

Sérgio Manuel Lopes Pereira

DESENHO E CONTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE CARGA DEDICADA A MATERIAIS BIOLÓGICOS COM PEQUENAS TENSÕES DE RUTURA

Dissertação de Mestrado em Engenharia Física

Setembro 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

TESE DE MESTRADO DE INSTRUMENTAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

DESENHO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE CARGA
DEDICADA A MATERIAIS BIOLÓGICOS COM PEQUENAS
TENSÕES DE RUTURA

Sérgio Manuel Lopes Pereira

Supervisor:

Prof. Doutor Francisco José Santiago Fernandes Amado Caramelo

iBili

Institute for
Biomedical Imaging
and Life Sciences
University of Coimbra



C ·

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Coimbra, Setembro de 2017

"Those who are quite satisfied sit still and do nothing; those who are not quite satisfied are the sole benefactors of the world."

Walter S. Landor

Agradecimentos

Ao longo de todos estes anos foram muitas as pessoas que me ajudaram a concretizar muitos objetivos, todas elas importantes, cada uma à sua maneira.

Em primeiro lugar gostava de agradecer ao Doutor Francisco Caramelo, pela sua grande ajuda durante a realização deste projeto, a sua paciência e dedicação revelaram-se fulcrais.

Quero agradecer ao Afonso pelo incentivo para entrar neste curso, todo o apoio ao longo da nossa passagem por Coimbra e a todos os colegas que me acompanharam durante todo o percurso académico.

Agradecer também a todos aqueles com os quais passei grande parte do tempo, aos colegas da residência João Jacinto.

Um muito obrigado a todos os amigos da minha segunda família, a Estudantina Universitária de Coimbra, sem eles tudo teria sido bastante diferente.

Um agradecimento especial também a todos os amigos do fado que me incentivaram, aos do grupo de fado e em especial a toda a equipa do Fado ao Centro que sempre me motivaram para ser melhor em qualquer área.

Um agradecimento muito especial à minha família por nunca terem duvidado de mim, em especial aos meus pais, por todo o esforço que fizeram para poder chegar até aqui. Um obrigado também à minha irmã pela paciência e apoio.

Por último, mas não menos importante, um enorme obrigado à Rita que se revelou um pilar fundamental não só nesta fase mas em todas as etapas da minha vida, que assim continue.

Resumo

As propriedades mecânicas dos materiais biológicos tais como, elasticidade, tensão de ruptura, fadiga são cada vez mais estudadas uma vez que alterações à normalidade podem ser clinicamente relevantes. Estas propriedades são geralmente analisadas com recurso a Máquinas de teste universais (MTU) que aplicam tensões aos materiais em estudo, medindo-se a correspondente deformação. No entanto, as MTU mais comuns têm por objetivo o estudo de materiais com elevado módulo de elasticidade apresentando por isso uma gama dinâmica da medida de força pouco adequada a esse fim. Para materiais com módulo de elasticidade algumas ordens de grandeza mais baixos os sensores de força revelam-se desajustados. Por outro lado, os materiais biológicos são testados *in vitro* o que implica perda de parte da sua composição acarretando alterações das características mecânicas que se procuram mensurar. Neste projeto foi desenhada e construída uma MTU que se adapta as necessidades inerentes aos testes de tensão em tecidos biológicos. A máquina de testes foi pensada de maneira a poder ser facilmente ajustável a cada teste e capaz de suportar alterações no modo de comportamento dos sensores e atuadores. Todas as peças utilizadas podem ser substituídas, com o objetivo de proporcionar o melhoramento ao longo da sua utilização. Para caracterizar a máquina realizaram-se vários tipos de ensaios, nomeadamente, testes relativos ao sensor de força e ao sistema de deslocamento. No que diz respeito à repetibilidade, foram analisadas a resolução e linearidade do sensor de força; relativamente ao sensor de posição, a linearidade foi a principal preocupação. Além destes testes foram estudados alguns materiais dos quais se obteve o módulo de Young. Este valor foi comparado com os valores conhecidos. Os testes revelaram que a máquina de testes construída é adequada para ser utilizada em testes de materiais biológicos com um baixo módulo de elasticidade.

Palavras-Chave : Máquina de Teste Universal; Testes de Tensão; Tecidos Biológicos.

Abstract

Mechanical properties of biological tissues such as, elasticity, tensile strength and fatigue are increasingly studied because changes to the normal conditions may be clinically relevant. These properties are usually analyzed resorting to Universal Testing Machine (UTM), which is a device that applies stress to the materials under study while measures the corresponding strain. However, typical UTM aim at studying materials with a high modulus of elasticity, thus presenting a dynamic range of force measurement are not suitable to study biological materials. For materials with much small modulus of elasticity, such as biological tissues, the force sensors of typical UTM are not well adjusted and, thus tests fail largely. Besides, biological materials are tested in vitro, which most of the times implies loss of part of their composition, causing changes at the mechanical characteristics that are sought to be measured. As so, in this project, an UTM was designed and constructed with the objective to be applied to stress tests of biological tissues. The testing machine has been designed to apply small forces and to detect accordingly small strain. Moreover, the machine was devise in such a way that it can be easily adjusted to each test and all the UTM parts can be replaced in order to improve its operation. In order to characterize the machine several tests were conducted, notably tests regarding the force sensor and the displacement system. Concerning the force sensor reproducibility, resolution and linearity were analysed; and regarding the position sensor the linearity was the main concern. In addition to these tests some materials were submitted to stress/strain study and the Young modulus was calculated and compared to known values. The tests revealed that the machine test constructed is suitable to be applied to materials presenting low modulus of elasticity.

Keywords: *Universal Testing Machine; Tensile Testing; Biological Tissues.*

Lista de Figuras

2.1	Diferentes formatos de garras de tração que foram estudados. À esquerda formato <i>grip</i> à direita <i>pin</i> . [6]	5
2.2	Função representativa da deslocação da amostra , relativamente as garras, em função da força aplicada. [6]	5
2.3	Formas da amostra, retangular à esquerda e côncava à direita. [6]	6
2.4	Comportamento da amostra para diferentes formatos, à esquerda forma retangular, à direita forma côncava [6]. Ambas as amostras sofrem tração de uma forma longitudinal.	6
2.5	Esquema de um teste de tração [7]	7
2.6	Esquema de um teste de adesão [8]	7
2.7	Esquema teste de compressão [9]	8
2.8	Esquema de teste com 3 pontos	8
2.9	Esquema Máquina de Teste Universal [10]	9
3.1	Curva Tensão-Deformação, A - limite proporcional, B - limite elástico, C - limite de resistência a tração, D - ponto de rutura.	13
3.2	Tensão de limite elástico real [16]	15
3.3	Curvas tensão deformação com os respetivo limites de resistência a tração [17]	16
4.1	Motor de passo utilizado com o respetivo acoplador	18
4.2	Configuração dos enrolamentos nos diferentes motores [18]	18
4.3	Driver de apoio do motor de passo ULN2003A	20
4.4	Potenciómetro utilizado no projeto	21
4.5	Funcionamento de um potenciómetro	22
4.6	Célula de Carga	23
4.7	Ponte de Wheatstone [20]	24
4.8	Exemplo de flexão de uma célula de carga e conseqüente alteração dos valores das resistências [22]	25
4.9	Driver de apoio da célula de carga HX711	26
4.10	Modelo 3D das garras utilizadas feito a partir do software Inventor [®]	28
4.11	Arquitetura da Plataforma: 1-Motor de Passo; 2-Veio Roscado; 3-Guias Deslizantes; 4-Zona onde se encontrará o material suporte das amostras; 5-Posição das garras; 6-Local onde se pretende colocar a célula de carga; 7-espço destinado a outros instrumentos de medida; 8- Compartimento do hardware de controlo.	28
4.12	Placas de acrílico utilizadas na estrutura.	29
4.13	Componentes utilizados para na ligação do motor ao veio. A - Veio Roscado, B - Rolamento, C - Acoplador linear	30
4.14	Pequena secção da calha deslizante à esquerda e mesa auto lubrificada à direita	30

4.15	Arduino Uno	31
4.16	Ambientes de trabalho dos softwares utilizados. A esquerda o Arduino (IDE) e a direita o Processing 3.3	32
4.17	Exemplo de amostragem de dados em tempo real utilizando o <i>Processing</i> 3.3. Neste gráfico exemplificativo, no eixo do x mede-se o tempo decorrido e no eixo y a carga aplicada.	32
5.1	Reta relativa à distância medida na craveira em função número de voltas do motor.	34
5.2	Valor digital do potenciômetro em função da distância percorrida.	35
5.3	Distribuição normal do dois primeiros testes (A e B) com 30 segundos de intervalo entre ambos.	37
5.4	Distribuição normal de todos os testes de calibração realizados	37
5.5	Comportamento da célula de carga	38
5.6	Diagrama de ligações.	38
5.7	Montagem da estrutura em acrílico	39
5.8	Montagem dos componentes	39
6.1	Formato e medidas da amostra	41
6.2	Curva tensão-deformação filme em PVC	42

Lista de Tabelas

4.1	Sequência de impulsos	19
5.1	Valores digitas obtidos pelo potenciômetro a partir do número de voltas do motor de passo	33
5.2	Valores medidos pela craveira (mm) a partir do número de voltas do motor de passo	34
5.3	Comparação dos valores obtidos pela reta de ajuste com o numero de voltas dado pelo motor	35
5.4	Distância percorrida medida pela craveira digital	36
5.5	Fatores de calibração para as massas de 50g,100g,200g e 300g	36
5.6	Média e desvio padrão para os dois primeiros restes de repetibilidade.	37
5.7	Média e desvio padrão para os testes C e D	37

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Abstract	ii
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vi
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Objetivos	1
1.2 Estrutura	2
2 Enquadramento	3
2.1 Estado da Arte	3
2.2 Máquinas de Teste Universais	6
3 Fundamento Teórico	11
3.1 Testes de Tensão	11
3.1.1 Lei de Hooke	12
3.1.2 Curva tensão deformação	13
3.1.3 Módulo de Young	14
3.1.4 Tensão de limite elástico	14
3.1.5 Limite de resistência a tração	15
3.1.6 Deformação	16
4 Materiais e Métodos	17
4.1 Motor de Passo	17
4.1.1 Modo de funcionamento	18
4.1.2 Hardware de apoio	19
4.1.3 Calibração e repetibilidade	20
4.2 Transdutor de Posição	21
4.2.1 Modo de Funcionamento	22
4.2.2 Calibração e repetibilidade	22
4.3 Célula de carga	22
4.3.1 Modo de Funcionamento	23
4.3.1.1 Ponte de Wheatstone	24
4.3.2 Hardware de apoio	25
4.3.3 Calibração	26
4.3.4 Repetibilidade	26
4.4 Garras de Tração	27
4.5 Arquitetura da plataforma	28
4.6 Software de Controlo - Arduino	30

4.7	Software de Aquisição e Tratamento de Dados	31
5	Resultados	33
5.1	Motor de Passo e Transdutor de Posição	33
5.1.1	Calibração	33
5.1.2	Repetibilidade	36
5.2	Célula de Carga	36
5.2.1	Calibração	36
5.2.2	Repetibilidade	36
5.3	Arquitetura do Sistema	38
6	Controlo do Produto	41
6.1	Teste de tensão em filme de PVC	41
7	Análise e Discussão de Resultados	43
8	Conclusões e Trabalho Futuro	47
8.1	Conclusões e Trabalho Futuro	47
	Anexos	48
A	Especificações Motor de Passo	I
B	Especificações UNL 2003A	II
C	Especificações Célula de Carga	III
D	Especificações HX711	IV
E	Especificações Arduino	V
	Referências bibliográficas	VII

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Objetivos

O estudo das propriedades físicas dos materiais tem uma elevada importância quer na indústria, quer na saúde. Esta inovação requer, no entanto, medidas em amostras muito pequenas e muitas vezes o estudo microscópico do comportamento da amostra enquanto esta está sob tensão.

Existem poucos sistemas de teste que sejam capazes de medir as forças e deslocamento envolvidos nestes processos. Este trabalho pretende oferecer aos investigadores da área da saúde uma ferramenta aplicada as suas necessidades no que diz respeito a testes de tensão em materiais biológicos.

A membrana amniótica, por exemplo, é um tecido biológico para o qual o estudo das suas propriedades físicas através de uma máquina de carga é bastante útil. Este teste é importante para saber as causas de uma rutura prematura na membrana, que consiste no rompimento espontâneo da membrana amniótica antes das 37 semanas de gestação.[1]

Os testes de tensão em membranas amnióticas, ou noutro tipo de tecidos biológicos, já foram realizados na Universidade de Coimbra.[1] Para isso os investigadores utilizam máquinas de teste universais (MTU) disponíveis no mercado. Estas MTU são de grande qualidade e permitem efetuar uma grande variedade de testes com elevada precisão, no entanto, não são totalmente adaptáveis aos testes desejados.

Analisando as dificuldades provenientes da realização de testes de tensão numa MTU da Shimadzu (5kN) foram encontrados vários fatores que podem ser melhorados e adaptados para realizar testes de carga em tecidos biológicos. Apesar da grande precisão e versatilidade deste tipo de dispositivos, existem aspetos que poderiam ser melhorados. Um dos aspetos que se pretende melhorar são as condições em que se realiza o ensaio. O procedimento de execução do teste exigia uma grande destreza por parte dos operadores, uma vez que as amostras utilizadas eram de pequenas dimensões e muito delicadas para colocar nas garras, de grandes

dimensões, preparadas para realizar testes com grandes tensões. Existem outras opções de garras no mercado que serão mais indicadas a este tipo de testes, no entanto têm um custo elevado.[2]

Outro aspeto que influencia os resultados são as condições em que estes são obtidos. Na maioria das MTUs os testes são realizados à temperatura ambiente sem controlo do ambiente em redor. Existem também máquinas preparadas para este tipo de testes em ambiente controlado, no entanto o seu preço de dezenas de milhares de euros não é muito apelativo.

Depois de analisadas as dificuldades enfrentadas em ensaios anteriores na utilização destas máquinas ficou bem claro o objetivo deste projeto. Construir uma máquina de carga dedicada aos materiais biológicos adaptável a diferentes testes, fácil de manobrar e a um preço acessível.

1.2 Estrutura

Esta dissertação divide-se em três partes fundamentais, que englobam oito capítulos.

No Capítulo 1 foi apresentada uma breve introdução sobre o tema e exposição dos principais objetivos.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica onde são expostos os avanços descritos na literatura acerca do estudo das propriedades físicas nos materiais, os métodos utilizados para o devido efeito e ainda a importância destes estudos para as diferentes áreas científicas. Apresenta-se ainda algumas opções de equipamentos semelhantes no mercado e alguns trabalhos com os quais algumas empresas têm colaborado.

No Capítulo 3 descrevem-se todos os conceitos e princípios físicos importantes para o conteúdo da dissertação.

No Capítulo 4 é feita uma descrição detalhada do funcionamento e constituição dos aparelhos utilizados para o estudo em questão, bem como os procedimentos a ter em conta na utilização de cada um deles.

No Capítulo 5 são apresentados todos os resultados de experiências necessários para a calibração do sistema, necessários para garantir o bom funcionamento.

No Capítulo 6 é feito um controlo do produto final de maneira a verificar a funcionalidade do mesmo.

No Capítulo 7 é feita uma discussão detalhada de todos os resultados obtidos nos procedimentos de teste.

No Capítulo 8 são feitas apreciações conclusivas e propostas de trabalho futuro.

Capítulo 2

Enquadramento

2.1 Estado da Arte

As Máquinas de Teste Universal (MTU), utilizadas para testes de tensão, têm um mercado bastante abrangente, existindo várias empresas, tais como: ADMET, Paul N., Gardner Co., Epsilon Technology, United Testing Systems Inc., SHIMADZU.

Dentro da oferta de mercado a Admet é a marca que apresenta produtos que mais se assemelham a este projeto. A série de produtos *eXpert 4000* oferece uma grande variedade de opções para os investigadores.

Recentemente, esta empresa trabalhou em parceria com uma universidade para a construção de um sistema direcionado à medição da tensão em fibras de plantas. Os investigadores precisavam de um sistema que fosse capaz de realizar testes com cargas inferiores a 50g. O sistema de testes também teria de ser compatível com um sistema de vídeo microscópico e capaz de realizar testes em meio líquido. O sistema foi elaborado com uma célula de carga de baixa capacidade e resistente à água.[3]

Num processo de pesquisa relacionado com tumores têm vindo a ser utilizadas novas técnicas para tentar curar ou diminuir as consequências dos mesmos. O objetivo destes teste seria estudar a influência nas zonas extra-celulares, comparando a rigidez de tecidos malignos com tecidos saudáveis. Para isto foi desenvolvida uma maquina de testes portátil, capaz de se transportar numa mala, que conseguia realizar os testes em qualquer lugar e de uma forma relativamente rápida.[4]

Outra área em que os testes de carga se têm revelado importantes é a cardiologia, nomeadamente no que se refere ao estudo de *Stents*. O *Stent* cardíaco é uma prótese expansível, em formato de tubo, que é colocada no interior de uma artéria para evitar a obstrução do fluxo por entupimento dos vasos. Um dos maiores desafios no estudo das propriedades destes materiais é a medição da resistência de cada filamento destas próteses. A solução, neste caso, passou pela elaboração de um sistema de expansão cilíndrico, com uma quantidade mais elevada de sensores, acompanhados com uma célula de carga de 45 N e com um aumento em 10x na velocidade de aquisição de dados.[4]

O estudo das propriedades físicas dos tecidos musculares é outra área em que as máquinas de carga são necessárias. Para este tipo de testes a ADMET elaborou um sistema capaz de simular movimentos em tecidos musculares e tendões em condições muito parecidas ao interior do corpo humano. Para isto era imperativo que o sistema conseguisse realizar medições em ciclos de 10 μm dentro de uma solução salina aquecida. O equipamento fornecido permitia avaliar as propriedades elásticas dos tecidos moles enquanto simulava processos, tais como, exercício físico, envelhecimento, lesões e em alguns casos doenças.[4]

Apesar de se utilizar alguma da tecnologia mais avançada, os estudo das propriedades físicas dos tecidos biológicos já é realizado há mais de cinco décadas. Em 1965 Elias D. Sedlin estudou 663 amostras de tecidos do fémur obtidas em autópsias de 43 indivíduos. O estudo foi conduzido em condições laboratoriais controladas com o objetivo de estudar as variáveis relacionadas com os métodos de preparação, armazenamento das amostras, idade dos sujeitos, a fonte das amostras e a sua anatomia. A partir da informação obtida foi possível pela primeira vez encontrar um modelo para a deformação para o osso cortical (camada exterior do osso). Sedlin observou que alguns métodos de armazenamento (ex.álcool) e condições de humidade e temperatura influenciam diretamente os resultados obtidos. Neste estudo foi utilizada uma MTU, marca Instron, provida de uma célula de carga com capacidade de fazer medições entre 2g e 5,000 kg. As garras que seguram as extremidades das amostras podiam deslocar-se a uma velocidade entre 0.02 cm/min até 50 cm/min.[5]

Para além da própria máquina de carga um aspeto que é necessário considerar é o desenho das garras que prendem o material em estudo, uma vez que as extremidades das amostras podem assumir várias formas, dependendo do tipo de teste que se pretende realizar. Cada formato tem as suas vantagens e desvantagens, por exemplo: extremidades desenhadas para pinças frisadas são mais fáceis e baratas de fabricar, no entanto, o alinhamento da amostra depende da experiência do técnico. Por outro lado, com um aperto fixo o alinhamento está garantido. Apoios roscados também garantem o alinhamento da amostra, mas o utilizador tem de garantir que as extremidades estão devidamente encaixadas para evitar que a amostra escorregue antes de se atingir a tensão pretendida. De maneira a estudar estes fatores, investigadores de uma universidade no Japão [6] estudaram quais os métodos mais indicados para realizar um teste de tensão em tecidos biológicos, fig 2.1, neste caso numa membrana amniótica.

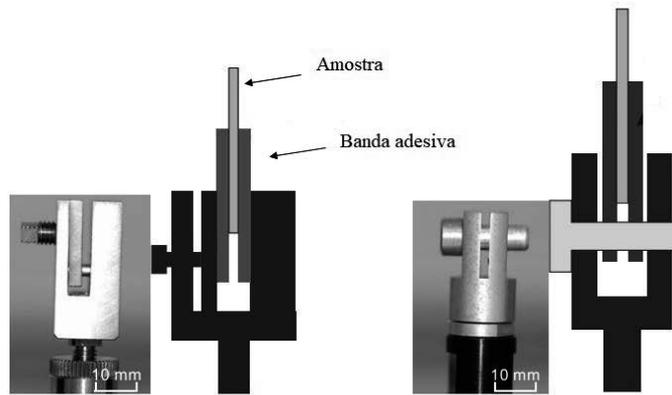


Figura 2.1: Diferentes formatos de garras de tração que foram estudados. À esquerda formato *grip* à direita *pin*. [6]

À esquerda encontra-se apresentado um método que segura a membrana apenas através de um aperto (*grip*) e à direita a utilização de uma cavilha (*pin*) para evitar deslizamentos.

Para esta parte da experiência foram obtidos valores que são bastante vantajosos para a escolha do método a utilizar futuramente.

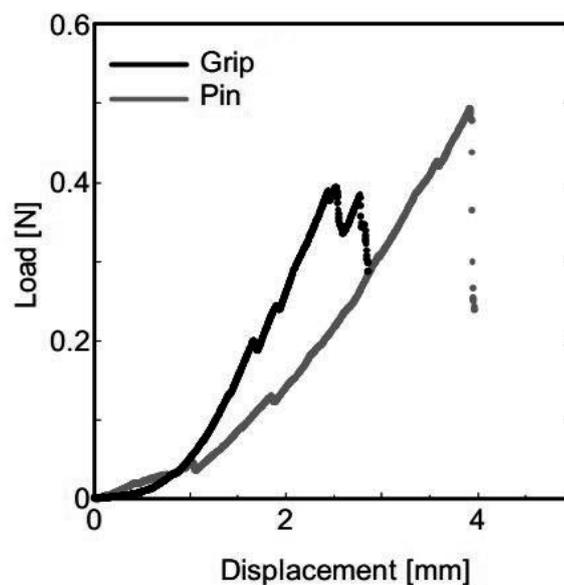


Figura 2.2: Função representativa da deslocação da amostra , relativamente as garras, em função da força aplicada. [6]

A fig.2.2 resulta de testes com amostras do mesmo material, com a mesma forma, realizados com métodos de tração diferentes. Realizando os testes com um aperto no formato *grip* caso a carga ultrapassasse os 0.4 N a amostra deslizava, sendo impossível medir o ponto de rutura da membrana. Este valor é possível de se obter utilizando o aperto do modo *pin*.

A forma da amostra sujeita aos testes tem alguma relevância nos resultados finais, por isso mesmo, foram realizados testes com amostras de formas diferentes fig.2.3



Figura 2.3: Formas da amostra, retangular à esquerda e côncava à direita.[6]

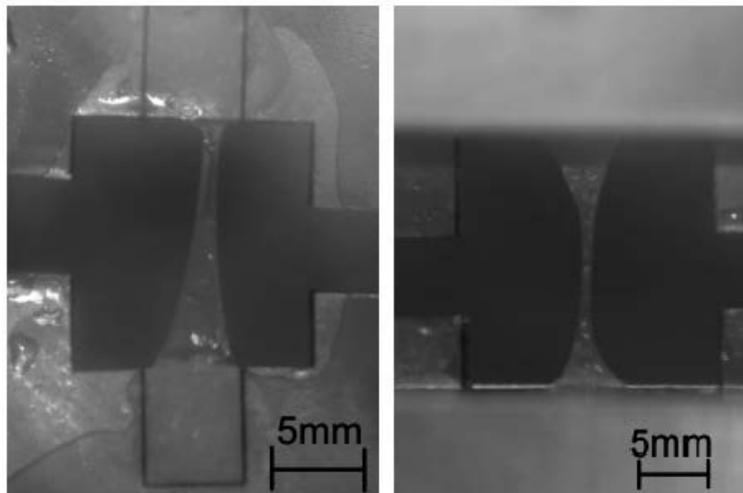


Figura 2.4: Comportamento da amostra para diferentes formatos, à esquerda forma retangular, à direita forma côncava[6]. Ambas as amostras sofrem tração de uma forma longitudinal.

De um modo geral, quando se realiza um teste de tensão pretende-se que o ponto de rutura ocorra no centro da amostra, pelo que se observa na fig.2.4, a forma côncava parece assim a que oferece melhores resultados.

2.2 Máquinas de Teste Universais

Uma Máquina de Teste Universal (MTU) tem este nome devido ao facto de poder realizar uma grande variedade de testes de tração e compressão em materiais, componentes ou estruturas.

Devido à sua versatilidade as MTUs são cada vez mais utilizadas na indústria e na medicina para realizar uma grande variedade de testes:[4]

- **Testes de tração** - existem diferentes testes de tração que podem ser realizados aplicando uma força de tração a uma amostra:
 - Segurar a amostra pelas extremidades e aplicar uma tensão até separar. Isto permite medir a robustez de um material e também a sua elasticidade. fig.2.5

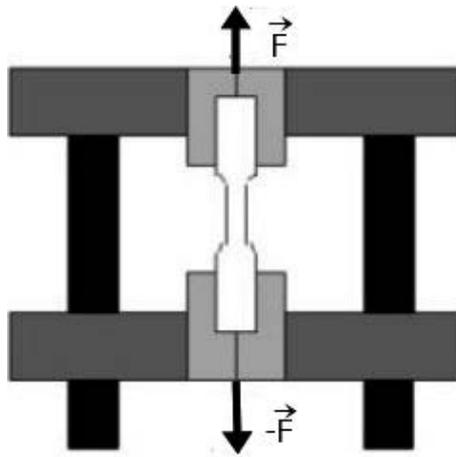


Figura 2.5: Esquema de um teste de tração[7]

- Em vez de alongar apenas uma amostra também é comum realizar este tipo de testes em amostras com dois materiais diferentes, ou seja, um material numa pinça e outro noutra para medir a força necessária para a separação, obtendo-se assim informação sobre a adesão dos materiais. fig.2.6

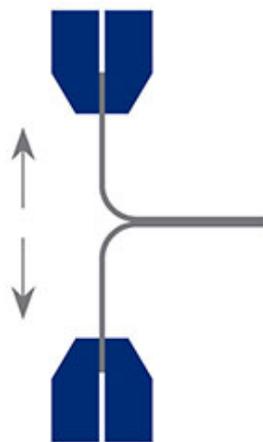


Figura 2.6: Esquema de um teste de adesão[8]

- **Testes de compressão** dentro dos testes de compressão a principal diferença encontra-se na forma como a força é aplicada:
 - os testes de compressão são exatamente o oposto dos de tração na medida em que um material é comprimido até atingir uma certa carga ou distância, ou mesmo até entrar em rutura. fig.2.7

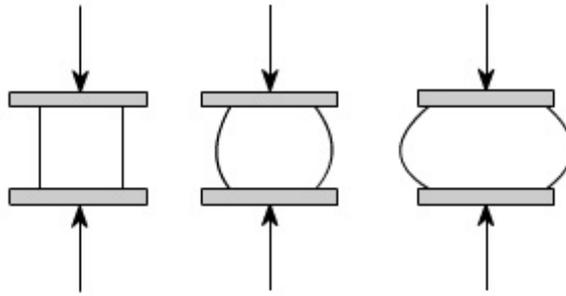


Figura 2.7: Esquema teste de compressão[9]

- colocando a amostra em dois pontos fixos, nas extremidades, é possível medir, com um terceiro ponto central, o comportamento à flexão do material. fig.2.8

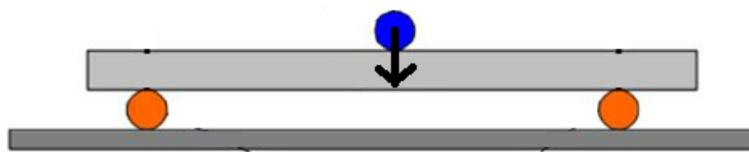


Figura 2.8: Esquema de teste com 3 pontos

- aplicando a carga através de uma área mais pequena, de forma cónica, consegue-se medir a força necessária para perfurar a amostra.

As MTU geralmente podem ser tipificadas em seis tipos de componentes:

1. Estrutura de Suporte: geralmente composta por duas colunas paralelas podendo ter apenas uma para máquinas desenhadas para tensões menores.
2. Célula de Carga: Um transdutor passivo que mede a tensão exercida nos testes.
3. Garras de tração: Uma pinça amovível manual ou auto roscante. Pode ser controlada a velocidade de deslocamento dependendo do teste a efetuar.
4. Medidor de alongação: Em muitos testes é necessário medir o fator de alongação através do deslocamento.
5. Recolha e tratamento de dados: é necessário obter todos os dados em tempo real e fornece-los ao utilizador. É importante também pela capacidade do próprio dispositivo interpretar o teste.
6. Condicionamento do meio: Uma mais valia de uma máquina de carga deste género é a capacidade de controlar o meio de teste e torna-lo o mais próximo possível das condições reais de utilização do material.

Alguns destes componentes estão representados na fig.2.9.

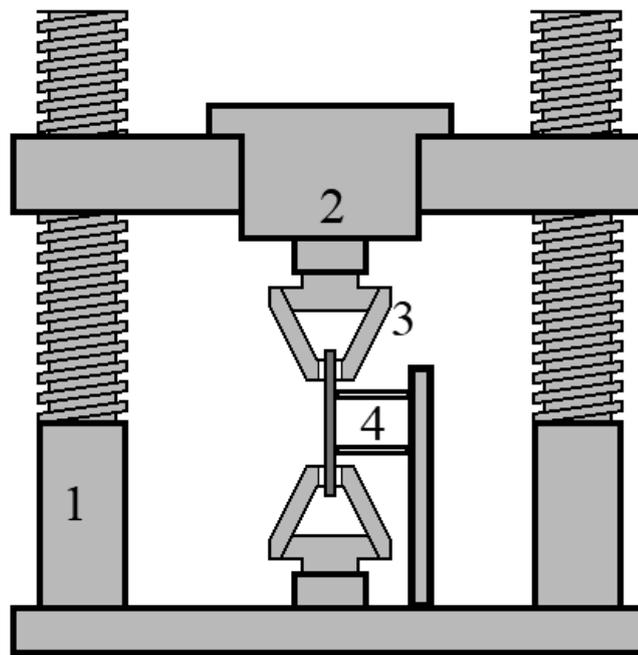


Figura 2.9: Esquema Máquina de Teste Universal[10]

De um modo geral as MTUs podem ser divididas em dois grupos atendendo à sua estrutura, podem ser coluna simples ou coluna dupla. Esta característica tem influência nos resultados obtidos e também no preço. As MTUs utilizadas para maiores cargas, as de coluna dupla são tendencialmente menos deformáveis, por isso mesmo sofrem menor flexão ou torção durante os testes. As MTUs de coluna simples, com aplicações a menores tensões não necessitam as mesmas restrições à deformação, pelo que apenas uma coluna é suficiente. Estas máquinas de coluna simples podem custar entre 5000 a 10 000 euros, enquanto que as de coluna dupla podem rondar entre os 10 000 a 30 000 euros. O sistema de aquisição e análise de dados, sem contar com o computador necessário, podem chegar aos 2000 euros. Os apoios e garras são também dispositivos com custos adicionais tal como a instalação da máquina e a formação dos operadores. Se for necessária uma câmara térmica os preços podem rondar os 8000 a 20 000 euros.[11]

Os aparelhos dedicados a pequenas cargas, apesar de terem dimensões mais pequenas, devido a especificidade podem rondar alguns milhares de euros.

Concluindo, apesar da aparente simplicidade deste tipo de máquinas o valor acrescentado das mesmas é bastante elevado na medida em que a sua construção implica a aplicação de diferentes áreas do conhecimento e que os materiais utilizados para a sua construção são tendencialmente dispendiosos.

Capítulo 3

Fundamento Teórico

3.1 Testes de Tensão

Os testes de tensão são fundamentais para estudar algumas características mecânicas dos materiais. Através destes testes é possível, por exemplo, selecionar quais os materiais mais indicados para uma dada aplicação, fazer um controlo de qualidade e prever como um material irá reagir quando sujeito a maiores solicitações, a solicitações cíclicas ou a solicitações constantes.

As propriedades que são geralmente medidas diretamente num teste de tração são: a resistência à tração, a alongação máxima e a redução em área. A partir destas medidas pode ser determinado o Módulo de Young, a tensão de limite elástico e o endurecimento por deformação.

Os testes de tensão podem ser também divididos em uniaxiais e biaxiais, de acordo, com o número de direções diferentes testadas. Os testes uniaxiais são os mais utilizados para obter as características mecânicas de materiais isotrópicos, os quais se espera se comportem de forma idêntica independentemente da direção da força aplicada no material. Para materiais anisotrópicos, como materiais fibrosos e têxteis, é necessário um teste biaxial de forma a melhor captar o comportamento mecânico.[12]

Uma amostra para ser corretamente analisada deve ter uma forma e área bem definidas. Deverá apresentar as extremidades mais largas de maneira a garantir maior aderência às pinças, evitando deslizamentos ao realizar o ensaio. O centro da amostra tem tipicamente uma área mais pequena para garantir que a deformação ou rutura possam ocorrer no local pretendido.

Os testes de tensão mecânicos podem ser classificados relativamente à integridade da amostra ou à velocidade a que são realizados, como se apresenta seguidamente:

- Integridade da amostra :
 1. **Destrutivos:** provocam a quebra da amostra.
 2. **Não destrutivos:** mantêm a integridade da amostra.

- Velocidade de realização do teste :
 1. **Estáticos:** carga aplicada lentamente.
 2. **Dinâmicos:** carga aplicada rapidamente ou ciclicamente.
 3. **Carga Constante:** carga aplicada durante um grande período de tempo.

Os diferentes tipos de testes têm por objetivo avaliar diferentes propriedades mecânicas dos materiais. Por exemplo, cargas aplicadas ciclicamente tem por objetivo analisar a fadiga do material enquanto que cargas aplicadas lentamente são geralmente dedicadas ao estudo de relação tensão/deformação.

3.1.1 Lei de Hooke

Além da alteração do movimento as ações designadas como forças podem alterar a forma de um corpo criando deformação. Dependendo quer da intensidade da força quer das propriedades dos materiais a deformação criada pode ser temporária ou permanente. Na situação em que a deformação é tal que apenas se verifica enquanto a solicitação existe e que a forma inicial é recuperada na ausência de carga é usual dizer-se que este é um comportamento elástico. No caso da deformação se tornar irreversível diz-se que a deformação é plástica. Pode acontecer que a deformação não seja completamente irreversível mas que a forma inicial seja atingida após um período de tempo razoável após a retirada de carga. Este é o caso, por exemplo de um êmbolo que comprime ar. Este comportamento não é puramente elástico na medida em que a forma inicial não é retomada imediatamente - no sentido de um curto período de tempo - nem é irreversível. Estes processos designam-se por isso de visco-elásticos, na medida em que apresentam viscosidade que se revela no longo período de tempo necessário para retomar à forma inicial, mas também são elástico uma vez que acabam por retomar à sua forma inicial. Para além deste aspeto, quer a deformação elástica quer a deformação plástica não é sempre igual de material para material revelando-se bastante mais rica do que à partida se poderia suspeitar. Por exemplo, a deformação elástica pode ser linear ou não linear significando que a deformação pode apresentar proporção constante com a tensão de deformação (linear) ou não (não-linear). E materiais distintos apresentam tipos de deformação plástica diferente.

Um dos primeiros cientistas a interessar-se por este tema foi Robert Hooke[13], que em 1660 verificou que existia uma proporcionalidade entre forças deformantes e o alongamento produzida. Ao estudar uma mola de comprimento unitário, observou que a sua deformação é proporcional a força aplicada para comprimir ou esticar, podendo esta relação ser traduzida pela equação 3.1:

$$F = -k \times \Delta l \quad (3.1)$$

onde K é a constante de elasticidade da mola e Δl a deformação sofrida.

A lei de Hooke pode ser utilizada desde que o limite de proporcionalidade do material não seja excedido, a partir deste limite o material passa a ter um comportamento plástico. Por outro lado, a constante de elasticidade pressuposta na lei de Hooke caracteriza um dado objeto, uma da mola dependendo não apenas do material que a compõe mas também de alguns aspetos geométricos. A possibilidade de se ter uma constante característica de um material é uma ideia atraente e que foi desenvolvida na relação entre tensão e deformação adiante discutida.

3.1.2 Curva tensão deformação

A relação entre a tensão, força aplicada por unidade de área, e deformação, razão entre o alongamento ($\Delta\ell$) pelo comprimento inicial (ℓ_0), pode ser representada por uma curva, a chamada curva tensão deformação. Esta curva é diferente e única para cada material a uma dada temperatura.

As curvas de tensão deformação variam bastante de material para material, até, no mesmo material os valores apresentam grandes variações dependendo da temperatura da amostra e da velocidade a que se aplica a carga. Mesmo assim é possível distinguir características comuns entre os vários tipos de materiais e dividi-los em dois grupos: dúcteis ou frágeis.

Os materiais dúcteis quando sujeitos a uma tensão de tração progressivamente maior, apresentam um comportamento elástico, seguido de um comportamento dito de escoamento sobre tensão constante e posterior endurecimento por deformação até à rutura. A rutura dá-se devido a tensões de corte. Por outro lado, os materiais frágeis são caracterizados pelo facto da rutura ocorrer sem nenhuma alteração visível das dimensões do mesmo.

A representação da curva tensão-deformação, fig.3.1, pode ser grosseiramente dividida em região elástica e região plástica. A parte correspondente à região elástica diz respeito às situações nas quais os materiais retornam à sua forma inicial quando a solitação mecânica cessa, já na região plástica ocorrem deformações permanentes.

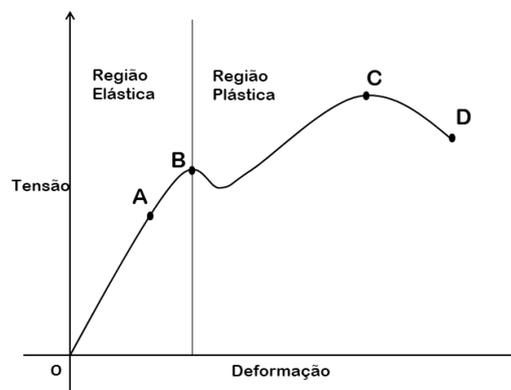


Figura 3.1: Curva Tensão-Deformação, A - limite proporcional, B - limite elástico, C - limite de resistência a tração, D - ponto de rutura.

No gráfico é possível identificar diferentes porções da curva evidenciando comportamentos distintos do material face à tensão submetida. O ponto A corresponde ao limite proporcional, até este ponto a deformação é diretamente proporcional à tensão obedecendo à lei de Hooke.

O ponto B é denominado por limite elástico, a partir deste ponto o material adquire deformações permanentes e não consegue retornar a sua forma original.

O limite de resistência à tração pode ser definido pelo ponto C e corresponde à tensão máxima que um material pode aguentar até ceder.

Por fim, o ponto de rutura D é ponto em que o material parte ou se fraciona.

O módulo de Young pode então ser obtido na região onde a lei de Hooke é válida.

3.1.3 Módulo de Young

O módulo de Young, também conhecido como módulo de elasticidade é uma propriedade que caracteriza os materiais relativamente à sua rigidez.[14] É definido pela relação entre a tensão aplicada e a deformação elástica longitudinal do corpo. O módulo de Young, E é dado pela relação entre a tensão aplicada σ pela deformação elástica ε :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

onde σ é a tensão aplicada em $\frac{N}{m^2}$ e ε é a deformação elástica longitudinal do corpo.

O módulo de Young permite calcular as alterações de dimensões de um material ao ser sujeito a uma tensão ou compressão. Por exemplo, permite prever a resistência de um material ao ser sujeito a uma tensão.

O módulo de Young pode também ser calculado da seguinte maneira:

$$E = \frac{F \ell_0}{A \Delta \ell} \quad (3.3)$$

onde F é a força em N a que o corpo está sujeito, A a área de secção onde é exercida a força (m^2), $\Delta \ell$ a variação do comprimento e ℓ_0 o comprimento inicial, ambos em metro.

3.1.4 Tensão de limite elástico

Tensão de limite elástico define o valor a partir do qual um material começa a ter um comportamento plástico. Quando uma amostra é sujeita a tensões inferiores ao limite de tensão elástico, o corpo volta a sua forma original ao aliviar essa tensão. No entanto, se este valor for ultrapassado algumas deformações serão permanentes e irreversíveis.

De um modo geral é muito difícil precisar o valor da tensão de limite elástico devido a variação nas curvas tensão-deformação apresentada pelos materiais.

Quando um ponto de limite elástico não se encontra bem definido com a forma da curva tensão-deformação é então usual definir-se uma tensão de limite elástico compensada.[15] Neste caso o valor é escolhido a partir da deformação tomada como uma abcissa do gráfico deformação-tensão, escolhendo-se o ponto de interseção entre uma reta paralela à zona que obedece à lei de Hooke , com valor $x = 0.2\%$ (limite convencional), com a curva tensão-deformação. Neste caso o ponto 2 na fig.3.2

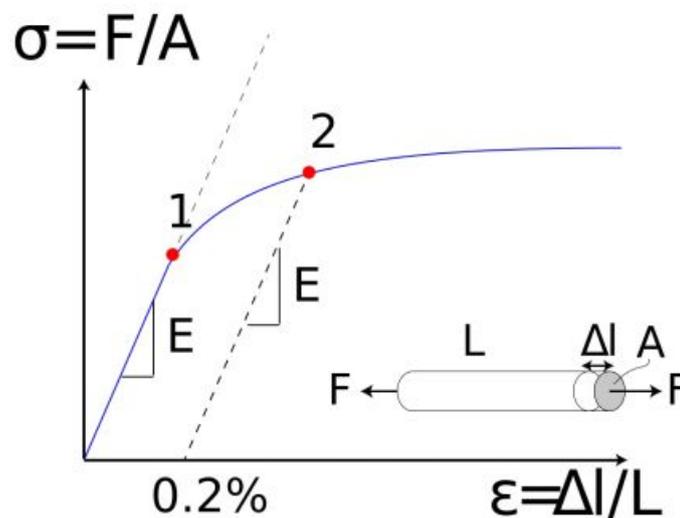


Figura 3.2: Tensão de limite elástico real [16]

3.1.5 Limite de resistência a tração

O limite de resistência à tração é a tensão máxima que um material pode suportar ao ser alongado antes de haver uma rutura, fig.3.3. Este valor não depende do tamanho da amostra, depende claro do tipo de material, mas também da preparação da amostra, da presença de defeitos na superfície e até da temperatura em que o ensaio é realizado.

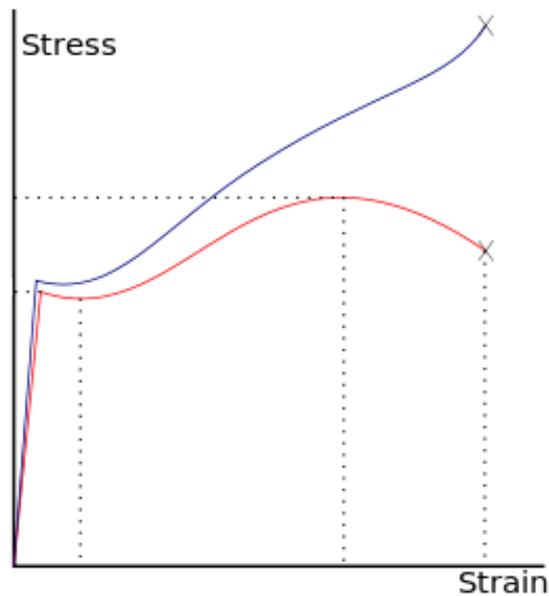


Figura 3.3: Curvas tensão deformação com os respectivos limites de resistência a tração[17]

3.1.6 Deformação

Existem duas formas de estudar a deformação, a teoria das grandes deformações, para a qual a rotação e a deformação pode ser arbitrariamente grande, e a teoria das deformações infinitesimais, que aborda a deformação de um corpo onde a elongação é muito pequena. Para as diferentes teorias há formas diferentes de considerar a deformação.[12]

A deformação é o parâmetro que permite medir a ductilidade de um material, por outras palavras, é o rácio entre o comprimento final de um material num teste de tensão com o comprimento inicial. Ao fazer esta medição o valor para materiais frágeis será mais baixo que os dúcteis, estes apresentam uma elongação muito pequena pois não apresentam deformação plástica. A deformação é dada por 3.4:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.4)$$

Capítulo 4

Materiais e Métodos

O objetivo deste trabalho é criar um sistema capaz de realizar testes de carga num eixo com movimento numa direção fixa. O aspecto diferenciador este projeto seria sobretudo as dimensões, a sua facilidade de utilização juntamente com a possibilidade de sofrer alterações e a sua versatilidade global. Desta forma, o desenho e os materiais a utilizar foram investigados no sentido de otimizar os objetivos iniciais.

A estrutura da maioria das MTUs contém duas calhas lineares que definem e suportam o movimento realizado pela ponta de prova. O movimento extremamente preciso é assegurado por um veio/eixo interior que ao rodar provoca o deslocamento através de um mecanismo semelhante a um parafuso. Com base nas estruturas já disponíveis no mercado, e aproveitando também uma estrutura já existente [18], foram escolhidos os componentes que melhor serviam cada propósito.

4.1 Motor de Passo

Para a rotação controlada do veio roscado optou-se por um sistema baseado num motor de passo. Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que podem ser controlados digitalmente através de um hardware/software específico, o controlo será feito por software pelo computador através da porta USB 2.0. Estes dispositivos têm a capacidade de produzir sem recurso a desmultiplicadores e com elevada precisão deslocamentos angulares discretos ($1,8^\circ$ - 90°), por isso são muito utilizados na construção de mecanismos que requeiram precisão em aplicações de posicionamento, scanners, impressoras, robôs, etc... fig.4.1

Quando ocorre a entrada de um impulso digital, o eixo do motor (rotor), roda um pequeno ângulo (passo) e permanece estável nessa posição se mais nenhum impulso for aplicado. Se forem aplicadas sequências de impulsos, o motor roda com uma frequência que é proporcional à frequência das sequências enviadas. O motor de passo utilizado neste projeto é de íman permanente, unipolar (com seis terminais de ligação), com tensão de alimentação de 12V. Este tipo de motores são normalmente

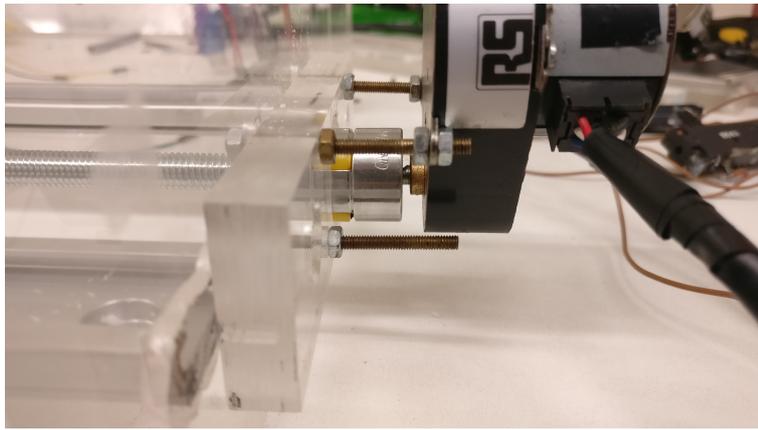


Figura 4.1: Motor de passo utilizado com o respetivo acoplador

constituídos por um rotor formado por conjuntos de ímanes permanentes dispostos radialmente em torno do veio, e por um estator que é constituído por duas secções, cada uma com o seu enrolamento. Os enrolamentos do estator têm diferentes configurações, podendo a corrente fluir sempre no mesmo sentido (motor unipolar) ou em diferentes sentidos (motores bipolares). Apesar do motor utilizado ser unipolar é possível coloca-lo em modo de funcionamento bipolar por quanto não se faça uso já que os terminais de ligação ficariam desta forma ligados em série. fig.4.2

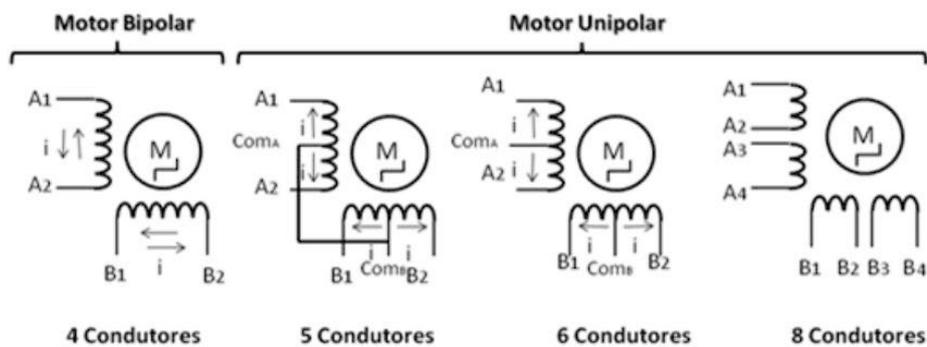


Figura 4.2: Configuração dos enrolamentos nos diferentes motores[18]

4.1.1 Modo de funcionamento

O veio, do motor de passo, roda consoante as sequências de impulsos que excitam cada enrolamento podendo ter duas configurações: passo completo, com um ângulo de passo de $7,5^\circ$ que corresponde a 48 passos por volta, e meio passo. O modo passo completo é o mais indicado uma vez que apresenta um número menor de passos por volta, o que proporciona uma maior velocidade, e também porque este apresenta um maior binário. De maneira a aumentar este binário (máximo 121×10^{-3} N.m), existe uma caixa redutora entre os veios roscados e o rotor do motor de passo, fig.4.1, com um fator de desmultiplicação de 25:1. A utilização deste sistema tem duas implicações, por um lado a precisão de posicionamento aumenta, por outro a velocidade diminui.

É possível, ainda assim, aumentar a velocidade de rotação se se aumentar a frequência das sequências.

No modo passo completo, a alimentação pode ser numa fase ou duas fases, a diferença está no número de enrolamentos que recebem corrente e, conseqüentemente no binário final. Como se pretende ter um binário de saída elevado o modo de alimentação preferencial é o de duas fases. Uma vez que dois meios enrolamentos recebem corrente ao mesmo tempo, criam um maior campo magnético, proporcionando um binário de rotação mais elevado ($\pm \times 10^{-3}$ N.m). As sequências de impulsos geradas podem ser representadas na tabela 4.1:

Tabela 4.1: Sequência de impulsos

Passos	Terminais				Com
	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	
1	1	0	1	0	1
2	0	1	1	0	1
3	0	1	0	1	1
4	1	0	0	1	1

A ordem da sequência pode ser invertida alterando sentido de rotação. Desta forma, a escolha do sentido de rotação (horário ou anti-horário) é facilmente estabelecida pela ordem da sequência de excitação dos enrolamentos. A biblioteca do software utilizado possui ferramentas que facilitam a interação com este tipo de motores, permitindo definir facilmente a velocidade de rotação do motor.

4.1.2 Hardware de apoio

Para o controlo dos motores de passo é necessário excitar sequencialmente e repetidamente os vários terminais dos motores, para isso é necessário amplificar a potência de entrada dada por cada pino de saída do software de controlo, uma vez que irá ser usada uma porta USB 2.0 que está limitada à saída de 5V e menos que 100 mA. É necessário então um circuito que garanta a potência adequada em cada pino para que o motor possa rodar. É possível utilizar uma alimentação externa associada a circuitos integrados, estes dispositivos são designados por drivers de potência. Existem vários destes elementos disponíveis, no entanto o utilizado foi o UNL2003A. fig4.3 Este circuito integrado possui 7 entradas TTL que podem controlar até 7 saídas, tem ainda um pino de terra (pino 8) e um de tensão de alimentação de 12V (pino 9). Os UNL2003A são compostos por arrays de transístores darlington com emissores comuns e díodos de proteção integrados.

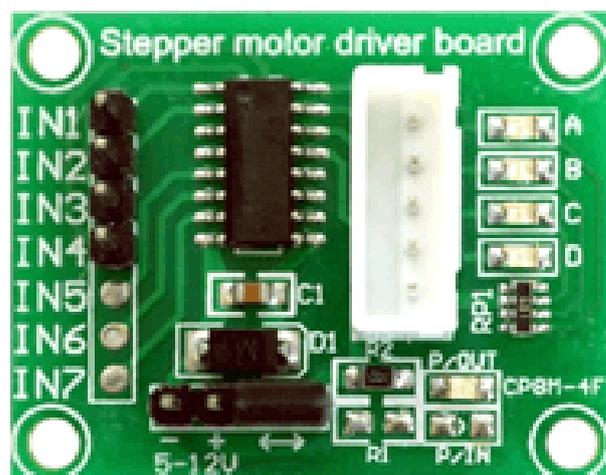


Figura 4.3: Driver de apoio do motor de passo ULN2003A

Este modelo de controlo foi utilizado uma vez que é de fácil manuseamento e tem uma grande compatibilidade com a placa Arduino utilizada, para além disso é um dispositivo frequentemente utilizado no controlo dos motores de passo.

4.1.3 Calibração e repetibilidade

Depois de construído o sistema foi necessário conhecer o comportamento do mesmo levando-se a cabo uma série de procedimentos com vista à sua caracterização. Entre estes procedimentos, um passo prévio importante é o de calibração de todo o sistema ou de partes. Os sistemas eletrónicos, de uma forma geral, necessitam de ser calibrados de maneira a que possam operar em unidades conhecidas e assim possam interagir quer com o ser humano quer com outras máquinas. A calibração é um processo que leva à obtenção da respetiva curva de calibração que é usada para melhor entendimento do dispositivo e também para a sua interligação com o mundo real.

Depois de conhecida a curva de calibração os valores recolhidos pelos instrumentos são convertidos o que permite ao utilizador obter os dados com a maior precisão possível.

Para a calibração do motor de passo foram obtidos valores através da rotação do motor em ciclos de 25 voltas acompanhada da medição dos valores provenientes do transdutor de posição e de uma craveira digital. Para a obtenção destes valores o motor de passo realizou ciclos de 25 voltas consecutivos com um espaçamento temporal de 3 segundos entre o fim de um ciclo e início do próximo.

Um dos aspetos mais importantes é saber a repetibilidade que um sistema apresenta. A repetibilidade é geralmente caracterizada pela distribuição de frequências de um grande número de dados, que tipicamente segue uma distribuição normal, e avaliando a sua média e o desvio padrão. A repetibilidade traduz no fundo a precisão do sistema.

Para efetuar o controle da repetibilidade do motor de passo foram efetuados deslocamentos de dois centímetros e, para cada um, recolheu-se um par de valores correspondente ao valor do potenciômetro e da craveira digital. Para realizar os testes de repetibilidade o motor rodava o número de voltas necessário para percorrer dois centímetros, recolhiam-se os valores e realizava o mesmo número de voltas no sentido contrário.

4.2 Transdutor de Posição

Para monitorizar o deslocamento nos testes, foi necessário arquitetar um sistema capaz de realizar uma leitura precisa do posicionamento. Existem inúmeras formas de medir posição, sendo uma das maneiras frequentemente selecionada o uso de um sensor de ultrassons, pois este é fácil de gerir, barato e versátil. No entanto, este tipo de dispositivos apresentam uma precisão de cerca de 3mm, o que é manifestamente insuficiente para o nosso projeto.

Através do número de voltas do motor e do fator de desmultiplicação da caixa redutora, seria também possível estimar a distância que foi percorrida, todavia, devido aos possíveis pequenos desfasamentos entre o passo da porca e o passo do parafuso, e a irregularidade dos passos na extensão no veio, seriam obtidos erros muito difíceis se não mesmo impossíveis de prever.

Os transdutores de posição, são desta forma os aparelhos indicados para apresentar a posição em determinado instante com precisão.

Os dispositivos indicados para este trabalho seriam os *encoders*, dispositivos eletromecânicos que produzem impulsos elétricos a partir do movimento do seu cursor, no entanto o seu elevado custo inviabiliza a sua utilização nesta aplicação.

Existe outro tipo de sensores, também dispositivos eletromecânicos que se baseiam na variação da resistência, que fornecem uma variação de tensão aproximadamente proporcional ao deslocamento da plataforma. Estes são os sensores resistivos potenciométricos lineares. fig.4.4



Figura 4.4: Potenciômetro utilizado no projeto

4.2.1 Modo de Funcionamento

Nos potenciômetros lineares existe uma parte móvel que percorre a resistência de comprimento L criando uma tensão de saída dependente da posição em que se encontra.

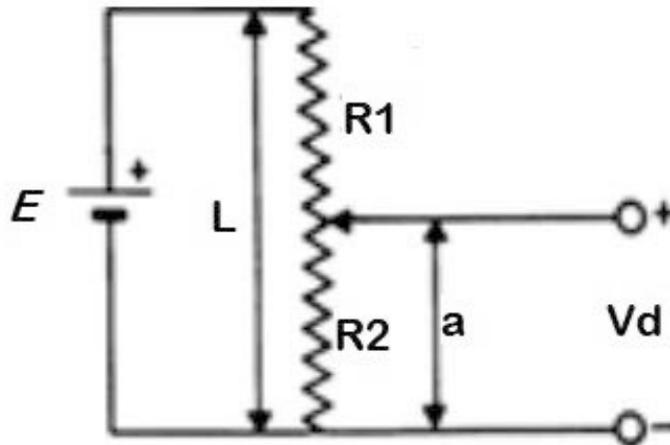


Figura 4.5: Funcionamento de um potenciômetro

A tensão de saída é pode ser obtido por aplicação direta da lei de Ohm ao circuito em causa, obtendo-se:

$$Vd = \frac{R2}{R1 + R2} E$$

No sistema implementado foi utilizado um potenciômetro linear de $100\text{ k}\Omega$ que acompanha o movimento linear da plataforma móvel.

4.2.2 Calibração e repetibilidade

Uma vez que o potenciômetro irá medir valores relativos ao deslocamento provocado pelo motor de passo os dados de calibração e repetibilidade dos dois dispositivos foram obtidos realizando os mesmos testes. Durante os testes de medição da distância percorrida para um dado número de voltas do motor de passo foram obtidos também os valores digitais obtidos pelo potenciômetro.

4.3 Célula de carga

Uma célula de carga é um transdutor de força com pequenos elementos resistivos (geralmente, extensômetros) colocados em localizações específicas. fig.4.6

As células de carga são desenhadas para medir força numa direção específica e ignorar outras direções. É possível que algumas células consigam obter dados em mais direções, no entanto a sensibilidade do sensor seria bastante diferente. O sinal gerado

pela célula é muito pequeno e precisa de ser amplificado recorrendo-se geralmente à utilização de uma ponte de Wheatstone que permite a conversão da variação de resistência numa tensão elétrica [19]



Figura 4.6: Célula de Carga

Este tipo de célula de carga com um apoio é muito utilizado em aplicações de joalharia, devido à sua sensibilidade. É montada aparafusando a extremidade onde os fios estão colocados e a força é aplicada na extremidade oposta.

A célula de carga utilizada tem uma capacidade máxima de 5 kg e uma precisão tabelada de 0.05% .

As diferenças causadas a um destes circuitos por uma força são muito menores que as causadas por uma variação de temperatura, o que significa que a variação de temperatura é um aspeto importante a controlar. Para isso células de carga de maior qualidade utilizam um fator de correção para compensar as alterações devidas à temperatura. Ao comparar a taxa de expansão dos extensómetros com a expansão do metal, a tensão de desvio pode ser compensada à medida que a célula aquece ou arrefece. Existe outro método mais fiável, que envolve o estudo de vários dispositivos de medição, comparando a variação de resistência com a temperatura.

4.3.1 Modo de Funcionamento

Uma célula de carga converte uma força que lhe seja aplicada num sinal elétrico. A medição é feita por pequenos extensómetros, estes estão ligados a uma parte da estrutura que deforma quando a força é aplicada. Quando os extensómetro são deformados a sua resistência elétrica varia proporcionalmente.

4.3.1.1 Ponte de Wheatstone

Uma ponte de Wheatstone é um circuito elétrico utilizado para medir resistências desconhecidas comparando duas partes do circuito que estão ligadas por uma "ponte", como representa a figura 4.7

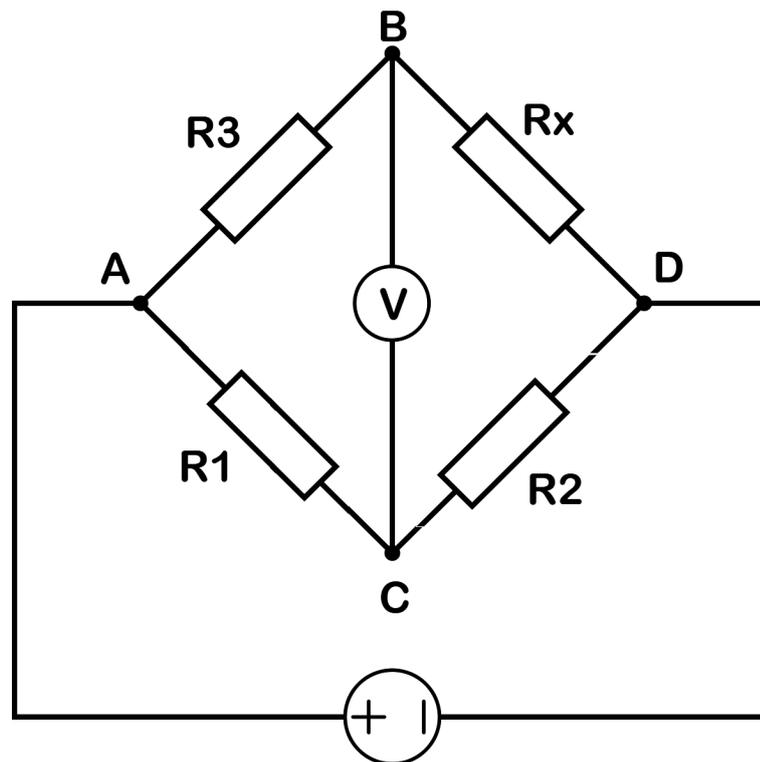


Figura 4.7: Ponte de Wheatstone[20]

R_x é a resistência desconhecida a ser medida, R_2 e R_3 são resistências com valores conhecidos e R_1 é um potenciômetro.

Sendo a tensão de entrada conhecida e constante, caso $R_1/R_2 = R_3/R_4$ então V será zero. Havendo uma alteração na resistência variável a tensão de saída também irá variar, da forma:[21]

$$V = \left(\frac{R_x}{R_x + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) * V_{in} \quad (4.1)$$

numa célula de carga, esta variação da resistência vai acontecer com a flexão da mesma, como se exemplifica na figura 4.8

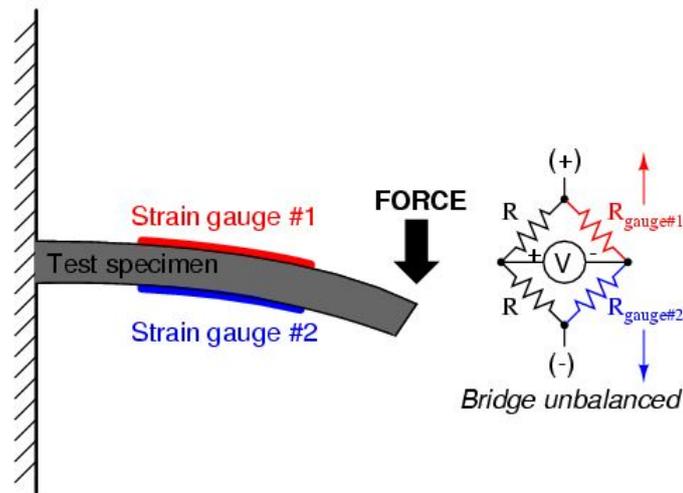


Figura 4.8: Exemplo de flexão de uma célula de carga e consequente alteração dos valores das resistências [22]

4.3.2 Hardware de apoio

O HX711, fig.4.9 é um conversor analógico para digital, de 24-bit, muito utilizado em balanças e aplicações industriais, que permite medir facilmente os valores obtidos por uma célula de carga. Ao utilizar este circuito com a placa Arduino é possível ler as variações de resistência na célula de carga e com as devidas calibrações é possível obter valores com elevada precisão.

O seu princípio de funcionamento consiste em converter a variação de resistência produzida pelo sensor de carga num sinal elétrico. O HX711 comunica com o Arduino através de TTL RS232 utilizando uma interface com dois fios, *Clock* e *Data*. A comunicação com o mesmo é facilitada pela existência de várias livrarias que facilitam a leitura dos dados.

As células de carga utilizam cinco ligações para ligar ao HX711, geralmente com cores que identificam bem as suas funções.

- Vermelho (Exc.+ ou VCC)
- Preto (Exc.- ou GND)
- Branco (Amp.+,Out.+)
- Verde (Amp.-,Out.-)
- Amarelo (Opcional, utilizado para proteção de interferências eletromagnéticas)

Estas *drivers* funcionam com uma tensão entre 2.7V e 5V e uma corrente aproximada de 1.5 mA.

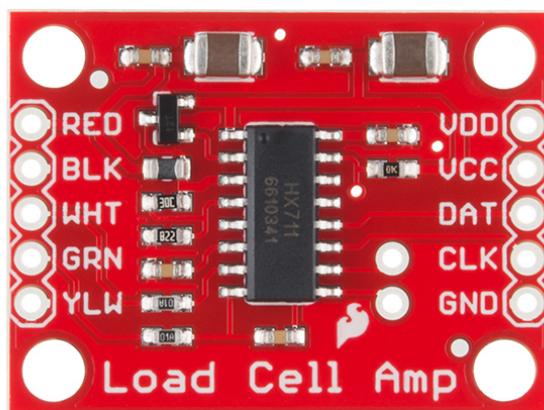


Figura 4.9: Driver de apoio da célula de carga HX711

4.3.3 Calibração

A célula de carga, sendo um dos elementos mais importantes deste projeto, tem também de ser calibrada. O software de aquisição tem disponível a opção de calibração, para isso é necessário medir o valor obtido sem carga e com massas conhecidas. O software devolve um valor de calibração que é utilizado de forma a converter os dados nos valores pretendidos.

A driver utilizada, HX711, facilita a utilização das células de carga; utilizando uma massa bem calibrada altera-se o fator de calibração até o valor apresentado pela função ser o pretendido. Foram utilizados diferentes massas calibradas de 50g, 100g, 200g e 300 g e para cada uma delas foi obtido o fator de calibração da célula.

4.3.4 Repetibilidade

Para a realização destes testes a célula de carga foi fixada a uma mesa com a ajuda de um grampo.

Para verificar a repetibilidade da célula de carga foram realizadas várias medições utilizando a mesma massa com cerca de 987g.

Foram realizadas quatro medições consecutivas (A,B,C,D) obtendo cerca de 100 valores para cada.

Os dois primeiros testes foram realizados com cerca de 30 segundos entre eles, primeiro o teste A e depois o teste B.

De seguida recolheram-se mais dois conjuntos de valores, C e D. O teste C começou cerca de 30 segundos depois de finalizar o teste B. O teste D foi iniciado cerca de 2 segundos depois de finalizado o C.

Por fim realizou-se um teste de comportamento da célula de carga. O teste começa sem carga, aplica-se a carga durante algum tempo e volta a ser retirada. Assim é possível estudar como varia a resposta da célula quando se retira bruscamente a carga, semelhante ao que acontece em testes de tensão.

4.4 Garras de Tração

Para realizar um teste de carga em qualquer material é muito importante aplicar a força de forma correta, para isso é necessário saber o tipo de apertos a utilizar dependendo da amostra que se está a estudar. Uma vez que este projeto tem como objetivo realizar testes em tecidos biológicos é necessário ter preocupações com o tipo de material e também tentar ao máximo facilitar o seu manuseamento.

Existe uma grande variedade de garras (pinças) para diferentes aplicações.[23] Existem as garras de aperto hidráulicas que têm uma vantagem relativamente à rapidez e precisão com que prendem a amostra. As garras de aperto manual são comparativamente mais baratas, mas por poderem causar alguma perturbação durante o aperto são também comparativamente menos fiáveis. As garras de aperto manual lateral ou frontal são geralmente utilizadas para ensaios com resistências mecânicas mais baixas. Existem ainda as garras auto-roscantes por efeito de alavanca ou por efeito de cunha, que se utilizam em materiais com maior alongação e tensões de rutura. Podem também ser encontradas outro tipo de garras para efeitos de torção ou compressão, que não se encontram para já nos objetivos do projeto.

Associado às garras de tração é necessária muitas vezes a utilização de outros componentes para estabelecer o contacto e aumentar a aderência à amostra. Estes materiais podem depender também do tipo de teste que se pretende realizar podendo ser em diamante para materiais com grandes tensões de rutura ou de carbono para amostras mais frágeis.[23]

Para os testes em tecidos biológicos que se pretendem realizar, uma vez que estão envolvidas pequenas tensões de rutura, as garras de aperto lateral serão suficientes para garantir um bom aperto. Para garantir uma melhor adesão pode utilizar-se um adesivo de carbono que também evita que a amostra sofra danos nas extremidades dos apertos.[6]

A versatilidade do produto final é muito importante. Por isso mesmo, este projeto não tem umas garras acopladas de forma definitiva, em vez disso pretende-se dar a possibilidade destas serem alteradas conforme o desejado. Assim, este equipamento conta com duas garras 4.10 que foram desenhadas através de um programa de modelação 3D que, devido ao seu formato, oferecem uma solução para diferentes utilizações.



Figura 4.10: Modelo 3D das garras utilizadas feito a partir do software Inventor[®]

Um dos problemas encontrados por investigadores que utilizaram outras MTU para realizar testes de rutura em materiais biológicos foi a dificuldade em adaptar as garras que tinham à disposição aos materiais frágeis que pretendiam estudar. [1]

As garras foram especialmente desenhadas para suportarem amostras colocadas entre laminas, semelhantes às utilizadas em microscópios, facilitando a utilização e permitindo realizar o teste num meio com nutrientes.

4.5 Arquitetura da plataforma

O desenho tridimensional da estrutura, na fig.4.11, foi realizado utilizando o software Inventor[®].

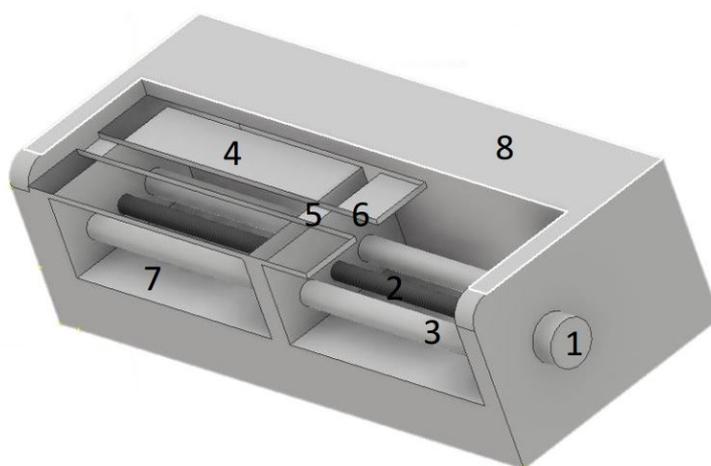


Figura 4.11: Arquitetura da Plataforma: 1-Motor de Passo; 2-Veio Roscado; 3-Guias Deslizantes; 4-Zona onde se encontrará o material suporte das amostras; 5-Posição das garras; 6-Local onde se pretende colocar a célula de carga; 7-espaço destinado a outros instrumentos de medida; 8- Compartimento do hardware de controlo.

Na fig.4.11 os componentes 1, 2 e 3 são os responsáveis pelo deslocamento da plataforma que sustem as garras. A zona 4 exemplifica as laminas que podem ser utilizadas como suporte das amostras. As zonas 5 e 6 referem-se aos locais onde se pretendem colocar as garras e célula de carga respetivamente. O número 7 diz respeito à zona onde se devem colocar os variados instrumentos de medida relativos ao deslocamento ou para a obtenção de outras características. Por último na zona 8 serão colocados todos os componentes relativos ao hardware utilizado para a obtenção dos dados.

As estrutura desenhada apresenta as dimensões 40x30x10 cm que foram as consideradas suficientes para permitir testes a amostras com deformações maiores.

No contexto de testes de carga o mais indicado seria uma estrutura o mais resistente possível, como por exemplo uma estrutura em metal (aço, ferro ou alumínio, por exemplo), no entanto este tipo de material impossibilitaria futuros testes óticos e uma portabilidade mais reduzida. As placas de acrílico, fig.4.12 cumprem as necessidades deste projeto sendo resistentes, permitem uma observação das amostras e são relativamente leves.

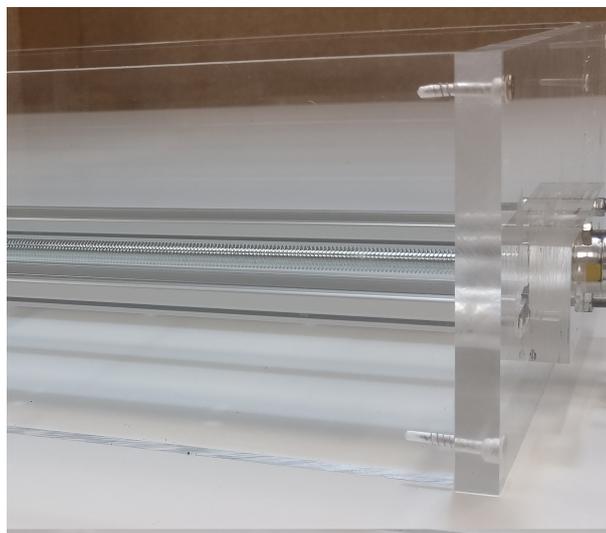


Figura 4.12: Placas de acrílico utilizadas na estrutura.

Para o veio roscado, responsável pelo deslocamento das garras, foi utilizado um veio com 8mm de diâmetro em aço. Este veio roda em dois rolamentos rotativos que se encontram fixos à lateral da plataforma. O veio roscado em rotação funciona como um parafuso provocando o movimento responsável pela deformação das amostras. Para se obter uma rotação com o mínimo de deslizes possível foi utilizado um acoplador linear entre o motor de passo e o veio roscado.

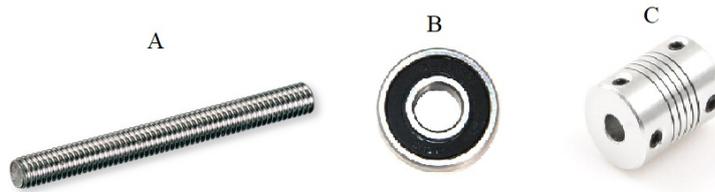


Figura 4.13: Componentes utilizados para na ligação do motor ao veio. A - Veio Roscado, B - Rolamento, C - Acoplador linear

O trajeto linear é garantido por guias deslizantes e respetivas mesas auto lubrificadas. Este tipo de mesa permite um deslizamento sem folgas e um baixo coeficiente de atrito, tanto estático como cinético, tendo ainda a vantagem de ter um peso muito reduzido.



Figura 4.14: Pequena secção da calha deslizante à esquerda e mesa auto lubrificada à direita

4.6 Software de Controlo - Arduino

O Arduino é um micro-controlador programável que além de possuir vários ADC de 10 bits possui também várias entradas e saídas digitais, podendo algumas das saídas digitais serem programadas para funcionarem como uma saída PWM.

O Arduino funciona com uma tensão operacional de 5 V e tem um clock speed de 16 MHz. Dispõe também de uma memória de 32 kb e suporta uma corrente 20 mA em cada pin.

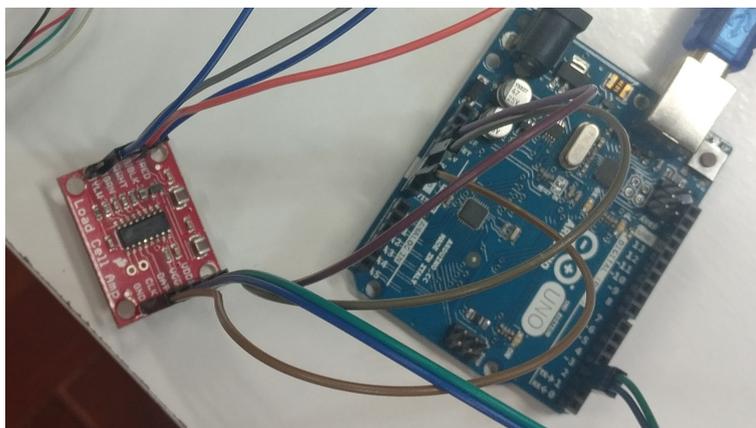


Figura 4.15: Arduino Uno

Os Arduinos têm a vantagem de serem programados em open-source, o que significa que existe uma enorme comunidade a usar estes micro-controladores, o que é benéfico pois já existe uma grande documentação base.

A nível de hardware, a comunidade Arduino tem uma oferta bastante alargada que permite obter uma grande diversidade de sensores e atuadores compatíveis.[24]

4.7 Software de Aquisição e Tratamento de Dados

Um Arduino pode ser programado utilizando várias linguagens, mesmo assim é providenciado de origem um ambiente de desenvolvimento (IDE) com várias ferramentas e que garante o bom funcionamento do sistema. fig.4.16

O IDE disponibiliza o *serial* onde podem ser lidos todos os valores em tempo real. Estes valores são mostrados a uma taxa bastante elevada o que dificulta a perceção do desenvolvimento do teste. Para realizar um tratamento mais aprofundado utiliza-se outro software, o *Processing 3.3*, fig.4.16. A partir deste segundo software de apoio é possível representar em tempo real, e de uma forma gráfica compreensiva, os dados obtidos na célula de carga e no transdutor linear.

O *Processing 3.3* é também um software *open source* que permite ainda guardar todos os dados em formato texto (.txt) para poderem ser futuramente estudados ou utilizados.

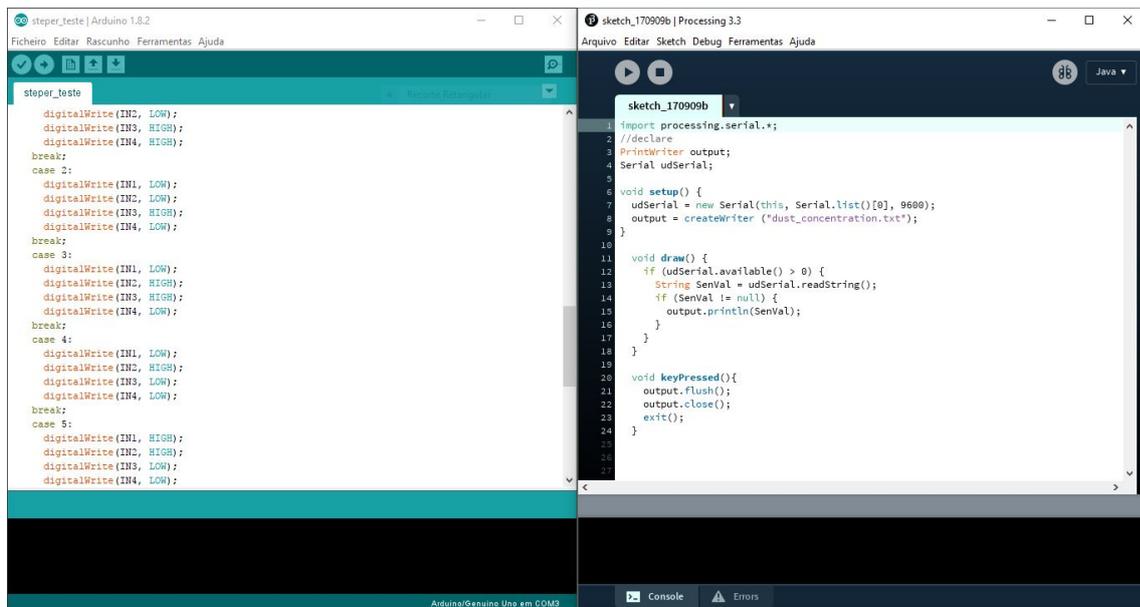


Figura 4.16: Ambientes de trabalho dos softwares utilizados. A esquerda o Arduino (IDE) e a direita o Processing 3.3

Com as opções oferecidas pelo *Processing 3.3* pode definir-se o tamanho da janela, a forma de representar os dados e observar a evolução do teste, como exemplifica a fig.4.17.

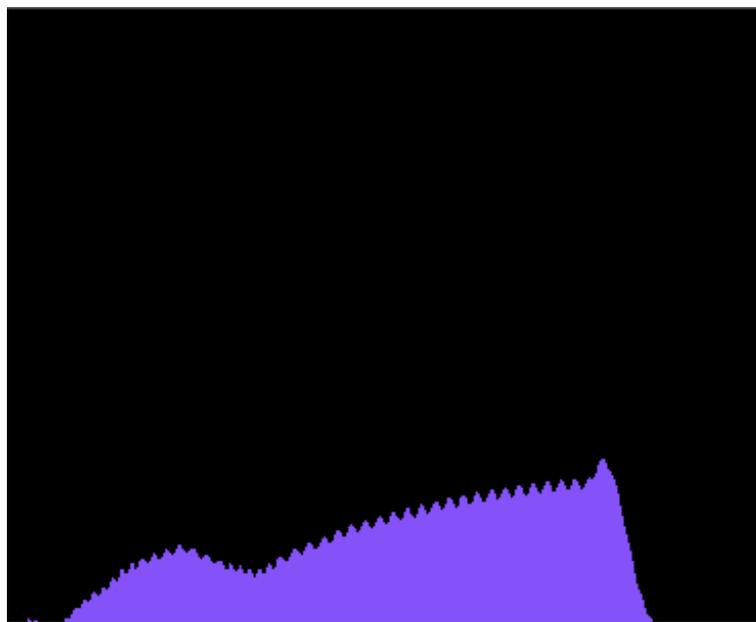


Figura 4.17: Exemplo de amostragem de dados em tempo real utilizando o *Processing 3.3*. Neste gráfico exemplificativo, no eixo do x mede-se o tempo decorrido e no eixo y a carga aplicada.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Motor de Passo e Transdutor de Posição

5.1.1 Calibração

Os resultados para as calibrações foram executadas três vezes e com um número elevado de ciclos para diminuir ao máximo o erro, são apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Valores digitas obtidos pelo potenciômetro a partir do número de voltas do motor de passo

Número de voltas (motor)	Valor digital(0-1024)			Média
	1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	
0	64	63	63	63.3
25	83	82	82	82.3
50	103	102	103	102.7
75	125	125	125	125.0
100	147	146	147	146.7
125	168	168	168	168.0
150	190	190	190	190.0
175	212	212	212	212.0
200	234	233	234	233.7
225	255	254	255	254.7
250	276	276	276	276.0
275	298	298	298	298.0
300	320	320	320	320.0
325	342	342	343	342.3
350	364	365	365	364.7
375	387	388	388	387.7
400	410	411	411	410.7

Tabela 5.2: Valores medidos pela craveira (mm) a partir do número de voltas do motor de passo

Número de voltas (motor)	Distância craveira (mm) ± 0.01			Média
	1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	
0	0	0	0	0.00
25	1.19	1.13	0.96	1.09
50	2.48	2.34	2.11	2.31
75	3.74	3.63	3.36	3.58
100	4.99	4.88	4.67	4.85
125	6.27	6.14	5.88	6.10
150	7.51	7.4	7.15	7.35
175	8.76	8.65	8.38	8.60
200	10.06	9.9	9.63	9.86
225	11.3	11.3	11.3	11.30
250	12.58	12.41	12.13	12.37
275	13.81	13.65	13.37	13.61
300	15.06	14.89	14.62	14.86
325	16.3	16.1	15.86	16.09
350	17.52	17.29	17.08	17.30
375	18.76	18.53	18.32	18.54
400	19.97	19.78	19.57	19.77

Ajustando uma reta aos pontos do número de voltas do motor e a distância na craveira obtém-se a equação da reta representada na fig.5.1

$$y = 20.086 * x + 2.259 \quad (R^2 = 0.998)$$

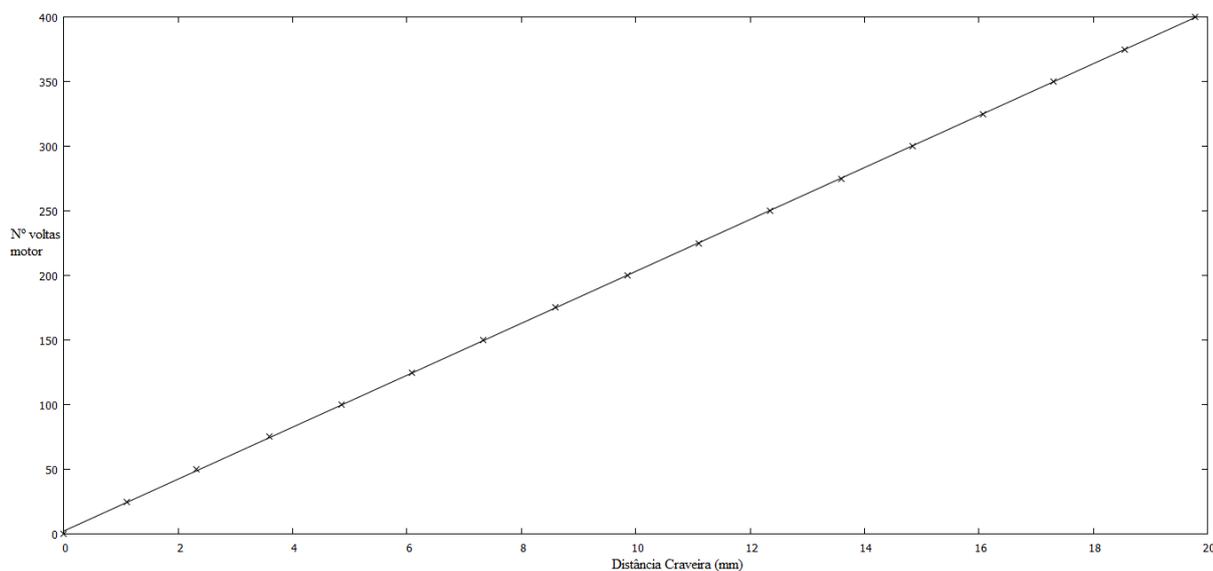


Figura 5.1: Reta relativa à distância medida na craveira em função número de voltas do motor.

Tabela 5.3: Comparação dos valores obtidos pela reta de ajuste com o número de voltas dado pelo motor

Nº de voltas dadas pelo motor	Valores através da reta Nº de voltas em função da Dist. percorrida	Desvio no nº de voltas
0	2.26	2.26
25	24.35	0.65
50	48.86	1.14
75	74.37	0.63
100	99.88	0.12
125	124.58	0.42
150	149.69	0.31
175	174.80	0.20
200	200.11	0.11
225	225.21	0.21
250	250.32	0.32
275	275.43	0.43
300	300.54	0.54
325	325.24	0.24
350	349.95	0.05
375	374.85	0.15
400	399.56	0.44

Representando o valor digital obtido pelo transdutor de posição em função da posição medida por uma craveira digital é possível observar o comportamento do potenciômetro.

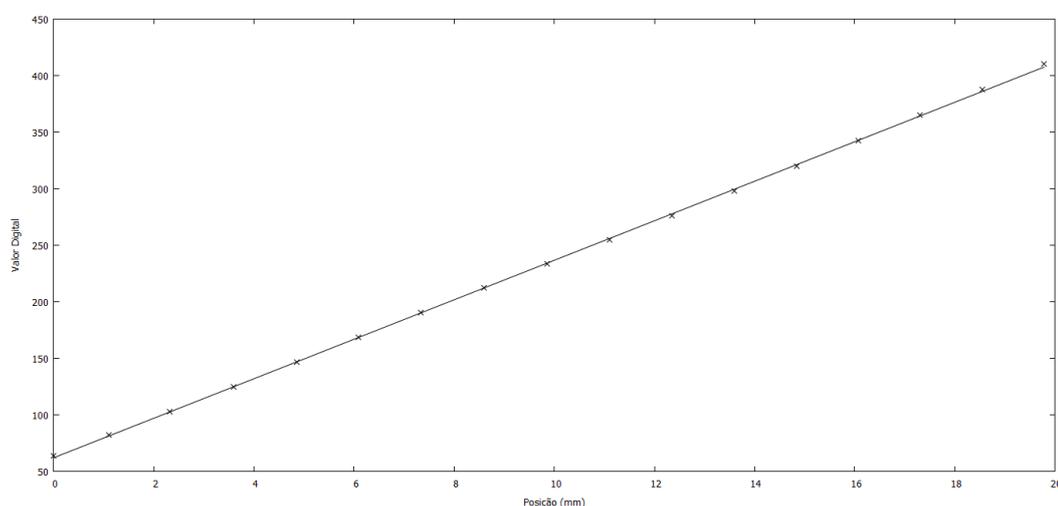


Figura 5.2: Valor digital do potenciômetro em função da distância percorrida.

A reta de ajuste obtida tem a equação:

$$y = 17.462x + 62.08 \quad (R^2 = 0.9999) \quad (5.1)$$

A partir dos dados obtidos é possível retirar as respectivas retas de ajuste e daí deduzir matematicamente a equação que traduz a distância percorrida em função do número de voltas.

5.1.2 Repetibilidade

Os valores obtidos para a repetibilidade do sistema são representados na tabela 5.4

Tabela 5.4: Distância percorrida medida pela craveira digital

Distância a percorrer (mm)	Distância Percorrida (mm) (Valor medido na craveira)			
	1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	Média
20	20.61	16.87	15.67	17.72
20	20.6	19.9	19.91	20.14
20	20.19	20.75	19.92	20.29
20	20.63	20.64	20.74	20.67
20	20.62	20.36	19.98	20.32
20	20.25	20.32	20.87	20.48
20	20.27	21.05	20.79	20.70
20	18.89	19.03	19.15	19.02
20	20.08	19.37	19.53	19.66
20	19.99	19.33	19.28	19.53

O desvio padrão obtido tem o valor de $\sigma = 0.87mm$.

5.2 Célula de Carga

5.2.1 Calibração

Valor para o fator de calibração para cada uma das massas calibradas utilizadas é apresentado na tabela 5.5

Tabela 5.5: Fatores de calibração para as massas de 50g,100g,200g e 300g

Peso (kg)	Fator de Calibração
0.050	-454750.00
0.100	-454750.00
0.200	-454750.00
0.300	-454750.00

5.2.2 Repetibilidade

Os valores obtidos nos testes A e B estão representados na fig. 5.3 na forma de uma distribuição normal.

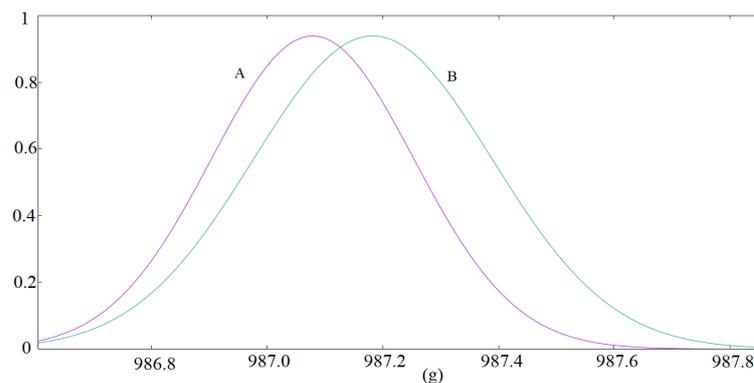


Figura 5.3: Distribuição normal do dois primeiros testes (A e B) com 30 segundos de intervalo entre ambos.

Tabela 5.6: Média e desvio padrão para os dois primeiros testes de repetibilidade.

Distribuição Normal	Média (g)	Desvio Padrão σ (g)
A	987.079	0.175
B	987.183	0.206

Representação do conjunto de todos os testes de repetibilidade realizados.

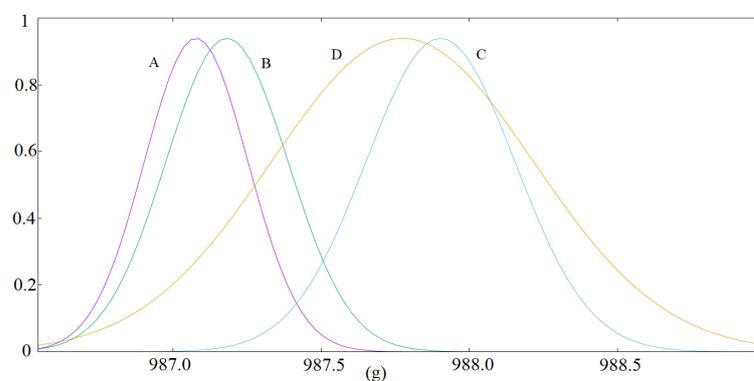


Figura 5.4: Distribuição normal de todos os testes de calibração realizados

Para os dois últimos testes obtiveram-se os seguintes parâmetros.

Tabela 5.7: Média e desvio padrão para os testes C e D

Distribuição Normal	Média (g)	Desvio Padrão σ (g)
C	987.903	0.251
D	987.775	0.442

De seguida apresenta-se o estudo do comportamento da célula de carga ao colocar e retirar um peso.

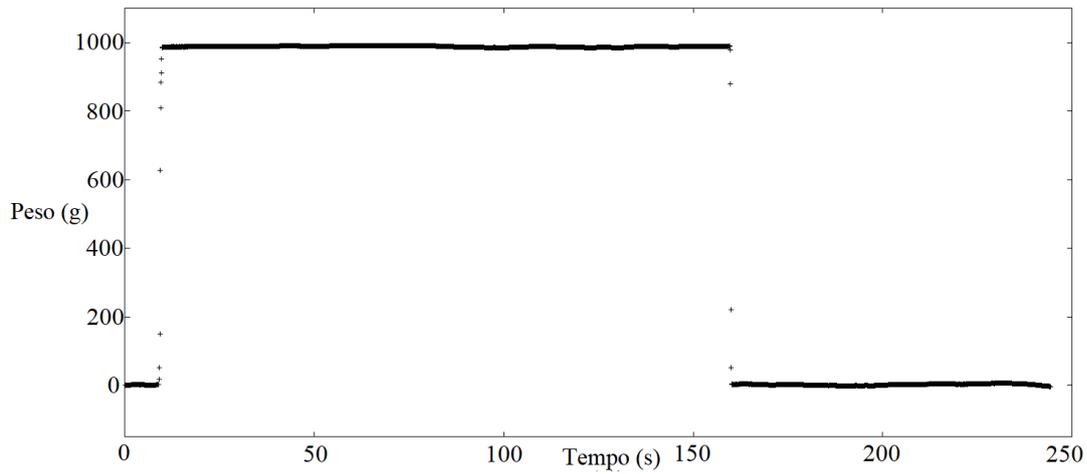


Figura 5.5: Comportamento da célula de carga

5.3 Arquitetura do Sistema

Utilizando o software Fritzing[®] apresenta-se de seguida o diagrama de ligações do formato final do projeto. fig.5.6

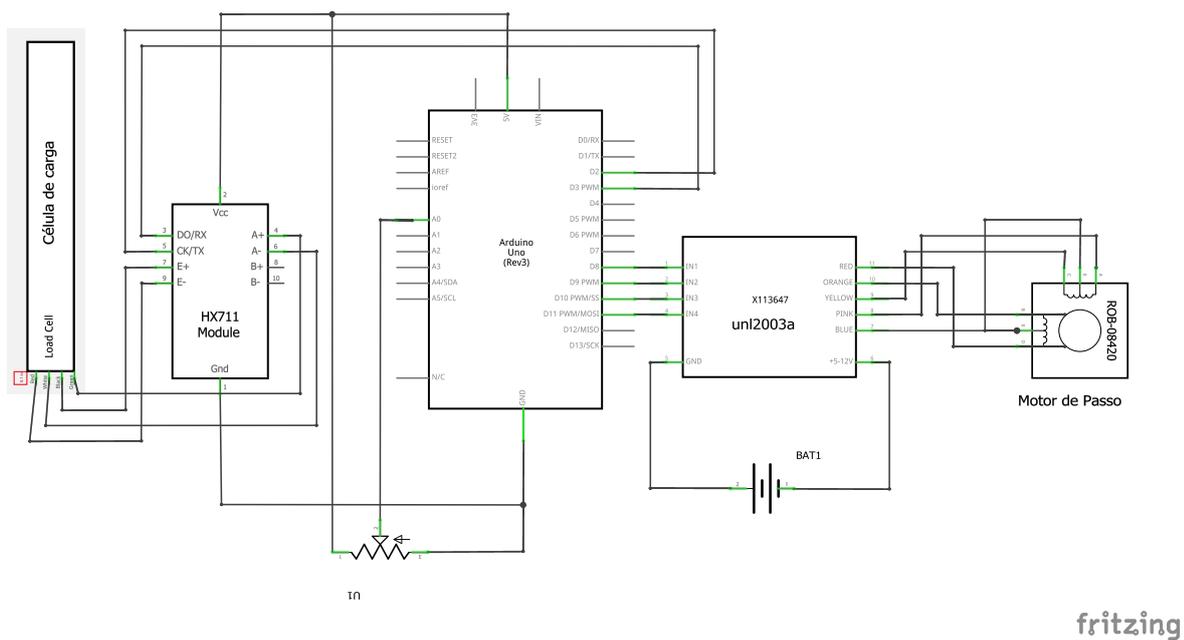


Figura 5.6: Diagrama de ligações.



Figura 5.7: Montagem da estrutura em acrílico

Os componentes foram instalados na estrutura permitindo a realização de alguns testes de controlo da máquina.

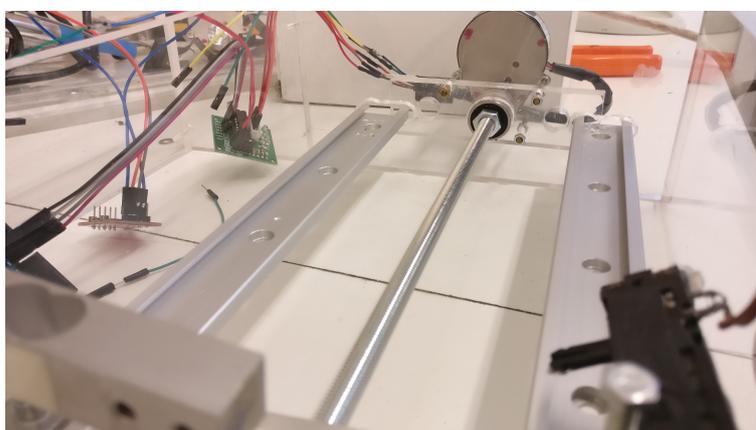


Figura 5.8: Montagem dos componentes

Capítulo 6

Controlo do Produto

6.1 Teste de tensão em filme de PVC

Para poder testar o equipamento desenvolvido foram realizados diversos testes. Apesar de a máquina ser dedicada a medir tensões em materiais biológicos, estes são difíceis de obter. Os testes foram então realizados em materiais do dia-a-dia, como é o caso do plástico de cozinha.

O primeiro teste foi realizado com filme de PVC (muito utilizado na cozinha para embalar alimentos).

A amostra foi cortada com uma forma retangular 18.3mm x 37.1 mm, fig.6.1, e assumiu-se, consultando as especificações, que a sua espessura era de 0.1 mm.

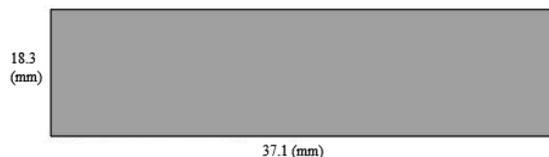


Figura 6.1: Formato e medidas da amostra

Depois de recolhidos os dados obteve-se a seguinte curva tensão-deformação.

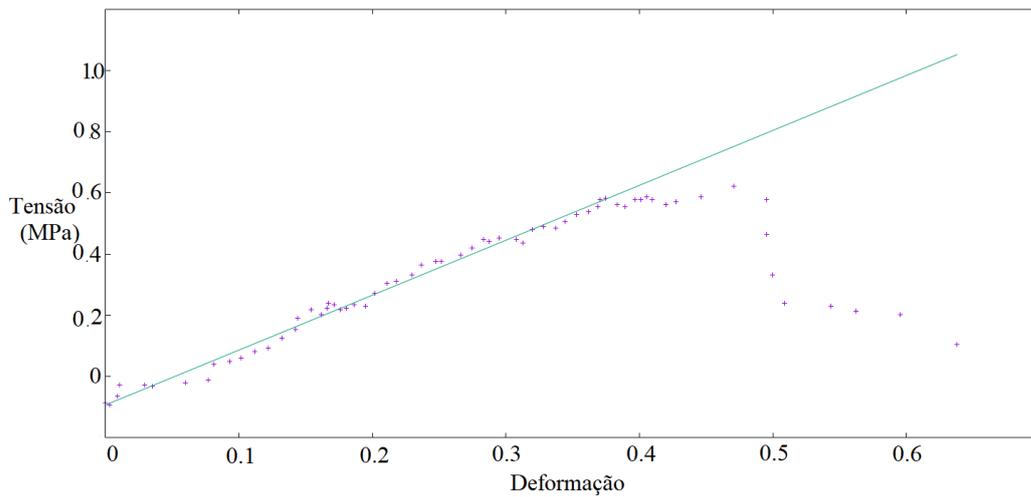


Figura 6.2: Curva tensão-deformação filme em PVC

Para calcular o módulo de Young procedeu-se ao ajuste de uma reta ao conjunto de valores iniciais correspondentes ao troço linear modelado pela lei de Hooke. A reta obtida tem os seguintes valores:

$$y = 1.80367x - 1.80367 \quad (R^2 = 0.9845)$$

O Declive da reta representa o módulo de Young do material testado que é de 1.80367 MPa.

Capítulo 7

Análise e Discussão de Resultados

Os resultados para a calibração do deslocamento das garras de tração que foram obtidos através da rotação do motor em ciclos de 25 voltas e respectiva medição dos pares de valores, transdutor linear e craveira digital, dizem respeito a pequenos deslocamentos uma vez que se pretende que as amostras sejam de pequenas dimensões. Os ajustes obtidos para o motor de passo e para o transdutor linear mostram bem o comportamento dos mesmos, a partir dos dados de repetibilidade calculou-se que o desvio padrão para o movimento do motor de passo é de aproximadamente 0.9 mm. Este valor é afetado por vários fatores como o desfasamento da porca e até a assimetria do veio roscado, por isso mesmo os valores relativos ao deslocamento são obtidos a partir do transdutor linear, que varia também de uma forma linear e que é afetado por um menor número de fatores. O valor de distância obtido através da conversão do número de voltas é utilizado como limitador do motor de passo, a partir de uma posição inicial este encontra-se limitado a um dado número de rotações que é definido pelo comprimento da calha. Uma vez que o veio roscado tem 8mm de diâmetro, este tem um passo $\approx 1.2mm$. No decorrer destes testes foi utilizada uma velocidade do motor igual para todos, esta velocidade pode ser controlada através do número de revoluções.

O potenciômetro utilizado tem um curso de cerca de 50 mm o que limita a amplitude máxima de medição da posição e também determina a resolução espacial que é igualmente afetada pela entrada analógica do Arduino de 10 bits; os valores de posição estão assim contidos no intervalo entre 0 - 1024.

Na calibração da célula de carga foram utilizadas várias massas calibradas com um valor bem definido, o fator de calibração -454750.00 mostrou adaptar-se às diferenças de massas o que revela robustez do transdutor. O software responsável pela aquisição de dados da célula de carga permite uma leitura de valores até as centésimas de grama, no entanto, estes valores são constantemente afetados por variações de temperatura e deslocamentos de ar, com variações de $\pm 0.03g$. Os testes de calibração e repetibilidade foram então efetuados com aquisição de dados até a décima de grama.

Nos primeiros dois testes de repetibilidade da célula de carga, A e B, obteve-se um desvio padrão de 0.175 g e 0.206 g respetivamente e notou-se um pequeno aumento de 0.1 g na média de valores obtidos. Nos testes que se seguiram, C e D, obteve-se um desvio padrão de 0.251 g para o C e 0.442 g para o D, com um aumento do valor médio de C e uma diminuição desse valor em D.

A diferença do valor médio observado nos testes realizados pode dever-se ao próprio formato da célula de carga, isto é, de cada vez que se aplicava a carga esta não era colocada exatamente no mesmo local, podendo estar mais ou menos distante do fulcro e por isso provocar maior ou menor deformação, o que faz com que o valor médio se altere.

Reparou-se também que o desvio padrão ia aumentando à medida que as pesagens eram realizadas, sendo mais evidente quando o tempo de espera entre elas é menor. Este comportamento pode estar relacionado com histerese da célula de carga, por isso mesmo, realizou-se um novo teste para estudar o comportamento do sensor ao colocar e retirar a carga ao longo do tempo. Seria de esperar que o valor medido ao colocar a carga fosse ligeiramente mais elevado, estabilizando decorrido algum tempo. Pelo contrário, ao retirar o peso da célula de carga, os valores apresentados deveriam ter um valor ligeiramente inferior a zero, estabilizando passado algum tempo. Este comportamento não se verifica à primeira vista devido provavelmente ao facto da massa utilizada ser 200 vezes maior do que o desvio padrão mais elevado. Considerando o desvio padrão mais elevado a célula de carga tem uma precisão de $\pm 0.4g$, comparando com o valor tabelado na especificações do sensor, $0.05\% = 2.5g$, o comportamento é melhor do que o esperado. Esta diferença, positiva, dever-se-á ao facto de os testes de repetibilidade da célula terem sido realizados a temperatura constante.

Na fig.5.6 apresenta-se a montagem eletrónica do sistema, foi necessário utilizar uma fonte de tensão externa para alimentar o motor de passo, uma vez que este opera a 12V e a tensão máxima que o Arduino disponibiliza é de 5V.

O transdutor de posição é alimentado pela mesma tensão do Arduino (5V) que também alimenta a célula de carga, o que pode afetar os valores obtidos. Quando o potenciómetro se encontrar no início do seu curso, com valores de resistência mais reduzidos, utiliza uma maior intensidade de corrente. Como intensidade máxima que o Arduino consegue fornecer é de 50 mA, optou-se por colocar uma resistência de 100Ω em série com o potenciómetro linear para evitar que a corrente ultrapasse o valor máximo de corrente tabelado para o Arduino.

Relativamente à arquitetura do sistema, o desenho 3D da máquina de testes apresentava alguns detalhes que se revelaram difíceis de moldar no acrílico, no entanto, eram meramente estéticos. As calhas deslizantes estão fixas graças a uma plataforma em cada extremidade aparafusada à estrutura 5.7. Estas plataformas impedem o movimento da calha, mas também possibilitam a sua remoção para

melhoramentos ou substituição de qualquer componente. As dimensões escolhidas para a estrutura permitem não só medir tensões de rutura em tecidos de pequenas dimensões, mas também em tecidos que apresentem uma deformação maior. As dimensões da estrutura permitem ainda que a máquina seja colocada em locais com ambientes controlados (por exemplo, estufa) oferecendo assim um número maior de possibilidades de ensaios.

Depois de realizada a montagem de todos os componentes foi realizado um teste de controlo. Uma vez que é bastante difícil obter um tecido biológico o ensaio foi realizado com filme de PVC (plástico de cozinha). O valor obtido para o módulo de Young foi de 1.80367 MPa, apesar de não se ter um valor exato de comparação, o valor obtido está dentro do intervalo de resultados típico destes materiais. Os valores representados na fig.6.2 não apresentam uma linearidade ideal, isto deve-se à velocidade de deslocamento das garras. Com uma velocidade mais baixa de deslocamento seria possível obter uma curva com um declive, na zona elástica, mais linear, isto pode também ser resolvido aumentando a taxa de aquisição de dados. Adquirindo um maior número de dados pode ser feita uma média de grupos de valores beneficiando o tratamento de dados.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalho Futuro

8.1 Conclusões e Trabalho Futuro

Durante a elaboração deste projeto foram surgindo alguns obstáculos que uma vez reconhecidos e sem possibilidade de resolução imediata optou-se por um desenho em que todas as peças utilizadas podem ser facilmente substituídas e, naturalmente, melhoradas.

Uma das principais vantagens deste projeto é o acesso a todo o código e especificações do material utilizado, assim pode ser alterada a qualquer momento a forma como os dados são apresentados e se pretendido pode ser feito um melhoramento em todos os componentes.

Considerando os dados obtidos pela repetibilidade do motor de passo pode-se afirmar que o sistema tem movimentos que podem ser classificados como precisos e fiáveis, sendo no entanto de ponderar que em funcionamento o sistema deva ser calibrado de forma regular à semelhança de outros sistemas mecânicos.

O potenciómetro utilizado têm um curso de apenas $\pm 50mm$ que é uma distância suficiente para realizar testes em amostras de pequenas dimensões. Podem ser acoplados dois sensores para obter o dobro da distância. Os transdutores lineares disponíveis no mercado apresentam um curso máximo pouco maior que o utilizado, por isso mesmo, no futuro este pode ser substituído por um potenciómetro multi-volta que acompanha a rotação do veio roscado. Um melhoramento ainda mais preciso, mas com um preço mais elevado, será a medição de posição através de um sistema ótico.

Nos testes de repetibilidade da célula de carga notou-se uma ligeira variação da média em ensaios consecutivos, provavelmente devido ao facto de o peso utilizado nestes ensaios não exercer a força sempre no mesmo local. No entanto, este fator não será um problema no futuro pois a força será sempre aplicada na rosca da célula que estará ligada à plataforma.

Relativamente ao teste de controlo de produto, o valor obtido para o módulo de Young do filme de PVC encontra-se num intervalo aceitável para este tipo de materiais,

no entanto é complicado encontrar materiais passíveis de serem testados no sistema desenvolvido com um coeficiente de elasticidade calibrado.

Este projeto apresenta assim uma solução fiável e barata que permite a realização dos testes com pouca incerteza, de notar que a maior parte dos componentes são de gama baixa, o que significa que todos eles podem e devem ser melhorados no futuro.

Anexo A

Especificações Motor de Passo

Folha de dados do motor de passo unipolar 4 fases

7.5° step angle, Holding torque (mNm)	20mNm	440-262
	52mNm	440-284
	155mNm	440-290
	240mNm	440-307
15° step angle, Holding torque (mNm)	14.5mNm	199-863

A range of permanent magnet motor construction stepper motors ideally suited to the RS range of stepper motor drive cards. These are easily interfaced with simple low power electronics thus providing economical means of motion and speed control. Due to their permanent magnet rotors these motors have a breaking torque even when not energised. This is the detent (residual) torque which is a useful feature for positional integrity.

Step sequence (full step)

Step no.	1	2	3	4
Start position (arbitrary)	ON	OFF	OFF	ON
1	ON	OFF	ON	OFF
2	OFF	ON	ON	OFF
3	OFF	ON	OFF	ON
4	ON	OFF	OFF	ON
5	ON	OFF	ON	OFF

Start position (arbitrary) →
 (arbitrary)
 Above sequence repeating →

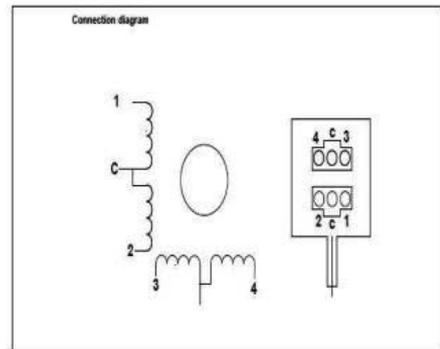
↑ Anti-clockwise
 ↓ Clockwise

Step sequence (half step)

Step no.	1	2	3	4
Start position	ON	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	OFF	OFF	ON
4	OFF	ON	OFF	ON
5	OFF	ON	OFF	OFF
6	OFF	ON	ON	OFF
7	OFF	ON	OFF	OFF
8	ON	OFF	ON	OFF
9				

Start position →
 Above sequence repeating →

↑ Anti-clockwise
 ↓ Clockwise

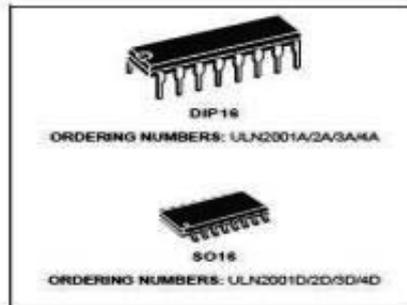


Anexo B

Especificações UNL 2003A

SEVEN DARLINGTON ARRAYS

- SEVEN DARLINGTONS PER PACKAGE
- OUTPUT CURRENT 500mA PER DRIVER (500mA PEAK)
- OUTPUT VOLTAGE 50V
- INTEGRATED SUPPRESSION DIODES FOR INDUCTIVE LOADS
- OUTPUTS CAN BE PARALLELED FOR HIGHER CURRENT
- TTL/CMOS/PMOS/DTL COMPATIBLE INPUTS
- INPUTS PINNED OPPOSITE OUTPUTS TO SIMPLIFY LAYOUT



DESCRIPTION

The ULN2001A, ULN2002A, ULN2003 and ULN2004A are high voltage, high current darlington arrays each containing seven open collector darlington pairs with common emitters. Each channel rated at 500mA and can withstand peak currents of 600mA. Suppression diodes are included for inductive load driving and the inputs are pinned opposite the outputs to simplify board layout.

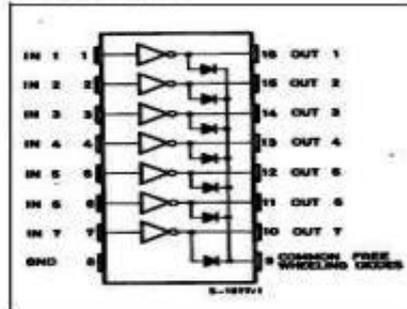
The four versions interface to all common logic families:

ULN2001A	General Purpose, DTL, TTL, PMOS, CMOS
ULN2002A	14-25V PMOS
ULN2003A	5V TTL, CMOS
ULN2004A	5-12V CMOS, PMOS

These versatile devices are useful for driving a wide range of loads including solenoids, relays DC motors, LED displays filament lamps, thermal print-heads and high power buffers.

The ULN2001A/2002A/2003A and 2004A are supplied in 16 pin plastic DIP packages with a copper leadframe to reduce thermal resistance. They are available also in small outline package (SO-16) as ULN2001D/2002D/2003D/2004D.

PIN CONNECTION



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_{amb} = 25°C unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit	Fig.
I _{lck}	Output Leakage Current	V _{CE} = 50V T _{amb} = 70°C, V _{CE} = 50V			50 100	μA μA	1a 1a
		T _{amb} = 70°C for ULN2002A V _{CE} = 50V, V _I = 6V			500	μA	1b
		for ULN2004A V _{CE} = 50V, V _I = 1V			500	μA	1b
V _{CE(sat)}	Collector-emitter Saturation Voltage	I _C = 100mA, I _B = 250μA I _C = 200 mA, I _B = 350μA I _C = 350mA, I _B = 500μA		0.9 1.1 1.3	1.1 1.3 1.6	V V V	2a 2a 2a
I _{in1}	Input Current	for ULN2002A, V _I = 17V for ULN2003A, V _I = 3.95V for ULN2004A, V _I = 5V		0.82 0.93 0.35	1.25 1.35 0.5	mA mA mA	3 3 3
I _{in2}	Input Current	T _{amb} = 70°C, I _C = 500μA	50	65		μA	4
V _{in1}	Input Voltage	V _{CE} = 2V for ULN2002A I _C = 300mA for ULN2003A I _C = 200mA I _C = 250mA I _C = 300mA for ULN2004A I _C = 125mA I _C = 200mA I _C = 275mA I _C = 350mA			13 2.4 2.7 3 5 6 7 8	V	5
h _{FE}	DC Forward Current Gain	for ULN2001A V _{CE} = 2V, I _C = 350mA	1000				2
C _i	Input Capacitance			15	25	pF	
t _{turn}	Turn-on Delay Time	0.5 V _I to 0.5 V _O		0.25	1	μs	
t _{off}	Turn-off Delay Time	0.5 V _I to 0.5 V _O		0.25	1	μs	
I _{is}	Clamp Diode Leakage Current	V _I = 50V T _{amb} = 70°C, V _{CE} = 50V			50 100	μA μA	6 6
V _f	Clamp Diode Forward Voltage	I _f = 350mA		1.7	2	V	7

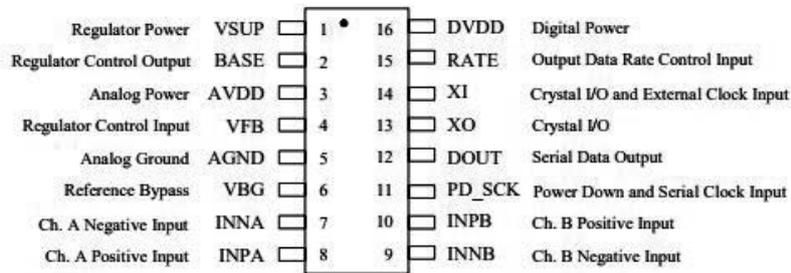
Anexo C

Especificações Célula de Carga

Product Specifications	
Mechanical	
Housing Material	Aluminum Alloy
Load Cell Type	Strain Gauge
Capacity	5kg
Dimensions	55.25x12.7x12.7mm
Mounting Holes	M5 (Screw Size)
Cable Length	550mm
Cable Size	30 AWG (0.2mm)
Cable - no. of leads	4
Electrical	
Precision	0.05%
Rated Output	1.0±0.15 mv/V
Non-Linearity	0.05% FS
Hysteresis	0.05% FS
Non-Repeatability	0.05% FS
Creep (per 30 minutes)	0.1% FS
Temperature Effect on Zero (per 10°C)	0.05% FS
Temperature Effect on Span (per 10°C)	0.05% FS
Zero Balance	±1.5% FS
Input Impedance	1130±10 Ohm
Output Impedance	1000±10 Ohm
Insulation Resistance (Under 50VDC)	≥5000 MOhm
Excitation Voltage	5 VDC
Compensated Temperature Range	-10 to ~+40°C
Operating Temperature Range	-20 to ~+55°C
Safe Overload	120% Capacity
Ultimate Overload	150% Capacity

Anexo D

Especificações HX711



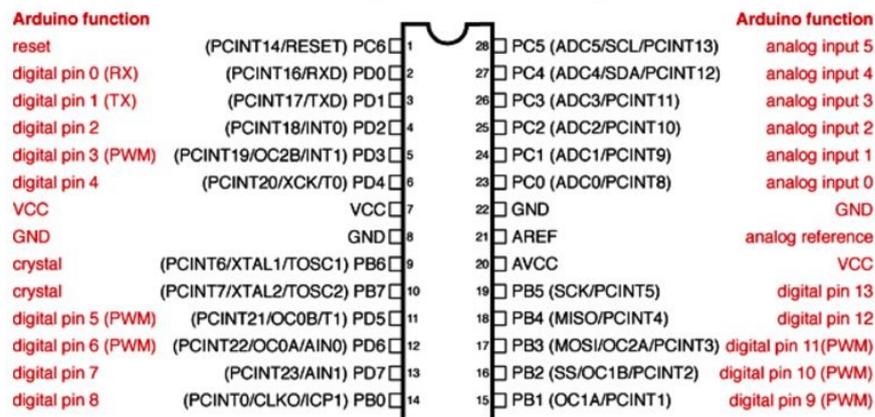
SOP-16L Package

Pin #	Name	Function	Description
1	VSUP	Power	Regulator supply: 2.7 ~ 5.5V
2	BASE	Analog Output	Regulator control output (NC when not used)
3	AVDD	Power	Analog supply: 2.6 ~ 5.5V
4	VFB	Analog Input	Regulator control input (connect to AGND when not used)
5	AGND	Ground	Analog Ground
6	VBG	Analog Output	Reference bypass output
7	INA-	Analog Input	Channel A negative input
8	INA+	Analog Input	Channel A positive input
9	INB-	Analog Input	Channel B negative input
10	INB+	Analog Input	Channel B positive input
11	PD_SCK	Digital Input	Power down control (high active) and serial clock input
12	DOUT	Digital Output	Serial data output
13	XO	Digital I/O	Crystal I/O (NC when not used)
14	XI	Digital Input	Crystal I/O or external clock input, 0: use on-chip oscillator
15	RATE	Digital Input	Output data rate control, 0: 10Hz; 1: 80Hz
16	DVDD	Power	Digital supply: 2.6 ~ 5.5V

Table 1 Pin Description

Anexo E

Especificações Arduino



Digital Pins 11, 12 & 13 are used by the ICSP header for MOSI, MISO, SCK connections (Atmega168 pins 17, 18 & 19). Avoid low-impedance loads on these pins when using the ICSP header.

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P)
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Referências bibliográficas

- [1] Jin, Xiao *Amniotic Membrane Physical Properties: A contribution to its characterization* Escola Universitaria d' Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, 2015
- [2] *Mechanical Side Action Grips* Testresources, <http://www.testresources.net/accessories/grips-fixtures/tensile-grips/mechanical-vice-action-grips>. [6 de Agosto de 2017]
- [3] *eXpert 4000 Used for Micro Tensile Testing of Plant Fibers* Admet, <https://www.admet.com/micro-ep-used-for-micro-tensile-testing-of-plant-fibers/>, [17 de Julho de 2017]
- [4] Milano, Vincent. *Material Testing of Miniature Samples: Solving a Biomedical Problem* Medical Design Technology. (2013). <https://www.mdtmag.com/article/2013/08/material-testing-miniature-samples-solving-biomedical-problem>. [20 Agosto de 2017]
- [5] Sedlin, Elias D. *A rheologic model for cortical bone: a study of the physical properties of human femoral samples*. Acta Orthopaedica Scandinavica 36.sup83 (1965): 1-77.
- [6] Tanaka, K., et al. *Tensile properties of amniotic membrane*. High Performance Structures and Materials (2010): 197-206.
- [7] *Ensaio de tração* <http://miscelaneadoconhecimento.com/ResMat/tracao.html> [15 de Agosto de 2017]
- [8] *Peel And Adhesion Testing* Mecmesin, <http://www.mecmesin.com/peel-test-adhesion-testing> [Acedido em: 20 de Julho de 2017]
- [9] *Strength of Materials* NPTEL, <http://nptel.ac.in/courses/112107146/12> [Acedido em: 20 de Julho de 2017]
- [10] Chaudhari, Keval *Tensile test* Engineer Gallery. <http://www.engineersgallery.com/tensile-test/> [15 de Julho de 2017]
- [11] *Tensile Tester* <https://www.alibaba.com/showroom/universal-testing-machine-price.html> . [15 de Junho de 2017]

- [12] Jorge, R e Dinis, L. *Teoria da Plasticidade* Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial - Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto (2004/2005);
- [13] Bauer, Wolfgang. et al. *Física para Universitários - Mecânica*, McGraw Hill Brasil, 2012
- [14] Askeland, Donald R., et.al, *The science and engineering of materials (5th ed.)* Cengage Learning. (2006). p. 198.
- [15] Luebke, C. (2012). *Stress-strain curves* http://pages.uoregon.edu/struct/courseware/461/461_lectures/461_lecture24/461_lecture24.html [23, Outubro, 2014]
- [16] BenBritton, (2013), *StressStrainWEB* <https://en.wikipedia.org/wiki/Stress-strain-curve/media/File:StressStrainWEB.svg> [10 de Julho de 2017]
- [17] Richfield, David,(25 Fevereiro 2009) *Stress v strain A36 2* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f1/StressvstrainA32.svg> [25 de Agosto de 2017]
- [18] Oliveira, Ricardo *Construção de uma plataforma de movimentos para aplicação de Super-Resolução a imagens de Gamagrafia*, Instituto de Biofísica e Biomatemática, IBILI-FMUC, 2010.
- [19] F. S. Barbosa, et al. *Modelagem Numérica e Análise Experimental Aplicadas ao Projeto de uma Célula de Carga* http://www.ufjf.br/lrm/files/2009/04/cil04_celula.pdf . [11 de Maio de 2017]
- [20] AL-MUTLAQ, SARAH *Getting Started with Load Cells* <https://learn.sparkfun.com/tutorials/getting-started-with-load-cells>, [1 de Agosto de 2017]
- [21] Ekelof, Stig *The Genesis of the Wheatstone Bridge* Engineering Science and Education Journal, volume 10, no 1,p. 37–40. 2001
- [22] *THE STRAIN GAUGE* <http://www.sensorland.com/Images/SG-009.gif>, [5 de Setembro de 2017]
- [23] *Tension Testing / Tensile Testing*, ADMET <https://www.admet.com/testing-applications/test-types/tension-testing/> [13 de Agosto de 2017]
- [24] *Arduino Products* <https://www.arduino.cc/en/Main/Products> [12 de Dezembro de 2015]

