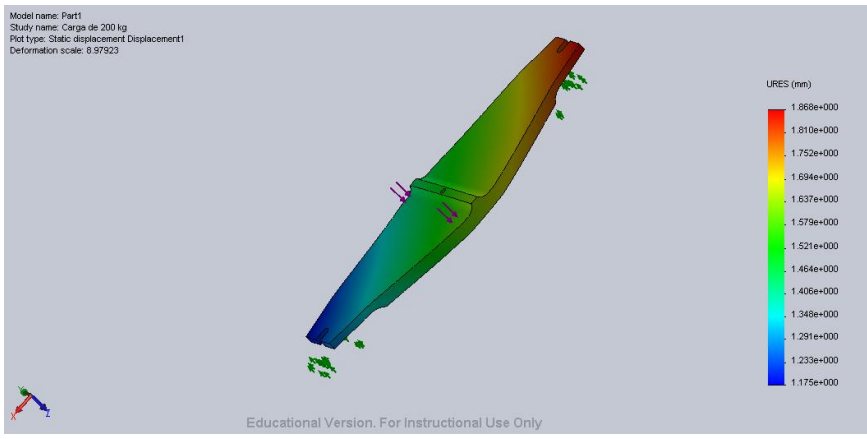
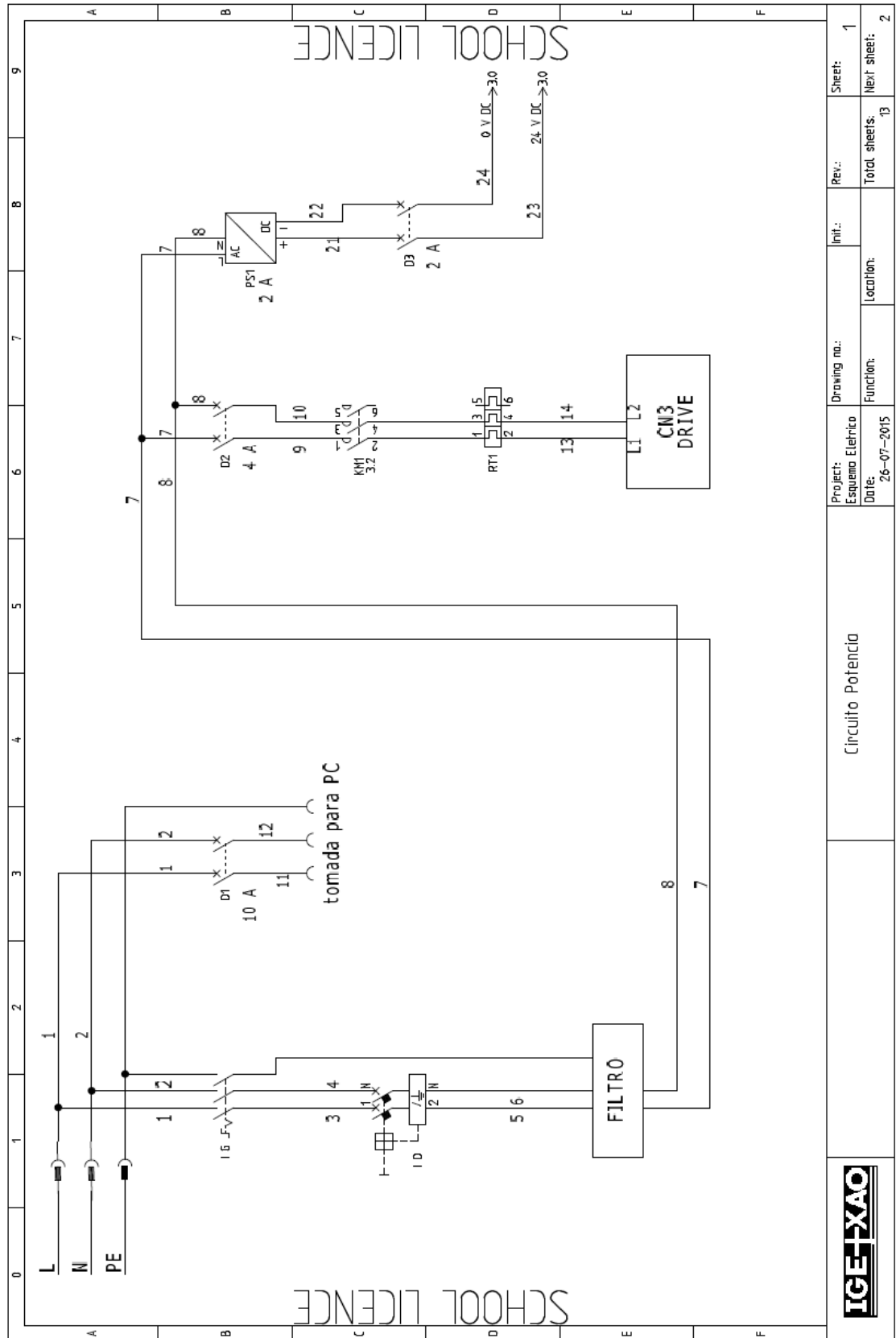
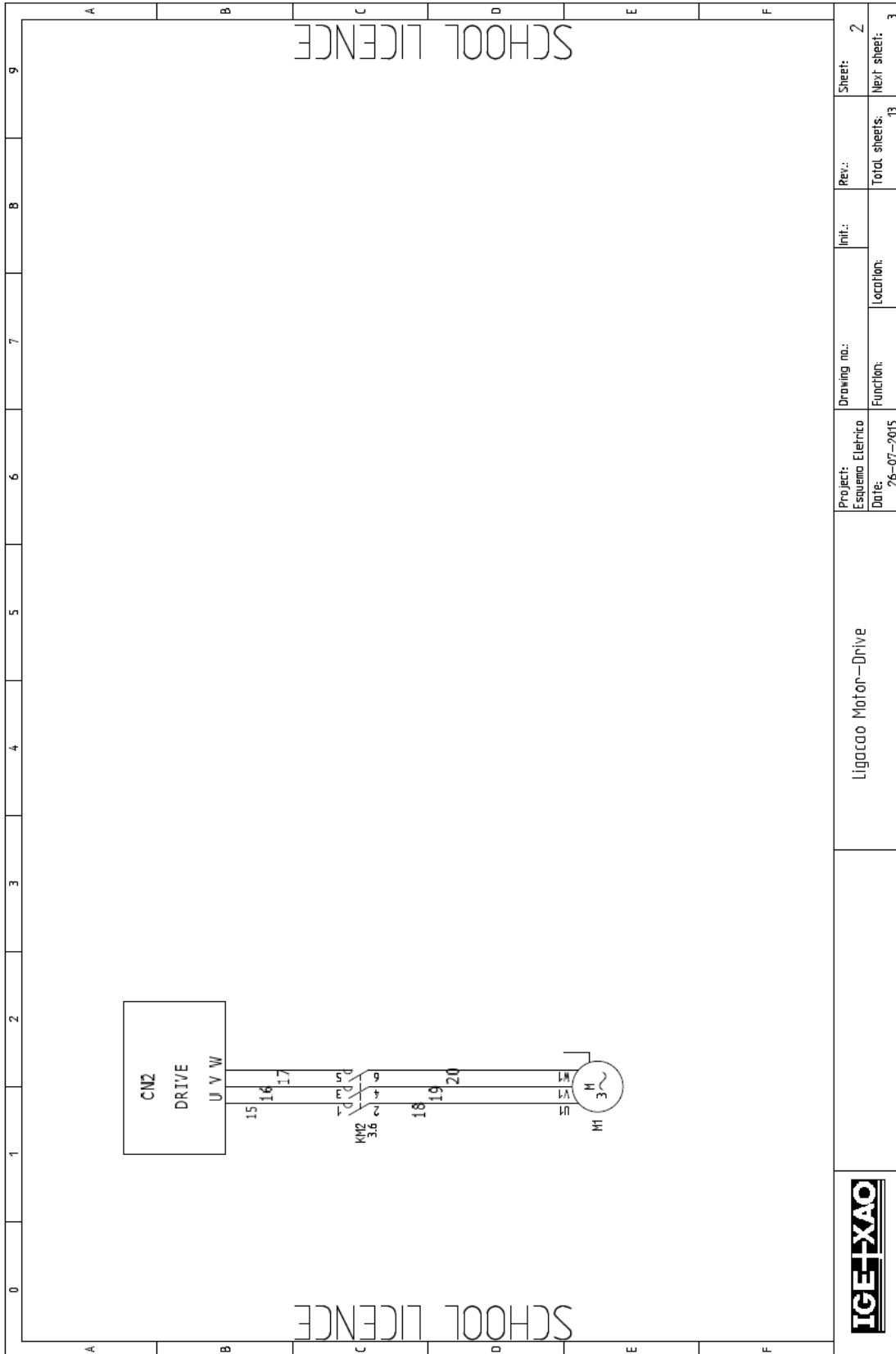
Carga a 200 kgf	
Resultados da deformação provocada	<p>Model name: Part1 Study name: Carga de 200 kg Plot type: Static strain Strain1 Deformation scale: 0.97923</p>  <p style="text-align: right;">ESTRN</p> <p style="text-align: right;">1.216e-003 1.114e-003 1.013e-003 9.119e-004 8.105e-004 7.092e-004 6.079e-004 5.066e-004 4.053e-004 3.040e-004 2.026e-004 1.013e-004 1.561e-008</p> <p style="text-align: center;">Educational Version. For Instructional Use Only</p>
Resultados do deslocamento provocado	<p>Model name: Part1 Study name: Carga de 200 kg Plot type: Static displacement Displacement1 Deformation scale: 0.97923</p>  <p style="text-align: right;">URES (mm)</p> <p style="text-align: right;">1.868e+000 1.810e+000 1.752e+000 1.694e+000 1.637e+000 1.579e+000 1.521e+000 1.464e+000 1.406e+000 1.348e+000 1.291e+000 1.233e+000 1.175e+000</p> <p style="text-align: center;">Educational Version. For Instructional Use Only</p>

Tabela B.3 – Resultados das simulações realizadas na célula de carga, quando imposta uma carga de 300 kgf.

Carga a 300 kgf	
Resultados da tensão provocada	<p>Model name: Part1 Study name: Carga de 300 kg Plot type: Static nodal stress Stress1 Deformation scale: 5.98615</p> <p style="text-align: right;">von Mises (N/m²)</p> <p style="text-align: right;">Yield strength: 530.000.000,0</p> <p style="text-align: center;">Educational Version. For Instructional Use Only</p>
Resultados da deformação provocada	<p>Model name: Part1 Study name: Carga de 300 kg Plot type: Static strain Strain1 Deformation scale: 5.98615</p> <p style="text-align: right;">ESTRN</p> <p style="text-align: center;">Educational Version. For Instructional Use Only</p>
Resultados do deslocamento provocado	<p>Model name: Part1 Study name: Carga de 300 kg Plot type: Static displacement Displacement1 Deformation scale: 5.98615</p> <p style="text-align: right;">URES (mm)</p> <p style="text-align: center;">Educational Version. For Instructional Use Only</p>

Anexo C: Esquemas Elétricos





Ligacao Motor-Drive

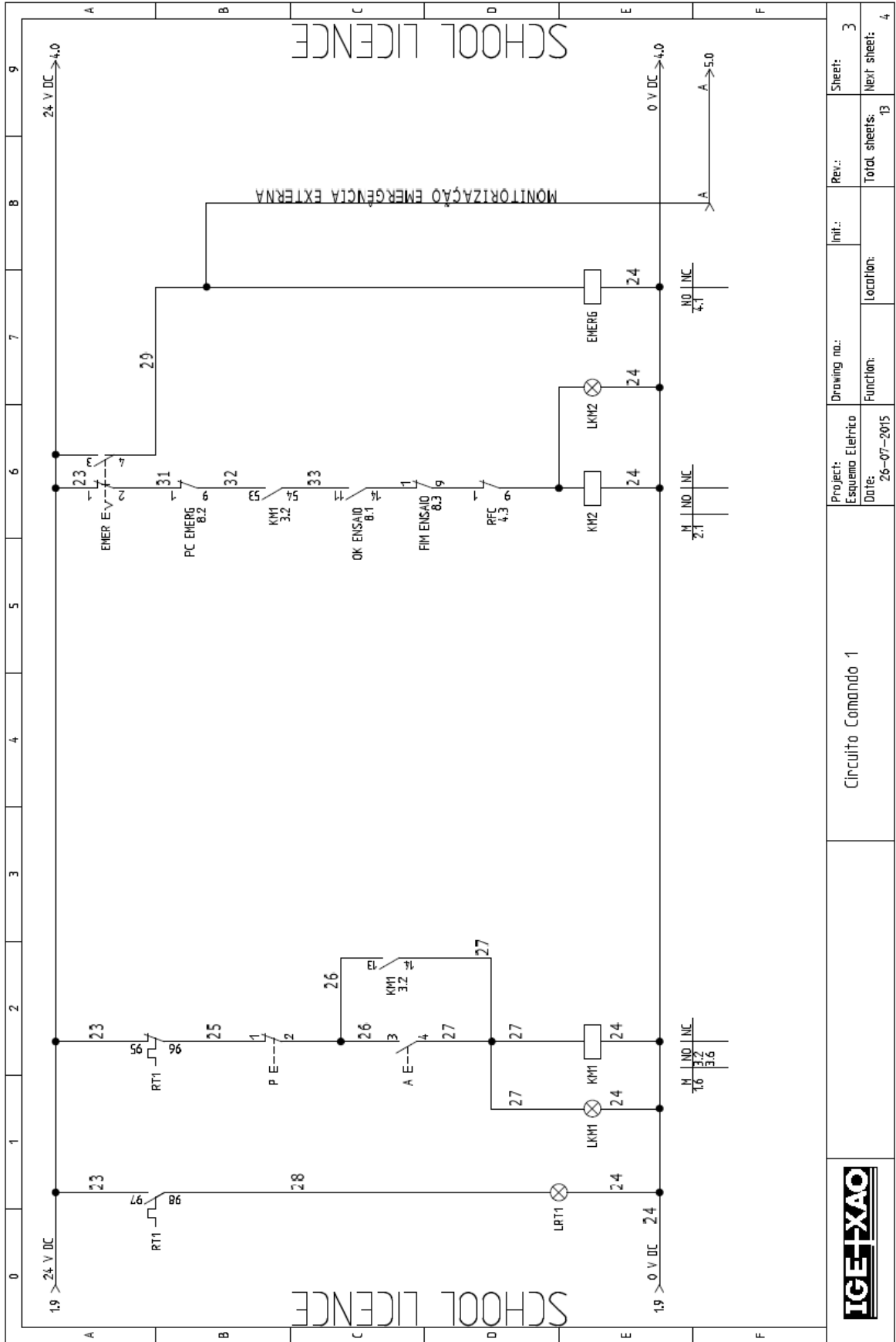
Project: Esquema Elétrico
Date: 26-07-2015

Drawing no.:
Function:

Init.:
Location:

Rev.:
Total sheets: 13

Sheet: 2
Next sheet: 3



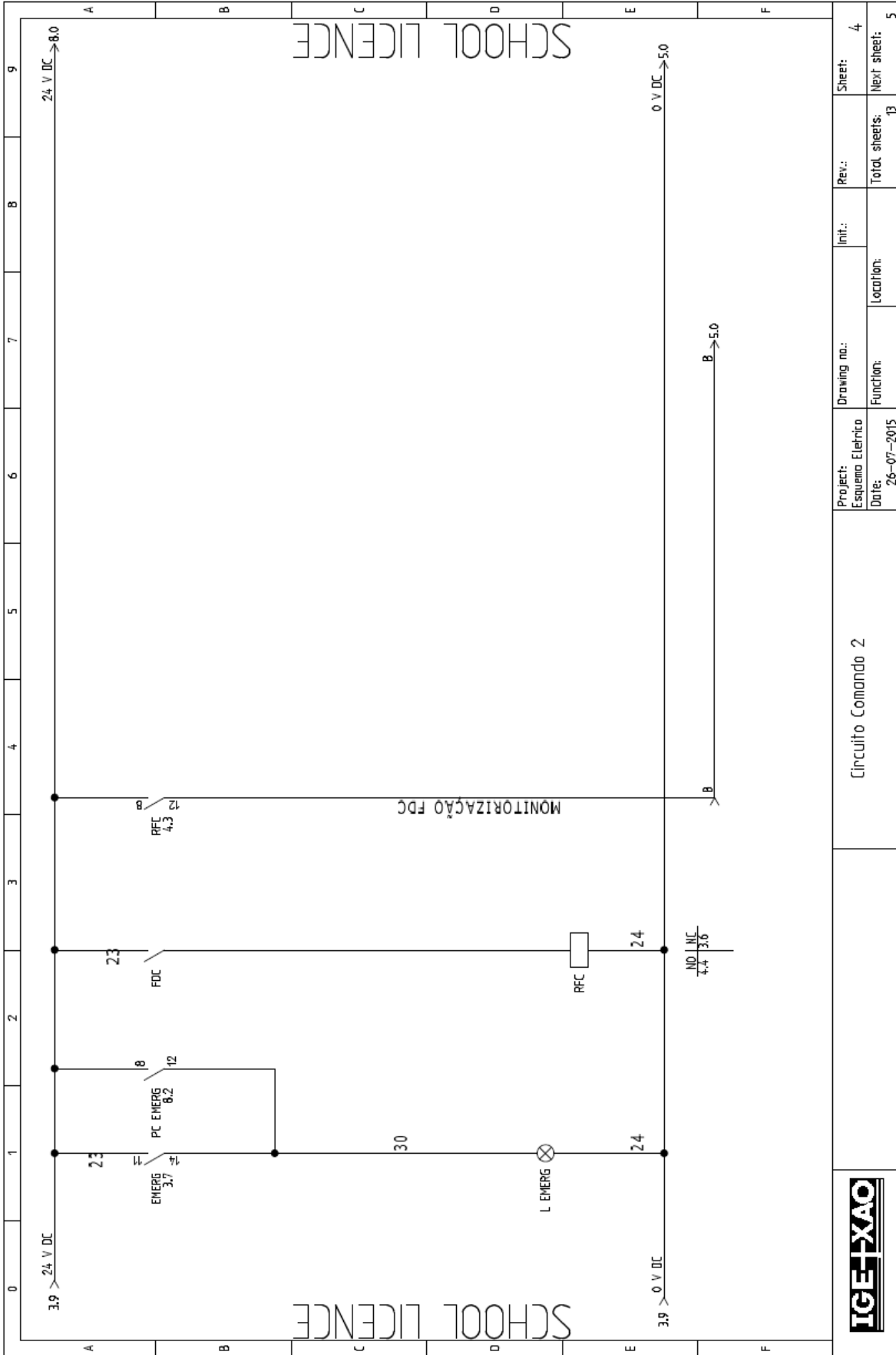
Circuito Comando 1

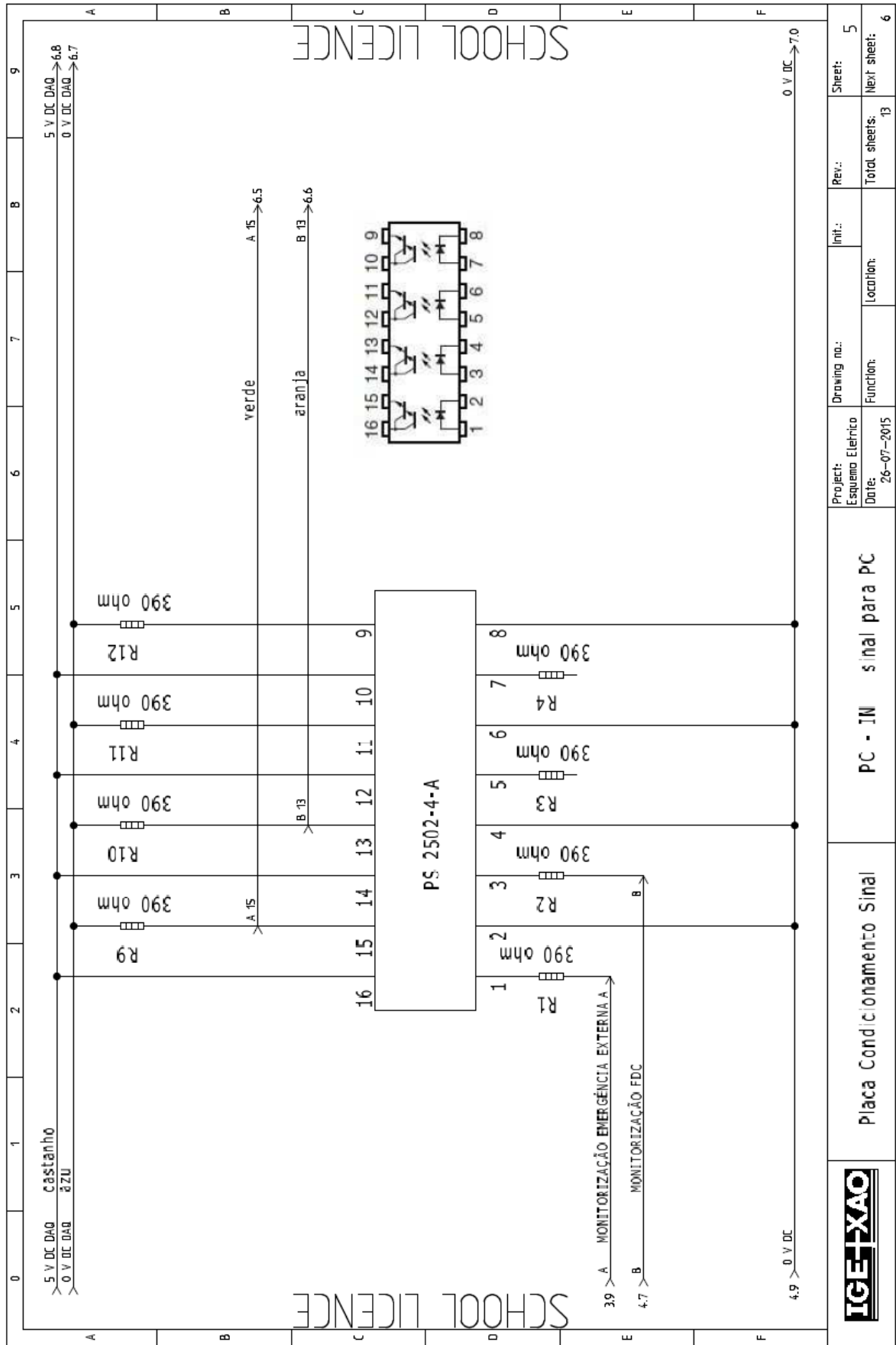
Project: Esquema Elétrico
Date: 26-07-2015

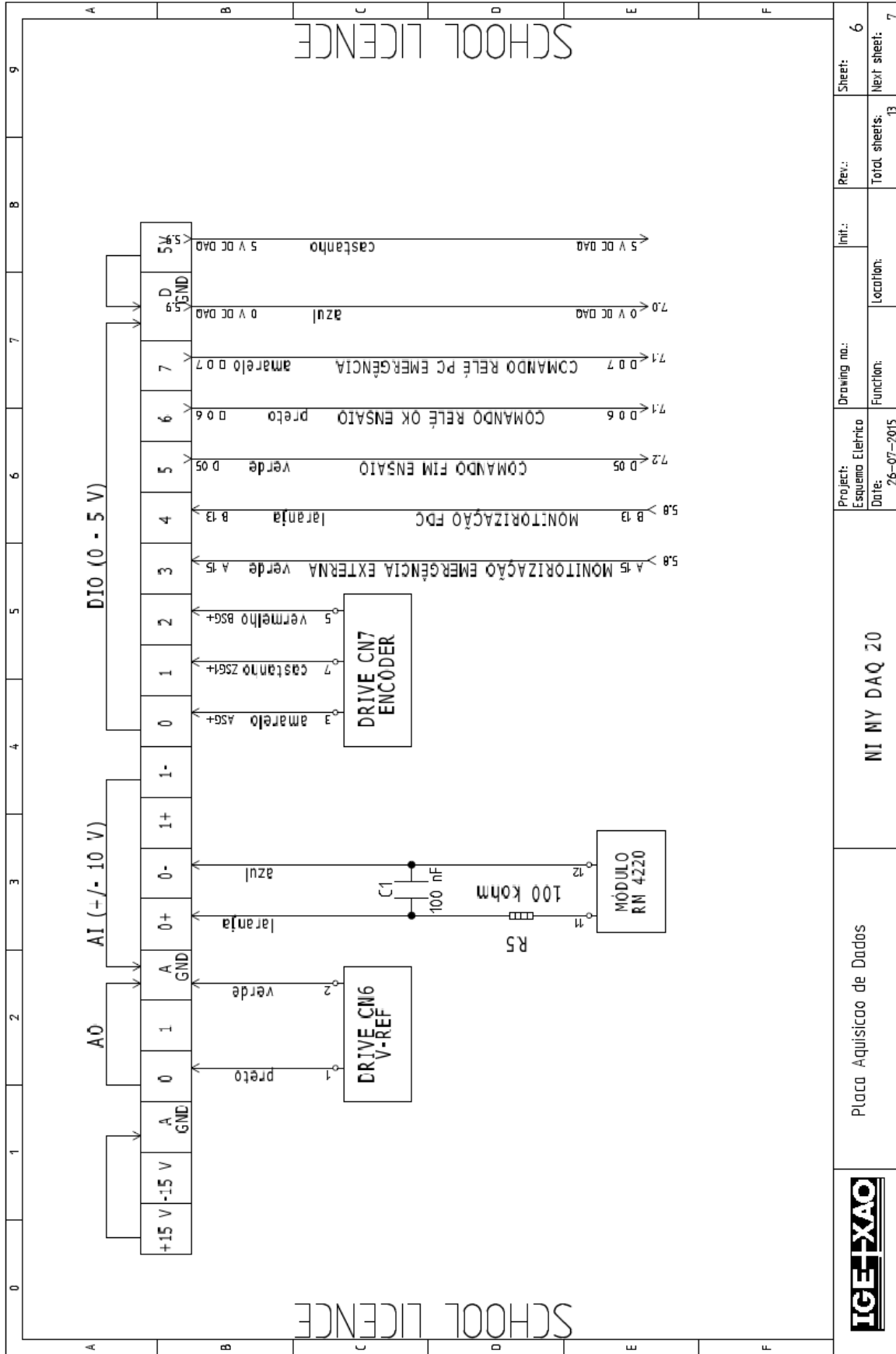
Drawing no.:
Function: Location:

Int.:
Total sheets: 13

Sheet: 3
Next sheet: 4







Placa Aquisicao de Dados

NI MY DAQ 20

Project: Esquema Eletronico

Date: 26-07-2015

Drawing no.:

Function:

Limit.:

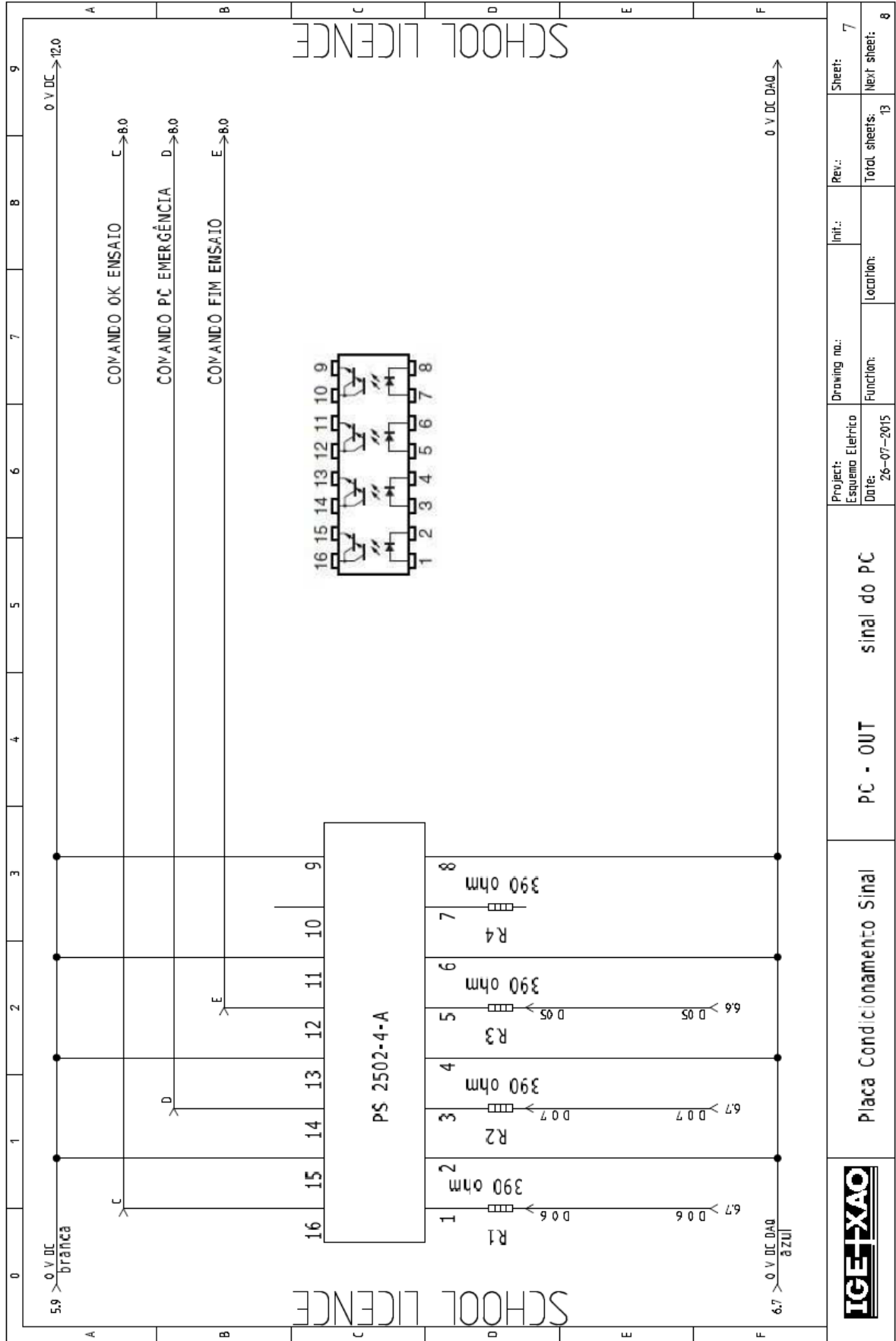
Location:

Rev.:

Total sheets: 13

Sheet: 6

Next sheet: 7



Placa Condicionamento Sinal

PC - OUT

signal do PC

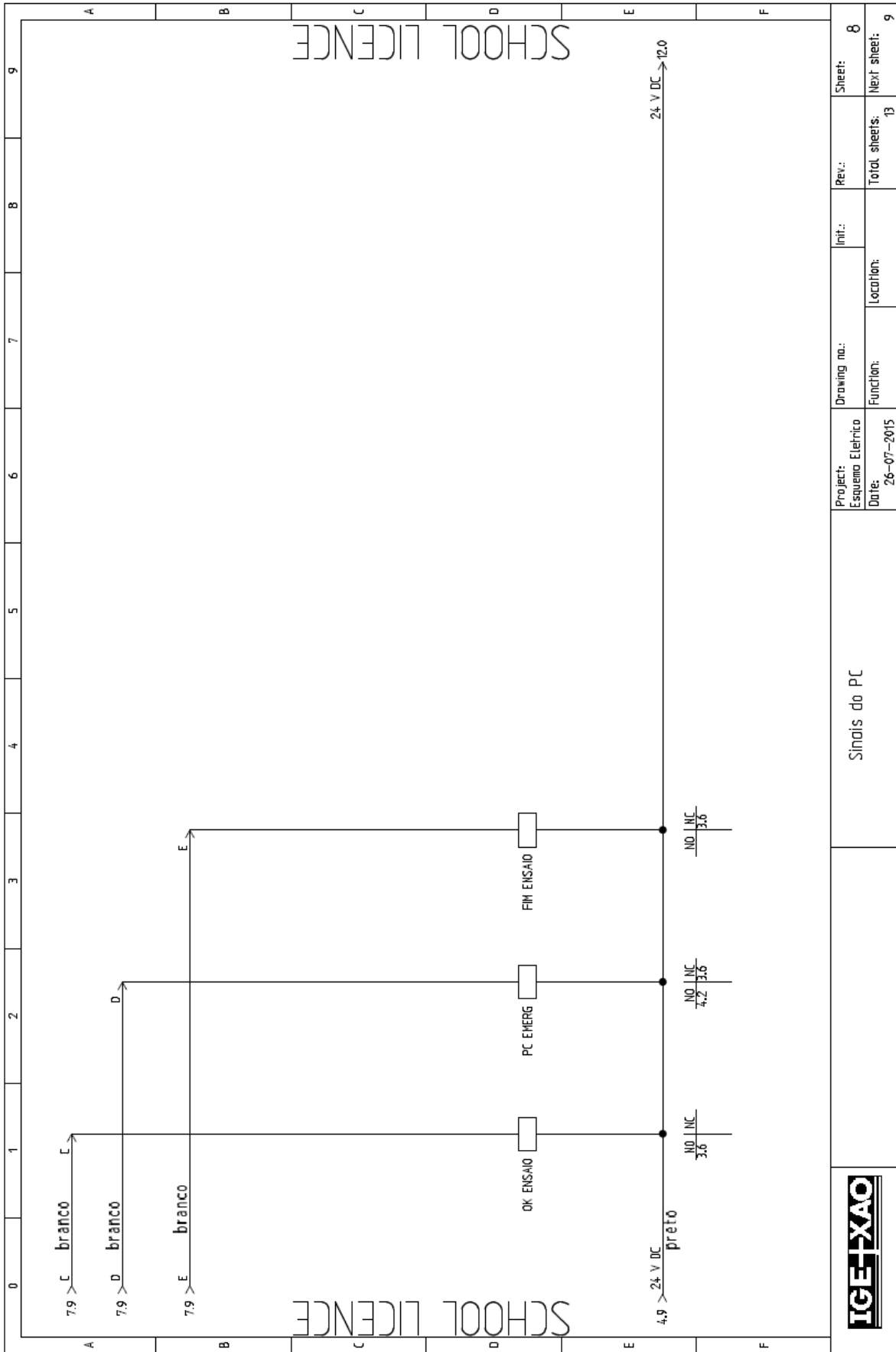
Project: Esquema Elétrico
Date: 26-07-2015

Drawing no.:
Function:

Init.:
Location:

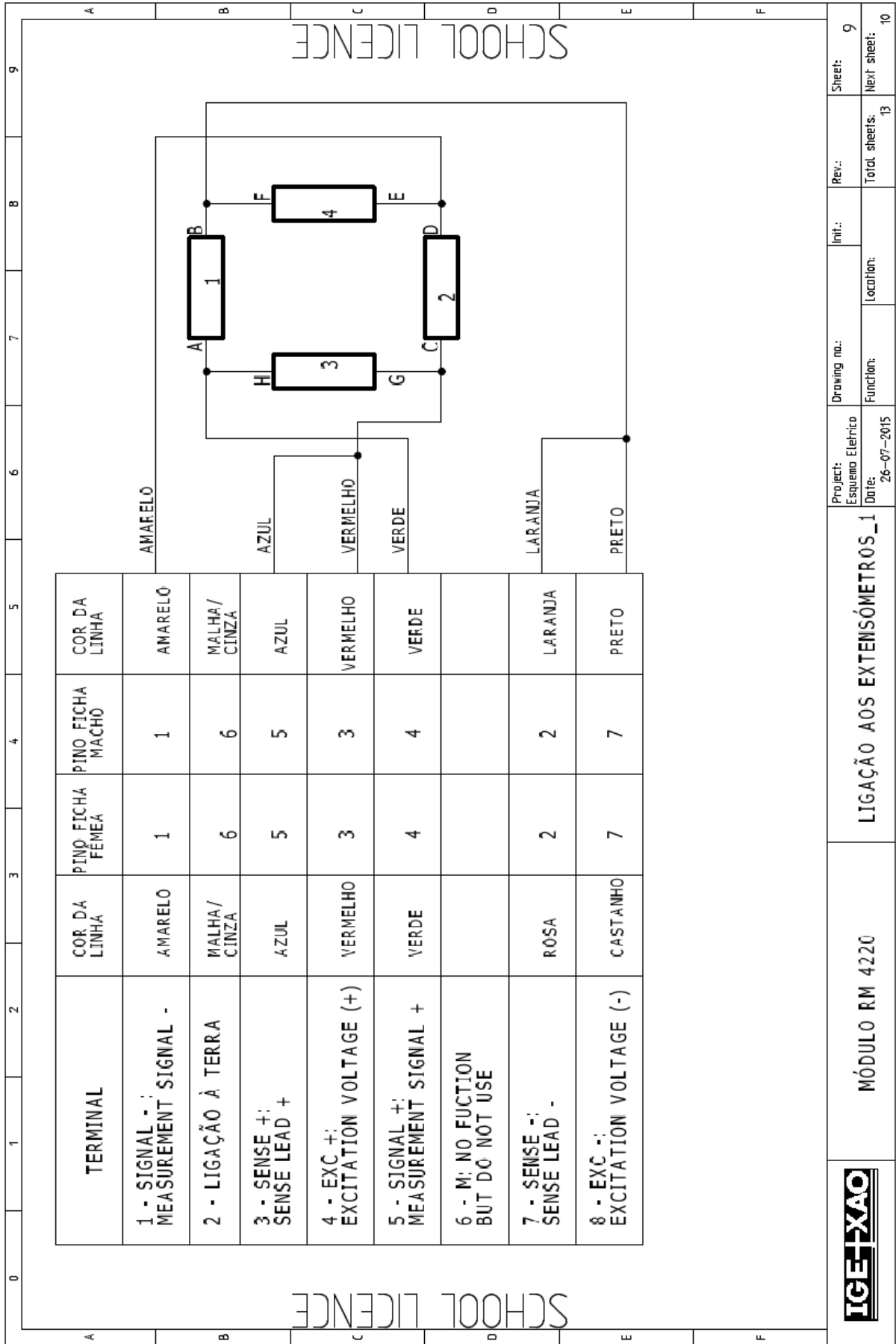
Rev.:
Total sheets: 13

Sheet: 7
Next sheet: 8

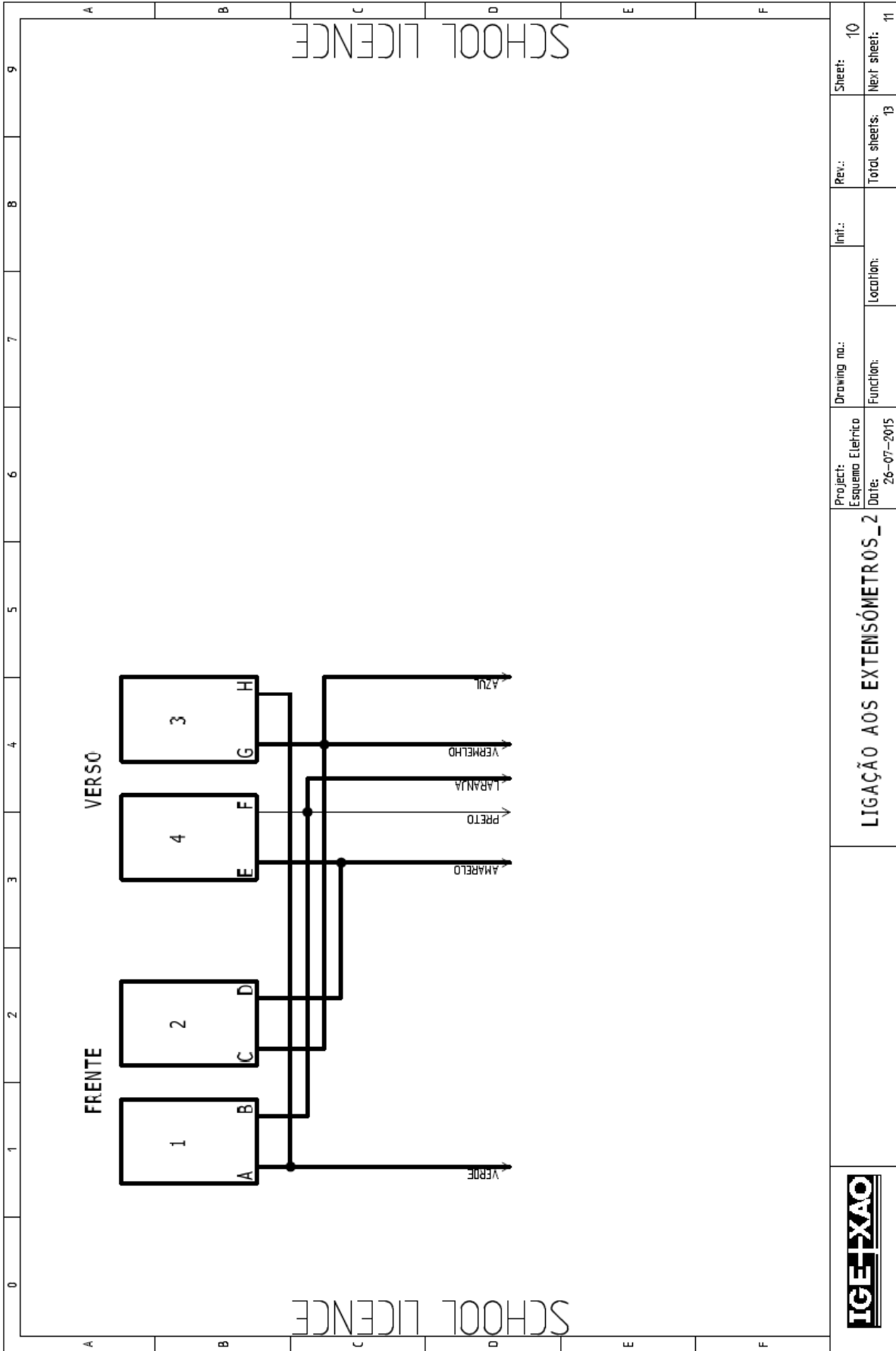



Sinóis do PC

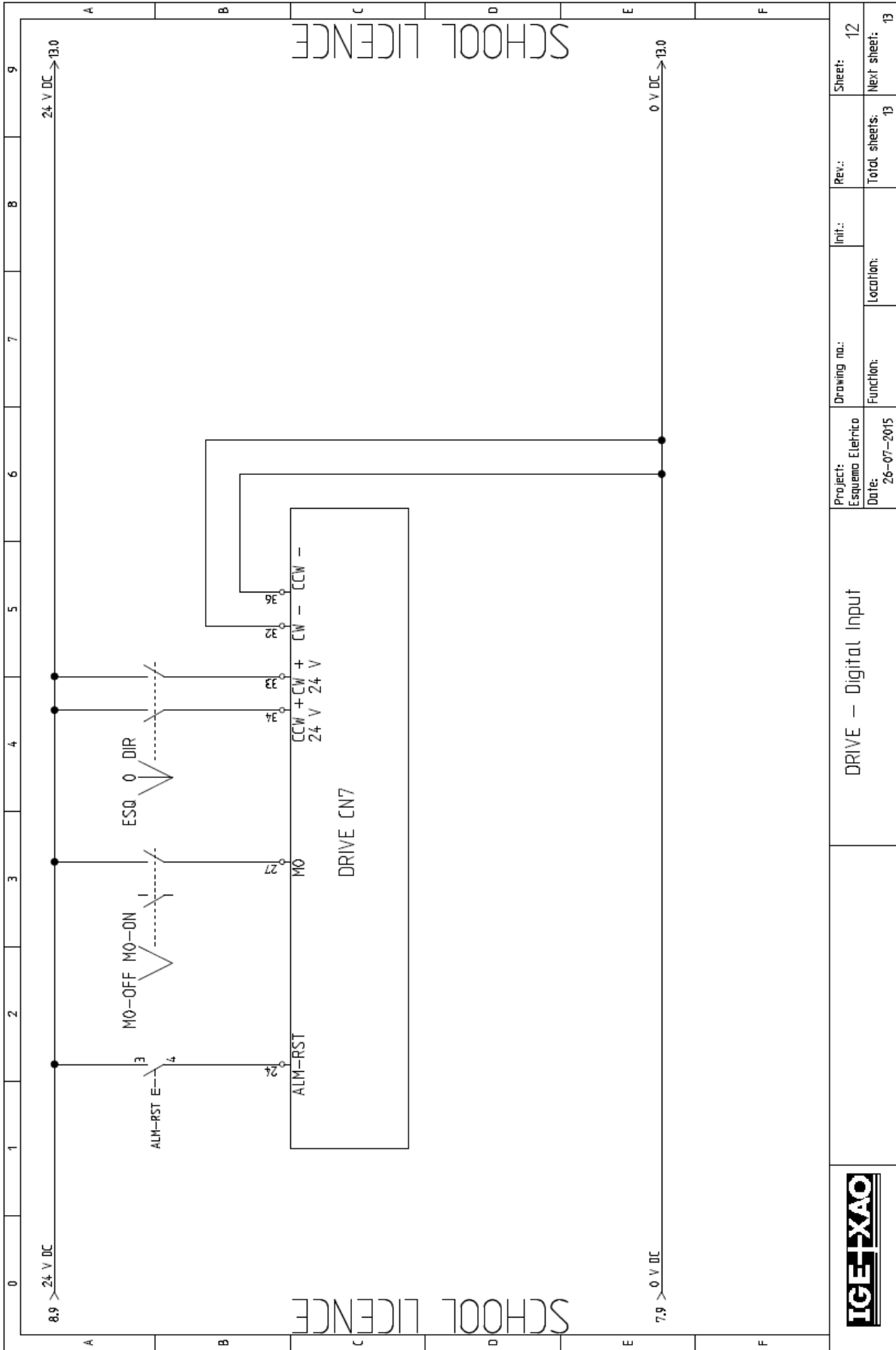
Project: Esquema Elétrico	Drawing no.:	Init.:	Rev.:	Sheet:
Date: 26-07-2015	Function:	Location:	Total sheets: 13	Next sheet: 9



IGEPXAO	MÓDULO RM 4220	LIGAÇÃO AOS EXTENSÓMETROS_1	Project: Esquema Elétrico	Drawing no.:	Init.:	Rev.:	Sheet: 9
			Date: 26-07-2015	Function:	Location:	Total sheets: 13	Next sheet: 10



0	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
A	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> SCHOOL LICENCE SCHOOL LICENCE </div>														
B										TERMINAL	COR DA LINHA	LIGAÇÃO			
C										9 - V+: SUPPLY VOLTAGE +		+ 24 V DC			
D										10 - TERRA: CABLE SHIELD	AMARELO/ VERDE MALHA	TERRA			
E										11 - V - OUT: VOLTAGE OUTPUT	AMARELO	AI --> 0+			
F										12 - GND PREFERABLE FOR VOLTAGE OUTPUT	BRANCO	AI --> 0-			
										13 - GND SUPPLY VOLTAGE -	PRETO	0 V DC			
	14 - TERRA: CABLE SHIELD	AMARELO/ VERDE													
	15 - I - OUT CURRENT OUTPUT		NÃO UTILIZADA												
	16 - GND PREFERABLE FOR CURRENT OUTPUT		NÃO UTILIZADA												
			MÓDULO RM 4220			Project: Esquema Eletrico Date: 26-07-2015		Drawing no.: Function:		Init.: Location:		Rev.: Total sheets: 13		Sheet: 11 Next sheet: 12	

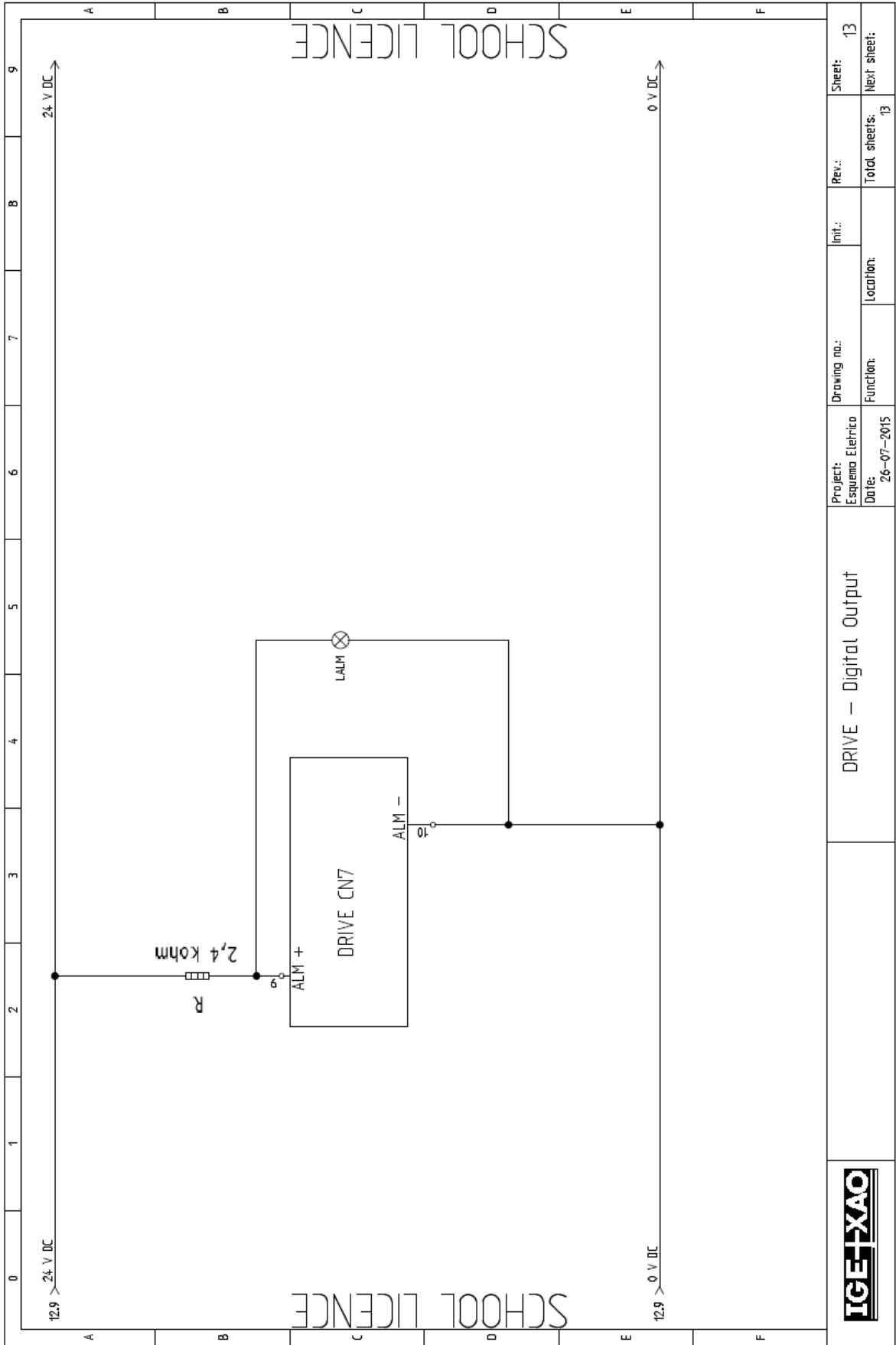


DRIVE – Digital Input

Project: Esquema Elétrico
Date: 26-07-2015

Drawing no.:
Function:
Location:

Rev.:
Total sheets: 13
Sheet: 12
Next sheet: 13



Project:	Esquema Eletrico	Drawing no.:	Init.:	Rev.:	Sheet:
Date:	26-07-2015	Function:	Location:	Total sheets:	13
				Next sheet:	13

DRIVE — Digital Output



Anexo D: Excertos da *Datasheet* do Integrado PS 2502-4-A

RENESAS

DATA SHEET

PHOTOCOUPLER

PS2502-1,-4,PS2502L-1,-4

HIGH ISOLATION VOLTAGE
DARLINGTON TRANSISTOR TYPE
MULTI PHOTOCOUPLER SERIES

-NEPOC Series-

DESCRIPTION

The PS2502-1, -4 and PS2502L-1, -4 are optically coupled isolators containing a GaAs light emitting diode and an NPN silicon darlington connected phototransistor.

The PS2502-1, -4 are in a plastic DIP (Dual In-line Package) and the PS2502L-1, -4 are lead bending type (Gull-wing) for surface mount.

FEATURES

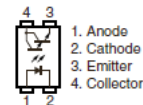
- High isolation voltage (BV = 5 000 Vr.m.s.)
- High current transfer ratio (CTR = 2 000% TYP.)
- High-speed switching ($t_r, t_f = 100 \mu s$ TYP.)
- <R> • Ordering number of tape product: PS2502L-1-F3: 2 000 pcs/reel
- Safety standards
 - UL approved: No. E72422

APPLICATIONS

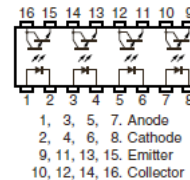
- Power supply
- Telephone/FAX
- FA/OA equipment
- Programmable logic controller

PIN CONNECTION (Top View)

PS2502-1, PS2502L-1



PS2502-4, PS2502L-4



The information in this document is subject to change without notice. Before using this document, please confirm that this is the latest version.
Not all products and/or types are available in every country. Please check with an NEC Electronics sales representative for availability and additional information.

Document No. PN10226EJ04V0DS (4th edition)
Date Published September 2009 NS
Printed in Japan

The mark <R> shows major revised points.

© NEC Electronics Corporation 1988, 2009

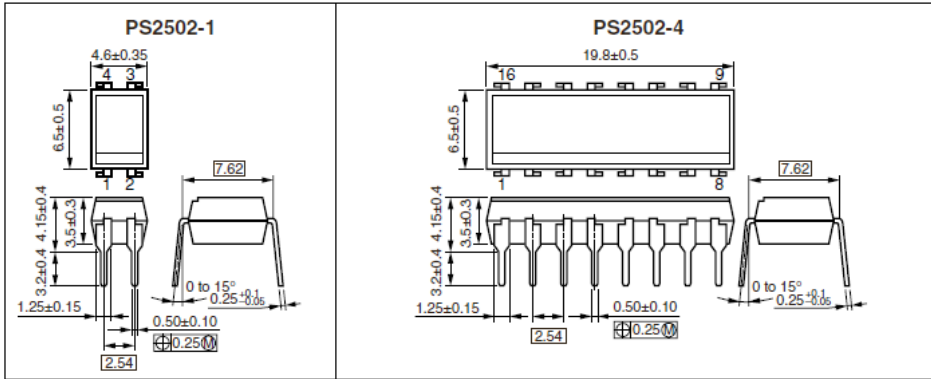
The revised points can be easily searched by copying an "<R>" in the PDF file and specifying it in the "Find what:" field.

NEC

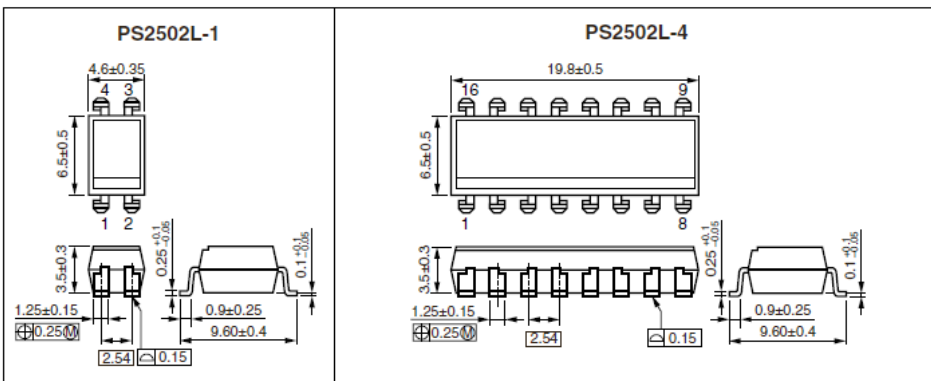
PS2502-1,-4,PS2502L-1,-4

<R> PACKAGE DIMENSIONS (UNIT : mm)

DIP Type



Lead Bending Type



<R> PHOTOCOUPLER CONSTRUCTION

Parameter	Unit (MIN.)
Air Distance	7 mm
Outer Creepage Distance	7 mm
Inner Creepage Distance	3.5 mm
Isolation Distance	0.3 mm

NEC**PS2502-1,-4,PS2502L-1,-4**

<R> ORDERING INFORMATION

Part Number	Order Number	Solder Plating Specification	Packing Style	Safety Standard Approval	Application Part Number ^{*1}
PS2502-1	PS2502-1-A	Pb-Free	Magazine case 100 pcs	Standard products (UL Approved)	PS2502-1
PS2502L-1	PS2502L-1-A		Embossed Tape 2 000 pcs/reel		
PS2502L-1-F3	PS2502L-1-F3-A				
PS2502-4	PS2502-4-A		Magazine case 20 pcs		PS2502-4
PS2502L-4	PS2502L-4-A				

*1 For the application of the Safety Standard, following part number should be used.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Ratings		Unit	
		PS2502-1, PS2502L-1	PS2502-4, PS2502L-4		
Diode	Reverse Voltage	V _R	6		V
	Forward Current (DC)	I _F	80		mA/ch
	Power Dissipation Derating	ΔP _D /°C	1.5	1.2	mW/°C
	Power Dissipation	P _D	150	120	mW/ch
	Peak Forward Current ^{*1}	I _{FP}	1		A/ch
Transistor	Collector to Emitter Voltage	V _{CEO}	40		V
	Emitter to Collector Voltage	V _{ECO}	6		V
	Collector Current	I _C	200	160	mA/ch
	Power Dissipation Derating	ΔP _C /°C	2.0	1.6	mW/°C
	Power Dissipation	P _C	200	160	mW/ch
Isolation Voltage ^{*2}	BV	5 000		Vr.m.s.	
Operating Ambient Temperature	T _A	-55 to +100		°C	
Storage Temperature	T _{stg}	-55 to +150		°C	

*1 PW = 100 μs, Duty Cycle = 1%

*2 AC voltage for 1 minute at T_A = 25°C, RH = 60% between input and output.

Pins 1-2 shorted together, 3-4 shorted together (PS2502-1, PS2502L-1).

Pins 1-8 shorted together, 9-16 shorted together (PS2502-4, PS2502L-4).

NEC

PS2502-1,-4,PS2502L-1,-4

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C)

	Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Diode	Forward Voltage	V _F	I _F = 10 mA		1.17	1.4	V
	Reverse Current	I _R	V _R = 5 V			5	μA
	Terminal Capacitance	C _t	V = 0 V, f = 1.0 MHz		50		pF
Transistor	Collector to Emitter Dark Current	I _{CEO}	V _{CE} = 40 V, I _F = 0 mA			400	nA
Coupled	Current Transfer Ratio (I _c /I _F) ^{*1}	CTR	I _F = 1 mA, V _{CE} = 2 V	200	2 000		%
	Collector Saturation Voltage	V _{CE(sat)}	I _F = 1 mA, I _c = 2 mA			1.0	V
	Isolation Resistance	R _{I-O}	V _{I-O} = 1.0 kV _{DC}	10 ¹¹			Ω
	Isolation Capacitance	C _{I-O}	V = 0 V, f = 1.0 MHz		0.5		pF
	Rise Time ^{*2}	t _r	V _{CC} = 10 V, I _c = 2 mA, R _L = 100 Ω		100		μs
Fall Time ^{*2}	t _f			100			

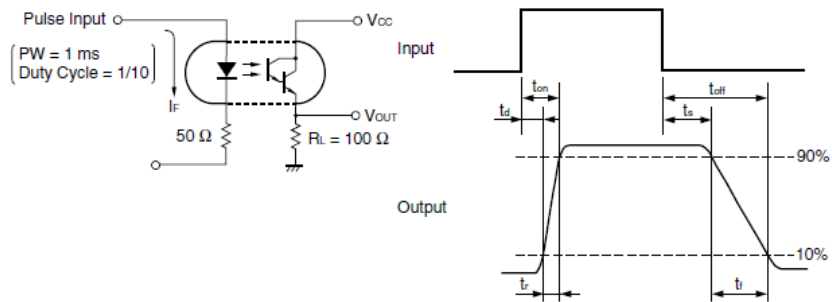
*1 CTR rank (only PS2502-1, PS2502L-1)

K : 2 000 to (%)

L : 700 to 3 400 (%)

M : 200 to 1 000 (%)

*2 Test circuit for switching time



Anexo E: Quadro-resumo das Ligações à Placa de Aquisição de Dados – NI myDAQ

Canal	Descrição	Tipo de Sinal	Gama
AO (0)	Referência da velocidade para o <i>driver</i> ;	<i>Analógico_Output</i>	± 10 V
AI (0+, 0-)	Sinal dos extensômetros;	<i>Analógico_Input</i>	± 10 V
DIO (0, 1, 2)	Sinais do <i>encoder</i> (A, Z, B);	<i>Digital_Input</i>	0 ou 5 V
DIO (3)	Monitorização da botoneira de emergência;	<i>Digital_Input</i>	0 ou 5 V
DIO (4)	Monitorização fim de curso;	<i>Digital_Input</i>	0 ou 5 V
DIO (5)	Comando relé fim ensaio;	<i>Digital_Output</i>	0 ou 5 V
DIO (6)	Comando relé ok ensaio;	<i>Digital_Output</i>	0 ou 5 V
DIO (7)	Comando relé PC emergência;	<i>Digital_Output</i>	0 ou 5 V