



**Pedro Inácio de
Amorim Carvalho**

**Finalização de máquina para ensaios de
delaminação sob fadiga**



**Pedro Inácio de
Amorim Carvalho**

**Finalização de máquina para ensaios de
delaminação sob fadiga**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica e do Prof. Doutor Alfredo Morais Balacó de Morais Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente / President

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Auxiliar C/ Agregação, Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor António Gonçalves de Magalhães
Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Morais
Professor Associado, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira por toda a ajuda e acompanhamento na componente experimental. Foi um prazer testemunhar a sua capacidade de previsão e solução dos problemas.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor Alfredo Balacó de Moraes, por toda a disponibilidade, ajuda e paciência. Foi uma honra ter um co-orientador dotado de tanto conhecimento e disposição para ensinar.

À minha família por me darem a oportunidade de eu evoluir como pessoa e poder usufruir de melhores condições de vida, motivação e confiança depositada em mim.

Aos meus amigos por todo o apoio nos bons e maus momentos.

Palavras-chave

Máquina de ensaios, programa de controlo, laminados compósitos, delaminação, modo II

Resumo

Os estudos experimentais do comportamento à fadiga recorrem habitualmente a máquinas servo-hidráulicas, que são caras e que têm elevados custos de manutenção. O Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro desenvolveu uma máquina de ensaios de fadiga consideravelmente mais simples, tendo principalmente em mente os ensaios de delaminação sob fadiga de materiais compósitos. Após a revisão bibliográfica acerca dos tipos e parâmetros dos referidos ensaios, e tendo em atenção os elementos já construídos, empreendeu-se o trabalho de conclusão da máquina no sentido de a tornar operacional. Este trabalho incluiu intervenções nas componentes mecânica e elétrica, bem como a elaboração de um programa de controlo e recolha de dados. Finalmente, realizaram-se alguns ensaios de delaminação sob fadiga em modo II recorrendo ao provete *End-Notched Flexure* (ENF). Os resultados obtidos parecem ser consistentes com a bem conhecida Lei de Paris que relaciona a taxa de propagação da fenda com a variação da taxa crítica de libertação de energia. Tudo indica, portanto, que a máquina de fadiga está preparada para trabalhos futuros na área da delaminação sob fadiga.

Keywords

Testing machine, control software, fatigue, laminated composites, delamination, mode II

Abstract

Experimental studies on fatigue behaviour are usually conducted on servo-hydraulic testing machines that are expensive and have high maintenance costs. The Mechanical Engineering Department of the University of Aveiro developed a much simpler testing machine intended for delamination fatigue tests on composite materials. After a literature review on the methods and parameters of those tests and considering the machine parts already built, work was undertaken in order to make the testing machine fully operational. The mechanical and electrical components of the testing machine were concluded and a control and data collection software was written and implemented. Finally, a few mode II delamination fatigue tests were conducted using the *End-Notched Flexure* (ENF) specimen. The results seemed to be consistent with the well-known Paris Law that relates the crack propagation rate with the variation of the strain-energy release rate. Therefore, the testing machine is ready for future work on fatigue delamination.

ÍNDICE

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Abreviaturas e Nomenclatura	vii
Capítulo 1 Enquadramento e Objetivos.....	1
1.1 Prefácio e Objetivos.....	1
1.2 Introdução.....	2
1.3 Comportamento à Fadiga.....	5
Capítulo 2 Finalização da Máquina de Ensaios à Fadiga	11
2.1 Estrutura base e componentes.....	11
2.1.1 Motor Passo-a-Passo	13
2.1.2 Célula de carga.....	15
2.1.3 <i>Driver</i>	17
2.1.4 Amplificador INA 125	17
2.1.5 Sensor SHARP GP1S53V	20
2.1.6 Arduino Uno Rev3.....	22
2.2 Intervenções na parte mecânica.....	24
2.3 Intervenções na parte elétrica.....	25
2.4 Intervenções na parte de controlo	31
Capítulo 3 Ensaios de Fadiga em Modo II.....	37
3.1 Os provetes e sua caracterização prévia	37
3.2 Ensaios de fadiga.....	39
Capítulo 4 Conclusões e Trabalhos Futuros	45
Referências.....	47
Capítulo 5 Anexos	51
Anexo A – Máquina de ensaios à fadiga.....	51
Anexo B – Esquema elétrico da MEF.....	54
Anexo C – Especificações técnicas da célula de carga.....	55
Anexo D – Manual <i>Driver</i> DM3522M	56
Anexo E – Especificações técnicas do motor passo-a-passo BSHB3923-H.....	64
Anexo F – Programa de controlo da MEF (Arduino)	66
Anexo G – Programa complementar de visualização dos resultados (<i>Processing</i>).....	70



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Representação esquemática da orientação das fibras: (a) camada unidirecional; (b) tecido bidirecional; (c) tecidos 3D [Moura e outros, 2005; Pardini, 2000].	2
Figura 1.2 - Delaminações num compósito [TU Delft, 2012].	3
Figura 1.3 - Representação esquemática das fendas transversais num laminado $[0_n/90_m]_s$ e delaminações que tendem a formar-se posteriormente [Paris e outros, 2010].	3
Figura 1.4 - Modos de solicitação da delaminação.	4
Figura 1.5 - Representação dos ensaios DCB, ENF e MMB [Pereira e Morais, 2008].	5
Figura 1.6 - Representação do ensaio ELS usado por Kenane e Benzeggagh (1997).	6
Figura 1.7 - Representação do ensaio Mixed-Mode End-Loaded Split usado por Blanco e outros (2004).	7
Figura 1.8 - Variante do ensaio ENF usada por Matsubara e outros (2006).	7
Figura 1.9 - Conjunto de resultados experimentais obtidos por Matsubara e outros (2006).	8
Figura 1.10 - Representação esquemática do ensaio 4ENF usado por Shindo e outros (2009).	9
Figura 1.11 - Resultados obtidos por Shindo e outros (2009).	9
Figura 1.12 - Resultados obtidos por Brunner e outros (2012).	10
Figura 2.1 - Máquina de ensaios à fadiga (Desenho).	12
Figura 2.2 - Máquina de ensaios à fadiga.	13
Figura 2.3 - Configurações do motor de passo: (a) Ímã permanente; (b) Relutância variável; (c) Híbrido [Digi-key, 2012].	14
Figura 2.4 - Motor passo-a-passo híbrido BSHB3913-H [BSJD,2012].	15
Figura 2.5 - Exemplo de extensómetro elétrico [TML, 2012].	15
Figura 2.6 - Representação da ponte de <i>Wheatstone</i> com extensómetros nos 4 braços da ponte, célula de carga [TML, 2012].	16
Figura 2.7 - Célula de carga utilizada na máquina de ensaios.	16
Figura 2.8 - <i>Driver</i> DM3522M [BSJD, 2012].	17
Figura 2.9 - Vista em perspetiva do INA 125 [Datasheet INA 125, 2012].	18
Figura 2.10 - Estrutura interna e esquema básico de ligação do INA 125 [Datasheet INA 125, 2012].	18
Figura 2.11 - (a) Sensor Sharp; (b) Diagrama de ligações internas [SHARP, 2012].	20
Figura 2.12 - Esquema de montagem do sensor na máquina de ensaios à fadiga em vista isométrica à esquerda e vistas em corte à direita. Peças assinaladas: 1 - Suporte do pino fim de curso; 2 - Perfil de alumínio; 3 - Sensor <i>Sharp</i> ; 4 - Transístor recetor; 5 - Pino fim	

de curso, ajustável ao longo do perfil de alumínio; 6 – Feixe emitido com 0,5 mm de espessura; 7 – Díodo (Led) emissor; 8 – Suporte ou caixa do sensor. Unidades: mm.	21
Figura 2.13 - Vista do sensor acoplado na máquina de ensaios.....	21
Figura 2.14 - Gráfico com dados recebidos do sensor ao longo de duas descidas e duas subidas do travessão móvel. A obstrução gradual do sensor provoca a subida do número de bits até à oclusão total (<i>plateau</i> com o valor máximo 1024).....	22
Figura 2.15 - Arduino Uno Rev3, vista frontal (esquerda), vista trás (direita).....	22
Figura 2.16 - Esboço final da caixa de suporte para o sensor à esquerda e caixa de suporte do sensor montado na máquina à direita.....	24
Figura 2.17 - Componentes de fixação da barra de fim de curso: Perfil de alumínio (esquerda); Peça para fixar o pino fim de curso (direita).	24
Figura 2.18 - Novo suporte para a célula de carga em plástico.....	25
Figura 2.19 - Esquema dos componentes da máquina de ensaios à fadiga e suas ligações.....	25
Figura 2.20 – Quadro elétrico.	26
Figura 2.21 - Placa Arduino <i>Proto Shield</i> com componentes elétricos soldados.....	27
Figura 2.22 - Painel de controlo inserido no quadro elétrico.	28
Figura 2.23 - Filtro passa-baixo aplicado [Guadagnini e outros, 2011].....	29
Figura 2.24 - Visualização gráfica de alguns ciclos da célula de carga, sem aplicar o filtro passa-baixo.....	30
Figura 2.25 - Visualização gráfica de alguns ciclos da célula de carga, depois de aplicar o filtro passa-baixo.....	30
Figura 2.26 - Diagrama de sequência do programa de controlo da máquina de ensaios à fadiga.....	31
Figura 2.27 - Esquema da posição inicial do pino fim de curso relativamente ao sensor.....	32
Figura 2.28 - Exemplo de visualização de dados da célula de carga com o programa <i>Processing</i>	34
Figura 2.29 - Exemplo de visualização de dados do sensor com o programa <i>Processing</i>	34
Figura 2.30 - Esquema de montagem para efetuar a calibração da célula de carga.....	35
Figura 2.31 - Gráfico de calibração da célula de carga e respetivos valores (* conversão A/D de uma escala 0-5V com 10 bits de resolução = 1024 valores).	35
Figura 3.1 - Curvas carga-deslocamento medidas em ensaios ENF prévios.	38
Figura 3.2 - Exemplo de resultados em bruto dos ensaios de fadiga com as tensões correspondentes às cargas mínima e máxima.	39
Figura 3.3 - Exemplo de resultados tratados.....	40

Figura 3.4 - Comprimento da fenda em função do número de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 5 Hz.....	41
Figura 3.5 - Comprimento da fenda em função do número de ciclos para um provete ensaiado frequência de 1 Hz.	41
Figura 3.6 - Evolução do comprimento da fenda numa gama de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 5 Hz: resultados experimentais e reta de ajuste.....	42
Figura 3.7 - Evolução do comprimento da fenda numa gama de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 1 Hz: resultados experimentais e reta de ajuste.....	42
Figura 3.8 - Evolução de G_{max} e ΔG numa gama de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 5 Hz.	43
Figura 3.9 - Evolução de G_{max} e ΔG numa gama de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 1 Hz.	43
Figura 5.1 - Zona de fixação do provete, vista isométrica.	51
Figura 5.2 - Zona de fixação do provete, vista de cima e vista lateral.	52
Figura 5.3 - Máquina de ensaios à fadiga.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURA

a – Comprimento da fenda;

a_e – Comprimento da fenda efetivo;

b – Largura do provete;

C – Flexibilidade ou "*compliance*";

C_f – Flexibilidade de flexão;

DEM-UA – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro;

DCB – *Double Cantilever Beam*;

d_{max} – Distância máxima;

d_{min} – Distância mínima;

ELS – *End-Loaded Split*;

ENF – *End-Notched Flexure*;

E_1 – Módulo de flexão;

f – Frequência de ensaio;

G_{II} – Taxa de libertação de energia em modo II;

G_{IIc} – Taxa crítica de libertação de energia em modo II;

G_{13} – Módulo de corte;

ICSP – *In Circuit Serial Programming*;

IDE – *Integrated Development Environment*;

INEGI – Instituto de Engenharia e Gestão Industrial;

K_j – Fator de intensidade de tensão;

MEF – Máquina de ensaios à fadiga;

MMB – *Mixed-Mode Bending*;

N – Número de ciclos;

PTFE – *Poly-tetra-fluor-ethylene*;

P – Carga aplicada;

p_{provete} – Carga no deslocamento máximo;

p_{vazio} – Carga no deslocamento mínimo;

PWM – *Pulse With Modulation*;

s_{max} – Valor máximo do sensor;

s_{min} – Valor mínimo do sensor;

t – Tempo entre cada impulso;

Z – Posição zero do fim de curso calculado em cada ciclo;

Z_0 – Posição zero inicial do fim de curso;

δ – Deslocamento;

δ_{max} – Deslocamento máximo;

δ_{min} – Deslocamento mínimo;

Δ_{II} – Correção do comprimento de fenda;

4ENF – *4-Point End-Notched Flexure*;

$2h$ – Espessura do provete;

$2L$ – Vão.

Capítulo 1

ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

1.1 PREFÁCIO E OBJETIVOS

Os materiais compósitos de alto desempenho são hoje em dia empregues num vasto leque de aplicações estruturais, tendo-se consolidado como alternativa aos materiais metálicos. Não obstante, os materiais compósitos apresentam vários modos de rotura que importa caracterizar. A fratura interlaminar, também designada por delaminação, é um dos modos de rotura mais frequentes e perigosos em laminados compósitos, tendo sido por isso objeto de muita investigação.

A caracterização da resistência à delaminação faz-se geralmente no âmbito da Mecânica da Fratura, sendo os parâmetros mais usados as taxas críticas de libertação de energia associada aos três modos de propagação de fendas.

Resumidamente, o presente trabalho aborda a delaminação à fadiga em modo II, tendo como objetivos principais:

- Finalizar a Máquina de Ensaio à Fadiga (MEF) projetada e construída recentemente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (DEM-UA).
- Elaborar um programa de controlo e recolha de dados para a MEF;
- Realizar os primeiros ensaios experimentais tendo em vista avaliar e validar a MEF através da comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os de outros autores.

1.2 INTRODUÇÃO

Ainda que em escala muito reduzida, os materiais compósitos são conhecidos desde as antigas civilizações na forma de tijolos constituídos por palha e barro [Kaw, 1997]. Na realidade, só em meados do século XX se assistiu ao desenvolvimento e crescimento acentuado das aplicações destes materiais. Os avanços tecnológicos permitiram a substituição de materiais mais comuns, por exemplo, materiais metálicos, por materiais compósitos num vasto leque de aplicações estruturais [Moura e outros, 2005; Gibson, 2007; Chung, 2010].

Um material compósito resulta da combinação de dois ou mais materiais distintos. Apresenta também uma combinação de propriedades mecânicas que não pode ser alcançada por apenas um dos seus materiais constituintes isoladamente. Os materiais que constituem um material compósito são:

- A matriz, que confere estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios entre o reforço;
- O reforço, que é decisivo para tornar excepcionais as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do material compósito.

Como reforço são usadas maioritariamente fibras, dado que certos materiais como o vidro e o carbono possuem propriedades mecânicas muito mais elevadas na forma de fibras do que na forma maciça. Por seu turno, devido às excelentes propriedades mecânicas, facilidade de processamento e baixo peso específico, os compósitos de matriz polimérica são atualmente os mais usados. Para as aplicações estruturais, as fibras devem ser contínuas, podendo ser dispostas numa única direção (Unidirecionais) ou agrupadas em feixes de fibras dispostos segundo direções perpendiculares planares (Tecidos 2D) ou tridimensionais (figura 1.1).

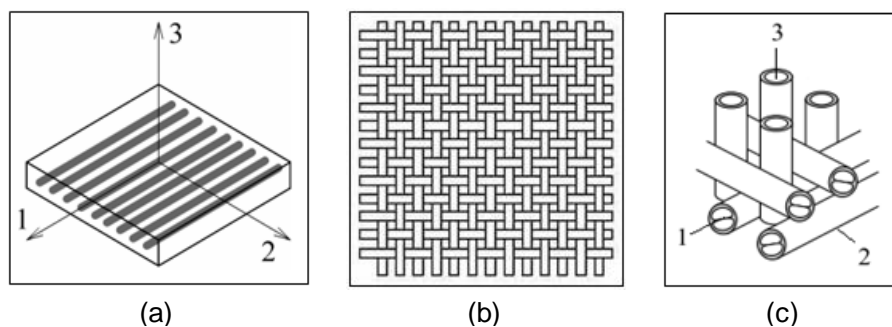


Figura 1.1 - Representação esquemática da orientação das fibras: (a) camada unidirecional; (b) tecido bidirecional; (c) tecidos 3D [Moura e outros, 2005; Pardini, 2000].

Para além das suas excelentes propriedades mecânicas e baixo peso específico, os compósitos de matriz polimérica proporcionam uma grande flexibilidade no projeto em relação aos materiais convencionais. Acrescenta-se ainda a disponibilidade de processos de fabrico que permitem obter formas complexas e de grandes dimensões. Estas vantagens têm estado na base da utilização crescente em vários sectores, tais como as indústrias aeronáutica e espacial, automóvel, naval, médica e desportiva [Gibson, 2007].

Todavia, sabe-se que os laminados compósitos são suscetíveis de sofrerem descolamento de camadas, modo de rotura que se designa por delaminação (figura 1.2).

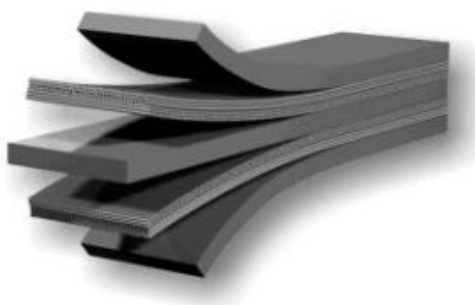


Figura 1.2 - Delaminações num compósito [TU Delft, 2012].

As delaminações ocorrem devido fundamentalmente à resistência relativamente fraca da fina camada de resina que une as camadas do laminado [Moura e outros, 2005; Gibson, 2007; Chung, 2010]. Além disso, as delaminações surgem preferencialmente em zonas onde há tensões interlaminares importantes, sobretudo entre camadas de diferentes orientações. As delaminações podem também formar-se a partir de fendas transversais nas camadas (figura 1.3), estando estes modos de dano frequentemente associados.

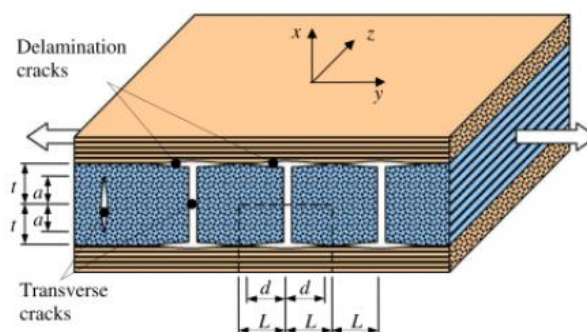


Figura 1.3 - Representação esquemática das fendas transversais num laminado $[0_n/90_m]_s$ e delaminações que tendem a formar-se posteriormente [Paris e outros, 2010].

Daí que tenham sido realizados muitos trabalhos com o objetivo de caracterizar a resistência à delaminação [Davies e outros, 1998; Brunner e outros, 2008]. Esta caracterização é concretizada no âmbito da Mecânica da Fratura através de ensaios de provetes com pré-delaminações criadas artificialmente mediante a inserção de um filme desmoldante muito fino (espessura não superior a 13 μm) durante o fabrico do laminado [Gibson, 2007; Moura e outros, 2005; Chung, 2010; Davies e outros, 1998; Brunner e outros, 2008]. Os modos possíveis de sollicitação da delaminação são ilustrados na figura 1.4.

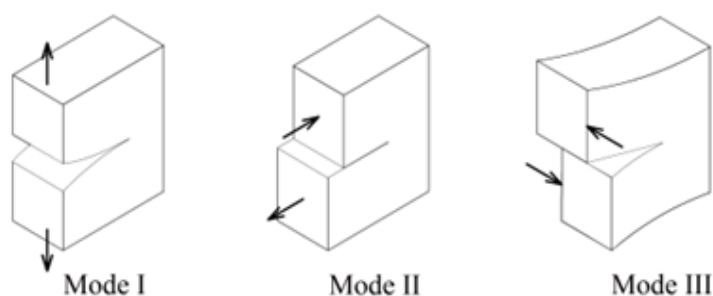


Figura 1.4 - Modos de sollicitação da delaminação.

A resistência à propagação de uma fenda pode ser caracterizada com base em fatores de intensidade de tensão K_j ou em taxas de libertação de energia de deformação G_j , com $j=I, II$ ou III . Os primeiros são habitualmente usados para materiais metálicos, mas relativamente pouco aplicados a compósitos, dada a maior complexidade dos campos de tensões decorrente da anisotropia. Perante sollicitação de modo puro j , a propagação da delaminação ocorre quando é atingida a taxa crítica de libertação de energia de deformação G_{jc} . Esta pode ser medida em vários ensaios, alguns dos quais já foram objeto de normas, como o ensaio de modo I *Double Cantilever Beam* (DCB) [ISO 15024, 2001; ASTM D5528, 2001], o ensaio em modo II *End-Notched Flexure* (ENF) [ASTM WK22949, 2011] e o ensaio em modo I-II *Mixed-Mode Bending* (MMB) [ASTM D6671, 2006] (figura 1.5). Os laminados usados são do tipo unidirecional, com as fibras alinhadas segundo o comprimento do provete.

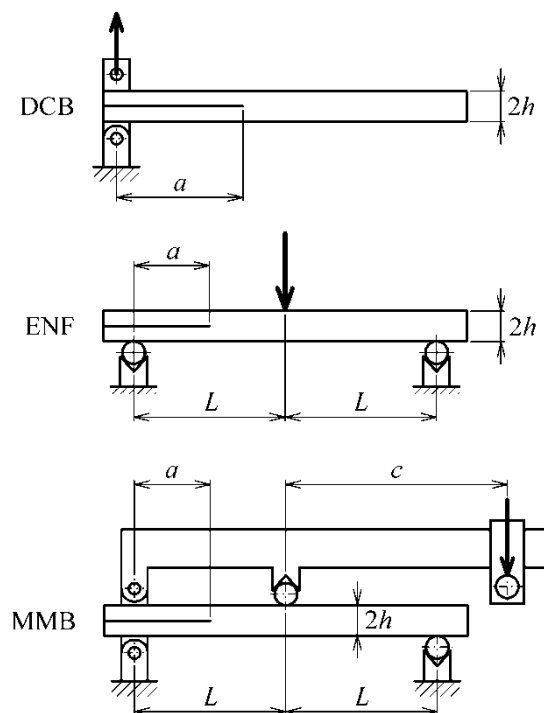


Figura 1.5 - Representação dos ensaios DCB, ENF e MMB [Pereira e Morais, 2008].

Durante um ensaio mede-se o comprimento da fenda a e a flexibilidade do provete $C = \delta/P$, sendo δ o deslocamento e P a carga aplicada. A relação de Irwin-Kies permite então obter [Gibson, 2007; Moura e outros, 2005; Chung, 2010]

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (1.1)$$

sendo B a largura do provete. Os ensaios de fratura mais comuns envolvem flexão de provetes e portanto as expressões $C(a)$ baseiam-se habitualmente na Teoria das Vigas.

1.3 COMPORTAMENTO À FADIGA

A fadiga é um tipo de sollicitação que consiste na aplicação de cargas cíclicas abaixo do limite linear elástico dos materiais, e que provoca a formação e propagação dos defeitos suscetíveis de provocar a rotura. Nos materiais homogêneos e isotrópicos a rotura por fadiga é ditada por iniciação e propagação de uma fenda, ao passo que nos materiais compósitos ocorre uma acumulação generalizada de dano de natureza diversa: fissuração transversal e longitudinal, descoesão fibra-matriz, delaminação e rotura de fibras.

O âmbito deste trabalho é a delaminação sob solicitações de fadiga, assunto que já foi objeto de vários estudos [Argüelles e outros, 2010; Beghini e outros, 2006; Blanco e outros, 2004; Bureau e outros, 2002; Hojo e outros, 2006; Kenane e Benzeggagh, 1997; Matsubara e outros, 2006; Shindo e outros, 2009; Brunner e outros, 2012]. Nestes estudos aplicaram-se carregamentos cíclicos a provetes dos tipos dos da figura 1.5, sendo o objetivo principal relacionar a taxa de propagação da fenda com a variação da taxa crítica de libertação de energia ou com o valor máximo desta. Em particular, procura-se ajustar a conhecida Lei de Paris,

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta G)^m \quad (1.2)$$

$$\frac{da}{dN} = A(G_{max})^m \quad (1.3)$$

sendo N o número de ciclos de carga e A e m parâmetros de ajuste de resultados experimentais. Por vezes determina-se também o valor mínimo de G_{max} que conduz de facto à propagação da fenda. Os parâmetros principais dos ensaios são a carga ou o deslocamento máximo imposto e o rácio R entre a carga mínima e a carga máxima ou entre o deslocamento mínimo e o deslocamento máximo. Devido às características viscoelásticas das matrizes poliméricas, a frequência dos ensaios está geralmente limitada a 5 Hz. De resto, os estudos realizados analisam também outros aspetos específicos, como se exemplifica seguidamente.

Kenane e Benzeggagh (1997) realizaram três tipos de ensaios de delaminação à fadiga em laminados vidro/epóxico: ensaios DCB de modo I, *End-Loaded Split* (ELS) (figura 1.6) de modo II e MMB de modo-misto I-II. O objetivo principal foi determinar os parâmetros A e m em função da razão de modos.

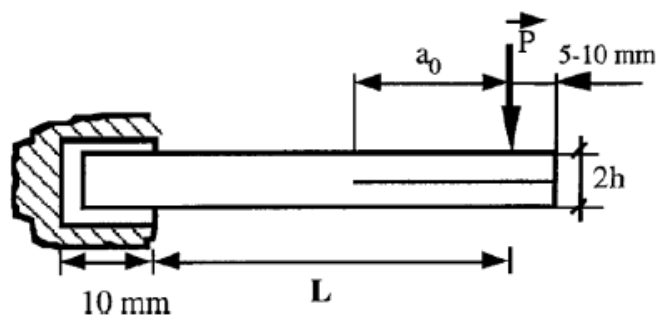


Figura 1.6 - Representação do ensaio ELS usado por Kenane e Benzeggagh (1997).

Blanco e outros (2004) realizaram um trabalho semelhante envolvendo ensaios DCB, ENF e *Mixed-Mode End-Loaded Split* (figura 1.7) em laminados carbono/epóxico. Os autores procuraram reduzir o fenómeno de ponte de fibras que ocorre vulgarmente nos laminados unidireccionais devido à migração de fibras entre camadas. Para isso usaram também laminados com camadas com orientação de 5° junto à delaminação inicial.

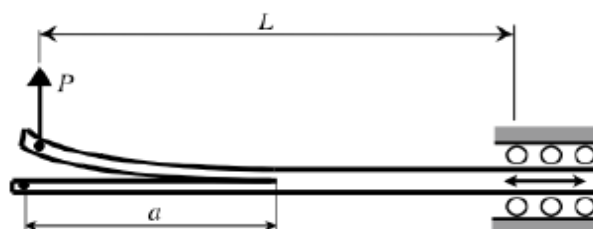


Figura 1.7 - Representação do ensaio Mixed-Mode End-Loaded Split usado por Blanco e outros (2004).

O trabalho elaborado por Bureau e outros (2002) procurou esclarecer o papel da microestrutura no comportamento à fadiga em modo II de compósitos de fibra de vidro/polipropileno através de provetes ENF. Bureau e outros (2002) concluíram que as condições de moldação tinham grande influência na interface fibra-matriz, na morfologia da matriz e por isso também a resistência à fadiga.

Argüelles e outros (2010) realizaram ensaios de fadiga em modo I e em modo II usando os provetes DCB e ENF. Os resultados mostraram a importância do processo de fabrico dos provetes e do fenómeno de ponte de fibras.

Matsubara e outros (2006) investigaram a delaminação à fadiga sob modo II em compósitos de fibra de vidro recorrendo a um ensaio ENF modificado para permitir inversão de carga (figura 1.8), ou seja, valores negativos de R . A figura 1.9 representa a título ilustrativo alguns dos resultados obtidos.

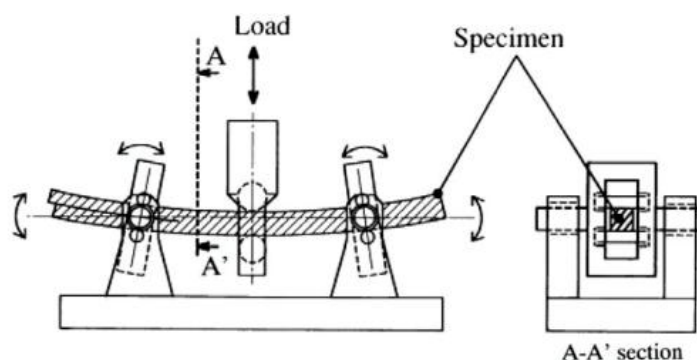


Figura 1.8 - Variante do ensaio ENF usada por Matsubara e outros (2006).

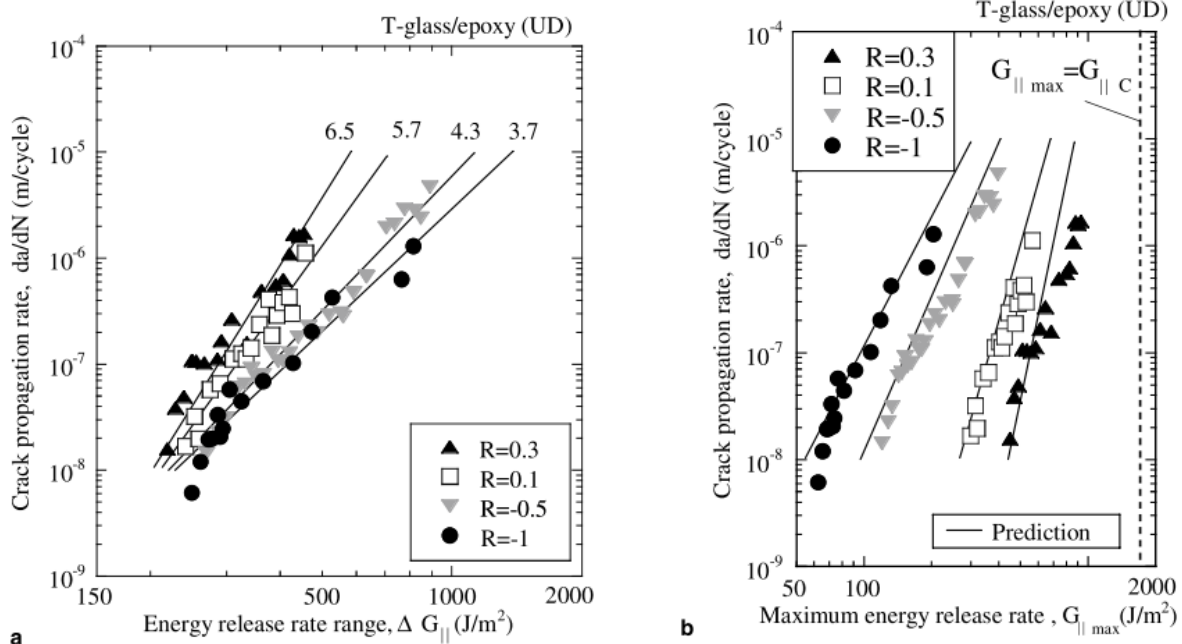


Figura 1.9 - Conjunto de resultados experimentais obtidos por Matsubara e outros (2006).

Beghini e outros (2006) estudaram a delaminação à fadiga em modo II através de ensaios ENF de laminados de fibra de carbono, tendo tido como um dos objetivos mostrar diferenças de comportamento entre laminados unidirecionais e multidirecionais.

Hojo e outros (2006) avaliaram o efeito de camadas intermédias de resina tenaz (*interleaf*) na resistência à fadiga em modo de laminados de fibra de carbono sujeitos a ensaios DCB.

Shindo e outros (2009) recorreram ao ensaio *4-Point End-Notched Flexure* (4ENF) representado na figura 1.10 para caracterizar a delaminação à fadiga em modo II à temperatura ambiente e a temperaturas criogénicas. Os resultados mostraram um decréscimo da taxa de propagação com a diminuição da temperatura (figura 1.11), bem como valores elevados do parâmetro m da Lei de Paris. Segundo Shindo e outros (2009), isso significa que uma pequena alteração na taxa de libertação de energia provoca uma grande alteração na previsão da taxa de crescimento de delaminação. Logo, incertezas nas cargas aplicadas podem gerar erros significativos nas previsões da vida útil da estrutura.

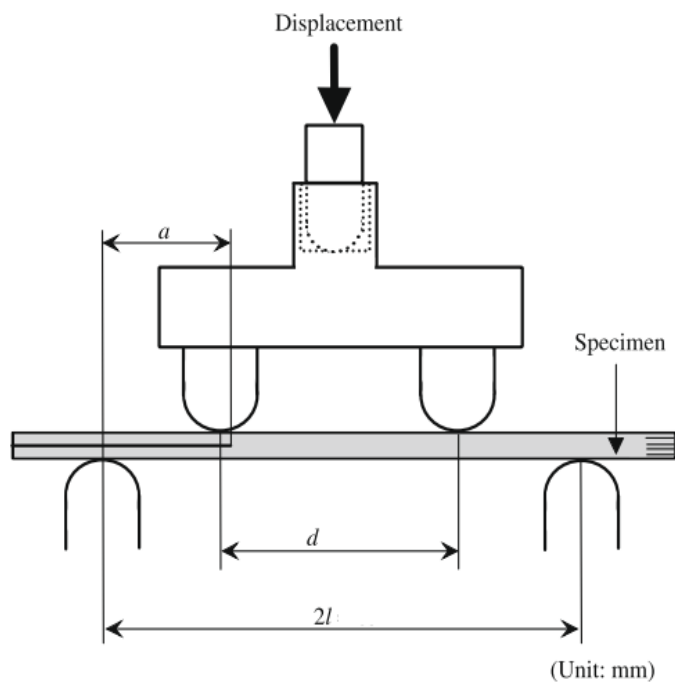


Figura 1.10 - Representação esquemática do ensaio 4ENF usado por Shindo e outros (2009).

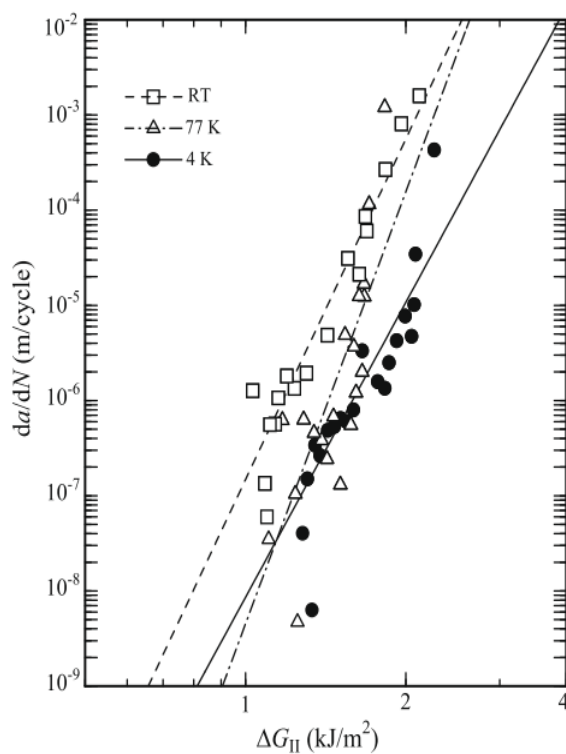


Figura 1.11 - Resultados obtidos por Shindo e outros (2009).

Brunner e outros (2012) apresentaram um estudo envolvendo ensaios ENF e ELS em dois tipos de laminados de fibra de carbono realizados em vários laboratórios. Os autores constataram que os provetes ENF se deslocavam no dispositivo durante o ensaio, devendo esse movimento ser restringido. Ainda assim, Brunner e outros (2012) registaram diferenças entre os parâmetros da Lei de Paris obtidos a partir dos dois tipos de ensaios (figura 1.12), diferenças essas cujas causas só podem ser identificadas após mais investigação.

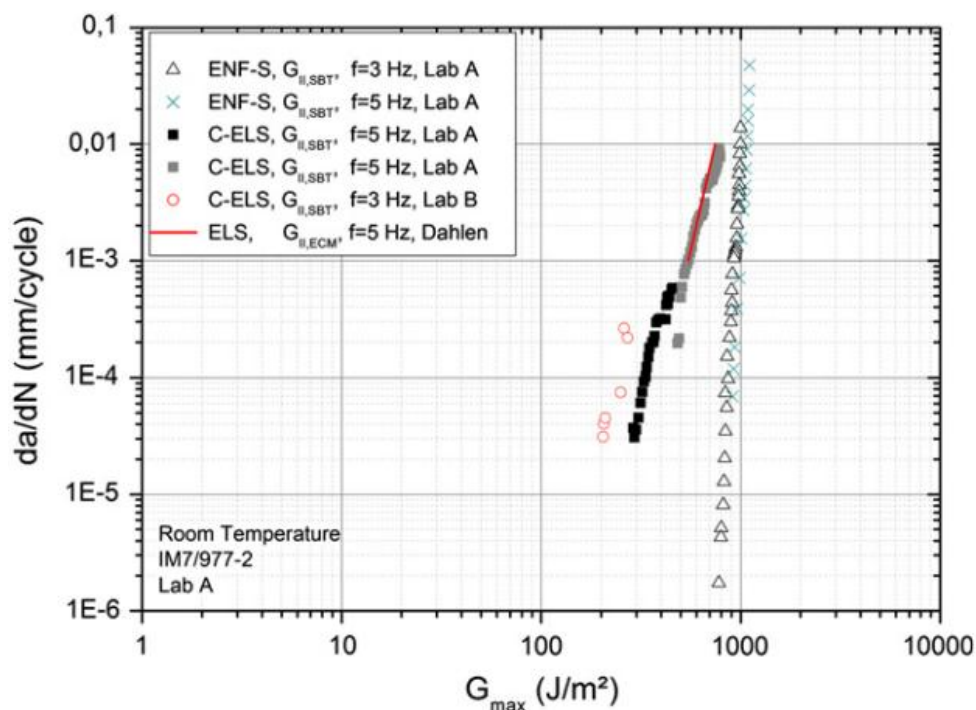


Figura 1.12 - Resultados obtidos por Brunner e outros (2012).

Esta breve revisão do estado de conhecimento na área da delaminação sob fadiga permitiu identificar os métodos e parâmetros de ensaio, assim como os dados que é necessário recolher e tratar. Este é um passo essencial para a conceção de um equipamento. O objetivo principal deste trabalho era completar uma Máquina de Ensaio à Fadiga (MEF) construída recentemente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (DEM-UA), sobretudo a componente de controlo e recolha de dados. Posteriormente pretendia-se realizar os primeiros ensaios experimentais tendo em vista avaliar e validar a MEF através da comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os de outros autores.

Capítulo 2

FINALIZAÇÃO DA MÁQUINA DE ENSAIOS À FADIGA

2.1 ESTRUTURA BASE E COMPONENTES

Os estudos experimentais do comportamento à fadiga recorrem habitualmente a máquinas servo-hidráulicas, que são caras e que têm elevados custos de manutenção. Daí que o DEM-UA tenha procurado desenvolver uma máquina de ensaios de fadiga (MEF) mais simples, tendo principalmente em mente a área de delaminação sob fadiga.

O ponto de partida para este trabalho foi uma máquina com estrutura já construída (figura 2.1 e figura 2.2). Em particular, a célula de carga já se encontrava montada na estrutura, assim como a zona de fixação do provete. O motor já tinha sido escolhido, mas só foi acoplado à máquina no decurso deste trabalho.

A estrutura da MEF foi projetada e construída por um grupo de alunos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro no âmbito de um trabalho prático de uma disciplina da Licenciatura. A máquina representada na figura 2.1 é constituída por uma estrutura rígida e por um travessão móvel. A primeira é obtida através das mesas superior e inferior ligadas entre si pelos 4 varões de suporte, enquanto que o travessão móvel é acionado pelos 2 conjuntos porca/fuso (TR24x5) através do motor num curso de 600 mm. Os dois fusos que movimentam o travessão estão montados e ligados nas mesas da máquina através de rolamentos. Como se observa na figura 2.1, um dos fusos está acoplado ao motor passo-a-passo. Para que os fusos rodem em simultâneo estão ligados por uma correia dentada que faz com que rodem tanto para a esquerda como para a direita simultaneamente. A relação de transmissão entre o motor e os fusos é de 1:1. A célula de carga aparafusada ao travessão móvel permite fixar acessórios para diversos tipos de ensaio. A mesa inferior possuiu uma área de trabalho com 300 mm de largura por um comprimento qualquer (pois é aberta), na qual é possível colocar os vários dispositivos de fixação inferior de provetes. A

figura 2.2 apresenta uma fotografia da MEF no estado inicial deste trabalho. Os parágrafos seguintes e o anexo A dão mais pormenores da composição da máquina e seus componentes.

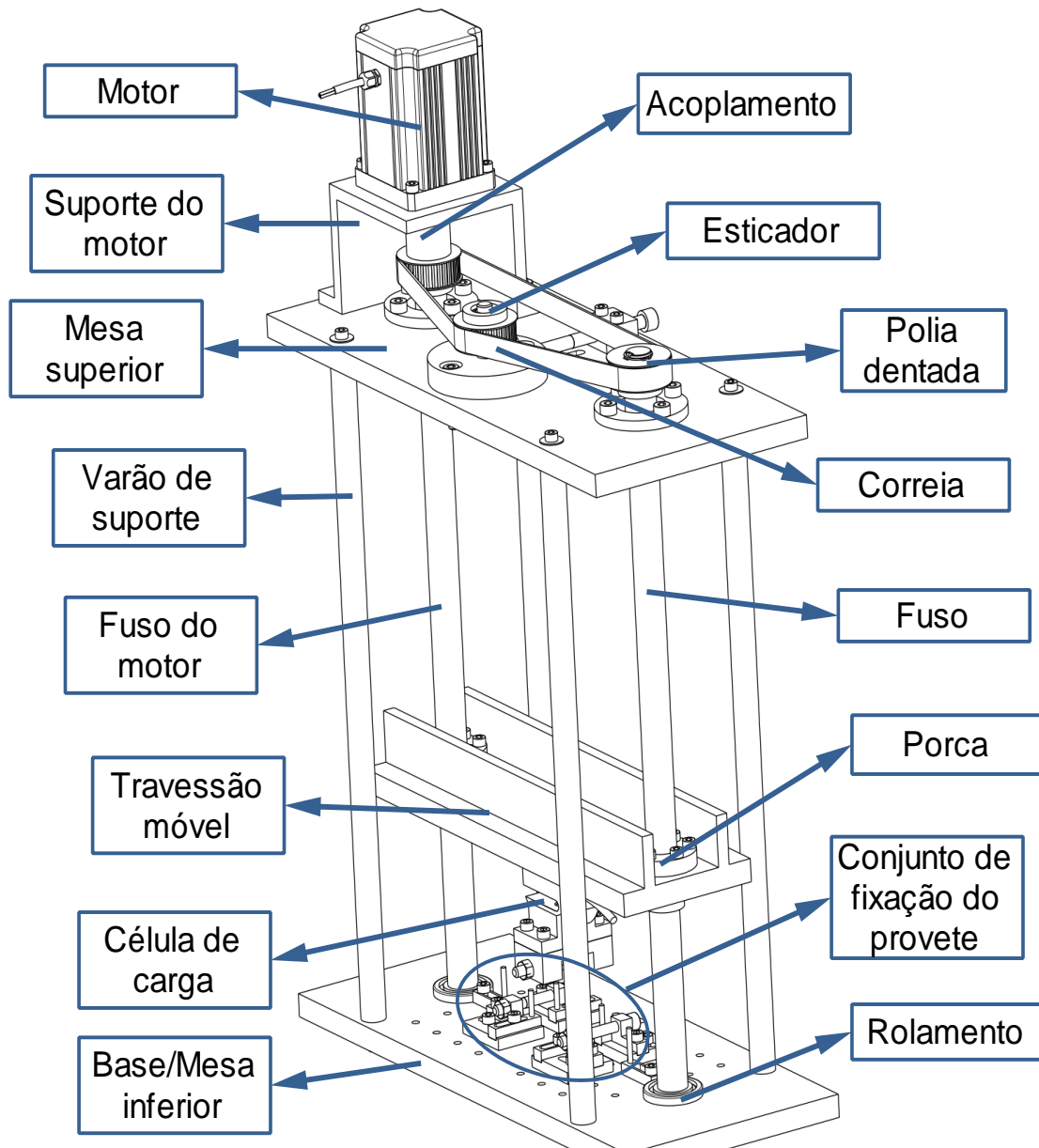


Figura 2.1 - Máquina de ensaios à fadiga (Desenho).

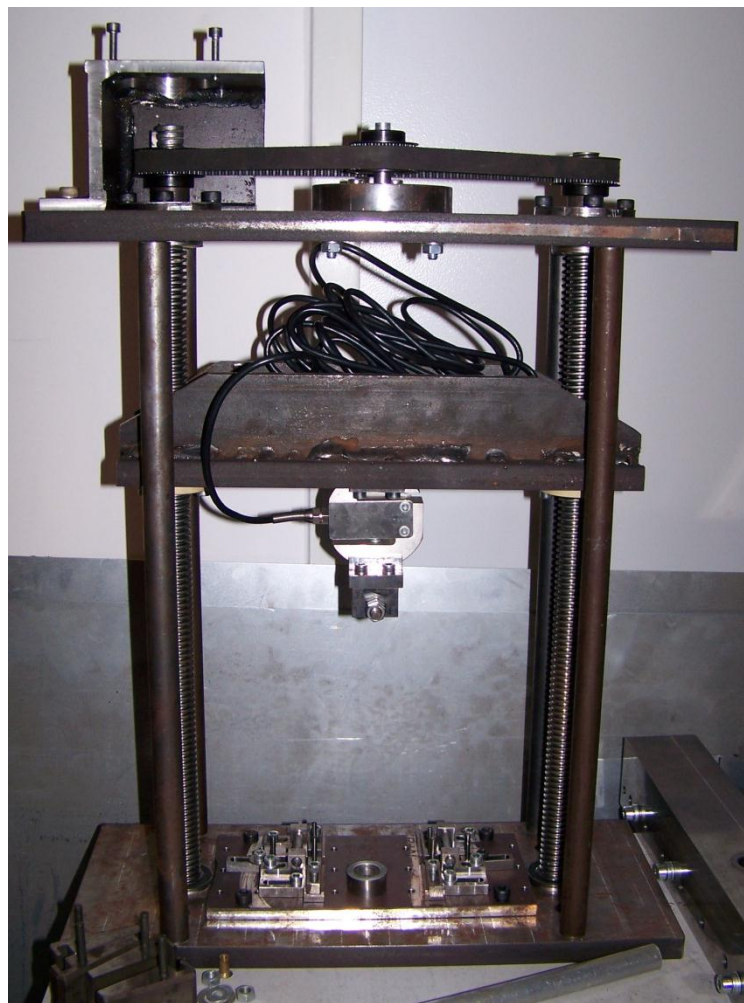


Figura 2.2 - Máquina de ensaios à fadiga.

2.1.1 Motor Passo-a-Passo

Os motores passo-a-passo convertem informação digital em movimento mecânico. Como o nome sugere, rodam um passo de cada vez e a sua posição é controlada por meio de sinais lógicos. Exemplos de aplicações típicas dos motores passo-a-passo são as impressoras de linha e as unidades de discos magnéticos [Rizzoni, 2004]. A característica mais importante deste tipo de motor é que o ângulo de rotação do motor é diretamente proporcional ao número de impulsos de entrada [Rizzoni, 2004; Hughes, 2006]. Além disso, o erro de ângulo por passo é muito pequeno e não acumulável. Os motores passo-a-passo são capazes de assegurar respostas rápidas no arranque, na paragem e inversão de sentido e podem ser acionados diretamente por sinais digitais. Outra característica importante nos motores passo-a-passo é a capacidade de auto retenção (*self-holding*), que torna possível o rotor

manter a mesma posição, parado, sem a utilização de travões [Rizzoni, 2004; Hambley, 2010]. Finalmente, uma vasta gama de velocidades de rotação, proporcional à frequência do sinal de impulso, pode ser encontrada neste tipo de motores [Rizzoni, 2004; Júnior, 2006]. Os motores passo-a-passo são projetados para trabalhar em longos períodos com posição fixa de passos no rotor e uma corrente nominal no enrolamento ou enrolamentos [Hughes, 2006].

Os motores passo-a-passo são classificados em três categorias (figura 2.3): motores de relutância variável, motores de ímã permanente e motores híbridos [Rizzoni, 2004; Hambley, 2010].

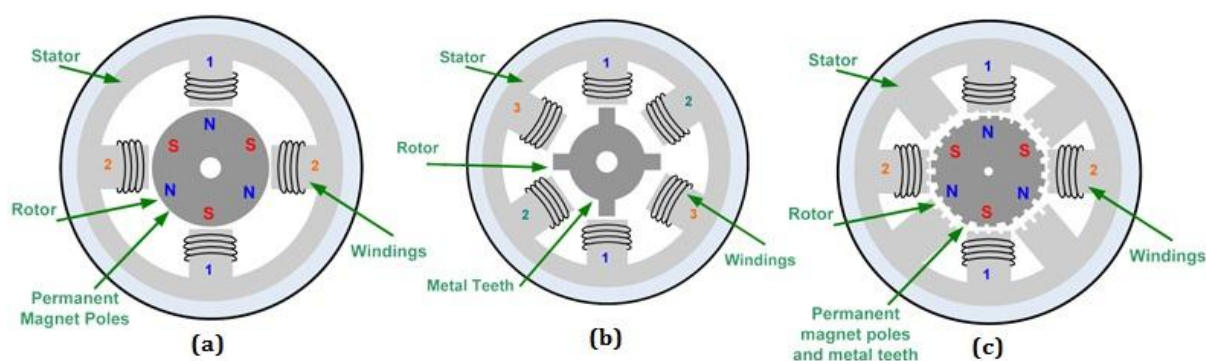


Figura 2.3 - Configurações do motor de passo: (a) Ímã permanente; (b) Relutância variável; (c) Híbrido [Digi-key, 2012].

Independentemente da configuração, o princípio de funcionamento é essencialmente o seguinte: quando os enrolamentos são energizados, geram-se no estator polos magnéticos e o rotor vai alinhar-se de acordo com a direção do campo magnético desenvolvido pelo estator. Ao inverter a fase da corrente nos enrolamentos ou através da energização de alguns enrolamentos (possível para motores com mais do que dois polos no estator), o alinhamento do campo magnético do estator pode tomar uma de um número discreto de posições. Se as correntes nos enrolamentos são utilizadas na sequência apropriada, o rotor vai avançar passo-a-passo. Assim, os motores passo-a-passo são úteis sempre que seja necessário efetuar movimentos incrementais precisos [Rizzoni, 2004].

Na conceção da máquina de ensaios à fadiga foi escolhido e utilizado um motor passo-a-passo híbrido BSHB3913-H (figura 2.4), que combina motores de relutância variável e motores de ímã permanente. Os motores híbridos têm múltiplos dentes no rotor e no estator, com o rotor dotado de ímanes magnetizados à volta do veio. Geralmente, os motores híbridos possuem elevada precisão, elevado binário e podem ser configurados para fornecer

passos com ângulos pequenos. As principais características e especificações do motor utilizado podem ser encontradas no anexo E.



Figura 2.4 - Motor passo-a-passo híbrido BSHB3913-H [BSJD,2012].

2.1.2 Célula de carga

As células de carga têm por base componentes concebidos para sofrerem deformação no regime elástico. Embora pequena, essa deformação deve ser suficiente para gerar um sinal de saída linear e compatível com a carga aplicada. Em termos globais, trata-se por tanto de um transdutor que converte a força ou peso em sinal elétrico. Aos componentes deformáveis da célula de carga são colados extensómetros (figura 2.5), cujo princípio de funcionamento se baseia na variação da resistência de *Ohm* perante deformação [Morris, 2001; Sinclair, 2001].

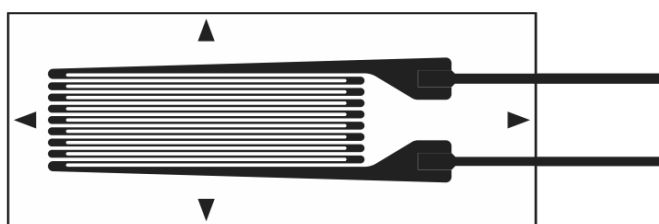


Figura 2.5 - Exemplo de extensómetro elétrico [TML, 2012].

Os extensómetros são habitualmente montados em ponte de *Wheatstone* (figura 2.6), que é um circuito resistivo frequentemente encontrado numa grande variedade de circuitos

de medição [Rizzoni, 2004]. Isto deve-se à excelente sensibilidade e estabilidade deste tipo de circuito [Morris, 2001].

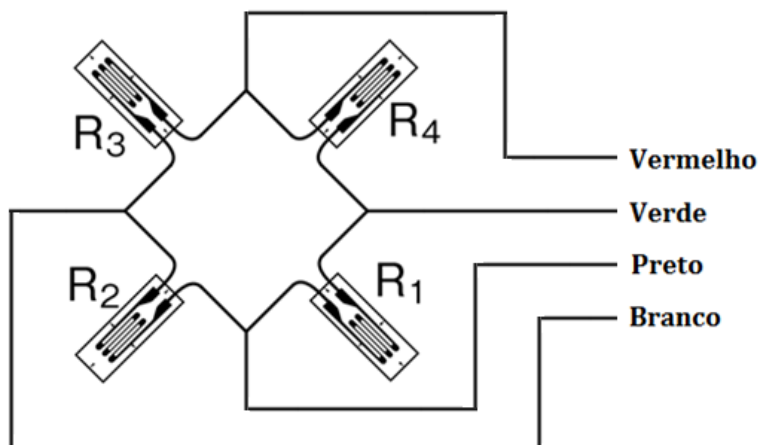


Figura 2.6 - Representação da ponte de *Wheatstone* com extensômetros nos 4 braços da ponte, célula de carga [TML, 2012].

A célula de carga utilizada neste trabalho é do tipo S de tração/compressão (figura 2.7) Ningbo Xinlan XL 8111 de capacidade 1 tonelada. Os fios com a cor vermelha e preto são de excitação da célula de carga, os outros dois, verde e branco, são o sinal de saída. As ligações elétricas da célula de carga com o resto dos componentes necessários ao seu funcionamento podem ser observadas no esquema elétrico representado no anexo B. O anexo C contém as especificações técnicas da célula de carga.



Figura 2.7 - Célula de carga utilizada na máquina de ensaios.

2.1.3 Driver

Para o controlo e alimentação do motor passo-a-passo utilizado na máquina de ensaios à fadiga utilizou-se o *driver* DM3522M da empresa Shenzhen Baishan (figura 2.8). O *driver* surge na conceção da máquina com a finalidade principal de amplificar a corrente que alimenta o motor. De facto, o microcontrolador que envia os impulsos para o controlo do motor passo-a-passo não debita a intensidade de corrente necessária. Para além disso, o *driver*, está dotado de uma coleção de características (anexo D) que facilitam o controlo da rotação do motor. O *driver* é programável a partir de um painel que tem incorporado, no qual se podem indicar as variáveis: passo simples ou micropasso, número de passos por rotação, sentido de rotação, entre outros.



Figura 2.8 - Driver DM3522M [BSJD, 2012].

2.1.4 Amplificador INA 125

A alimentação e amplificação do sinal proveniente da célula de carga foram realizadas por meio de um circuito integrado, modelo INA 125 (figura 2.9 e figura 2.10), fabricado pela empresa *Burr-Brown*®, que tem incorporado uma fonte de precisão para fornecer tensão de referência e que possui também um amplificador de instrumentação com ganho ajustável. A figura 2.10 ilustra a estrutura interna deste componente e seu esquema básico de ligações.

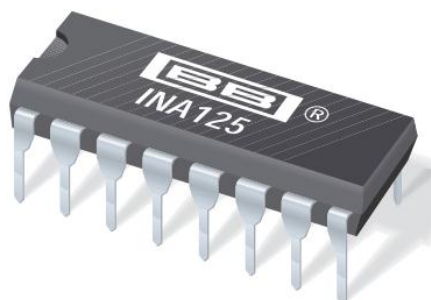


Figura 2.9 - Vista em perspectiva do INA 125 [Datasheet INA 125, 2012].

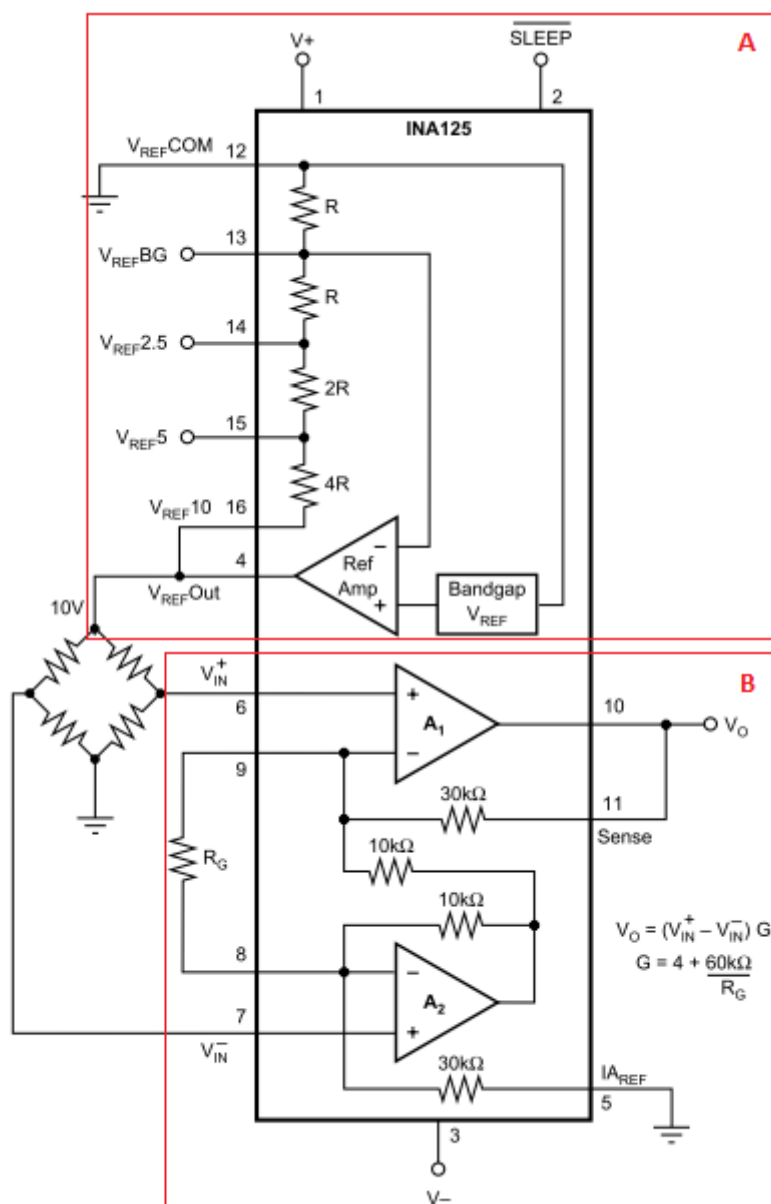


Figura 2.10 - Estrutura interna e esquema básico de ligação do INA 125 [Datasheet INA 125, 2012].

Conforme mostra a figura 2.10, o amplificador pode ser dividido em dois blocos. O bloco B é o estágio de entrada diferencial do amplificador de instrumentação e o seu ganho G é tal que

$$V_0 = (V_{in}^+ - V_{in}^-) \cdot G \quad (2.1)$$

em que,

$$G = 4 + \frac{60K\Omega}{R_G} \quad (2.2)$$

Esta configuração de amplificação utilizada pelo INA 125 garante elevada impedância de entrada, bem como um controlo bastante simples do ganho de entrada.

O bloco A, conforme mostra a figura 2.10, é responsável pela geração de tensão de excitação da ponte de *Wheatstone*. Basicamente, este circuito é composto por uma referência de tensão e um amplificador operacional montado na configuração não inversora. Dada a configuração da malha de realimentação do amplificador, a saída da tensão de excitação da ponte pode ser de 1.25V, 2.5V, 5V ou 10V. A função do amplificador operacional, para além de ser um meio simples de ajustar a tensão de referência conforme a aplicação, serve também de *buffer* para a tensão de referência, permitindo que a saída de tensão seja imune às variações de carga [Datasheet INA 125, 2012].

A célula de carga foi amplificada com um ganho 500 vezes superior ao ganho sem a utilização de um amplificador de instrumentação, neste caso INA 125. A resistência, R_G , ao qual é equivalente um ganho de 500 é uma resistência de 120 Ohm, ligada entre os pinos 8 e 9 do INA 125, como se pode ver no esquema elétrico do anexo B. O ganho é calculado através da equação 2.2.

No bloco B é efetuada a amplificação do sinal de saída da célula de carga. A entrada dos poucos milivolts (mV) debitados pela célula de carga faz-se nos pinos 6 e 7 do INA 125, enquanto que a saída de uma tensão amplificada, 0 a 5 V, é efetuada através dos pinos 10 e 5.

2.1.5 Sensor SHARP GP1S53V

Em teoria, um motor passo-a-passo trabalha em malha aberta, mas a verdade é que, face às mais variáveis causas, como sejam um possível sobre-esforço, uma pequena falha elétrica, um movimento de inversão de sentido demasiado rápido (aceleração ou desaceleração), o motor pode perder um ou mais passos em cada ciclo. Durante um ensaio de fadiga, devido à sua duração mais ou menos longa o pormenor pode ser crítico. Era portanto essencial avaliar e corrigir a perda de passos, tendo-se para tal optado por um sensor *Sharp* GP1S53V000F, em detrimento de outros sistemas como *encoders* ou régua ótica, mais dispendiosos e mais difíceis de implementar. Este sensor possui um emissor de luz infravermelha (díodo emissor de luz – LED) que emite através de uma fenda vertical e um detetor com saída em foto transístor transmissivo. O emissor e o detetor são colocados numa caixa em forma de "U" em posições opostas (figura 2.11), permitindo a deteção sem contacto da presença de objetos.

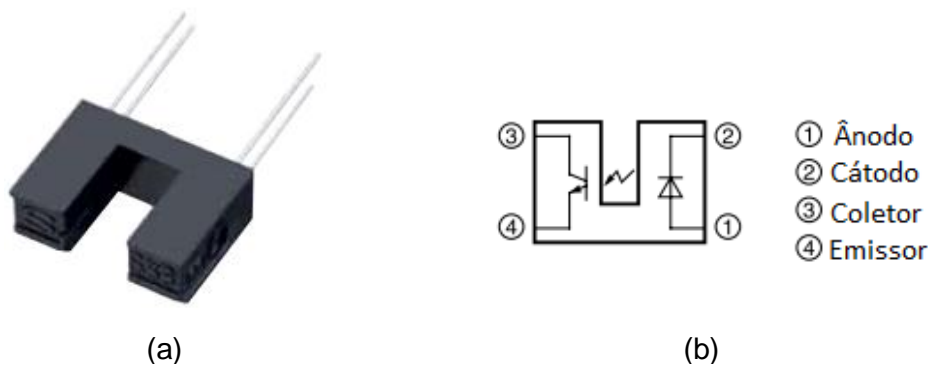


Figura 2.11 - (a) Sensor Sharp; (b) Diagrama de ligações internas [SHARP, 2012].

O referido sensor foi colocado na máquina dentro de uma caixa (figura 2.12) fixa no travessão móvel (figura 2.1) como mostra a figura 2.13. Por sua vez, o suporte do pino de fim de curso está ligado ao perfil de alumínio (melhor identificado na figura 2.17 do capítulo 2.2) que se encontra ligado rigidamente às mesas da MEF (figura 2.1) e que tem a particularidade de ser ajustável. A distância representada na figura 2.12 pela letra d é a distância de ajustamento que se efetua quando se pretende fazer um ensaio e que pode ser variada conforme os parâmetros do ensaio.

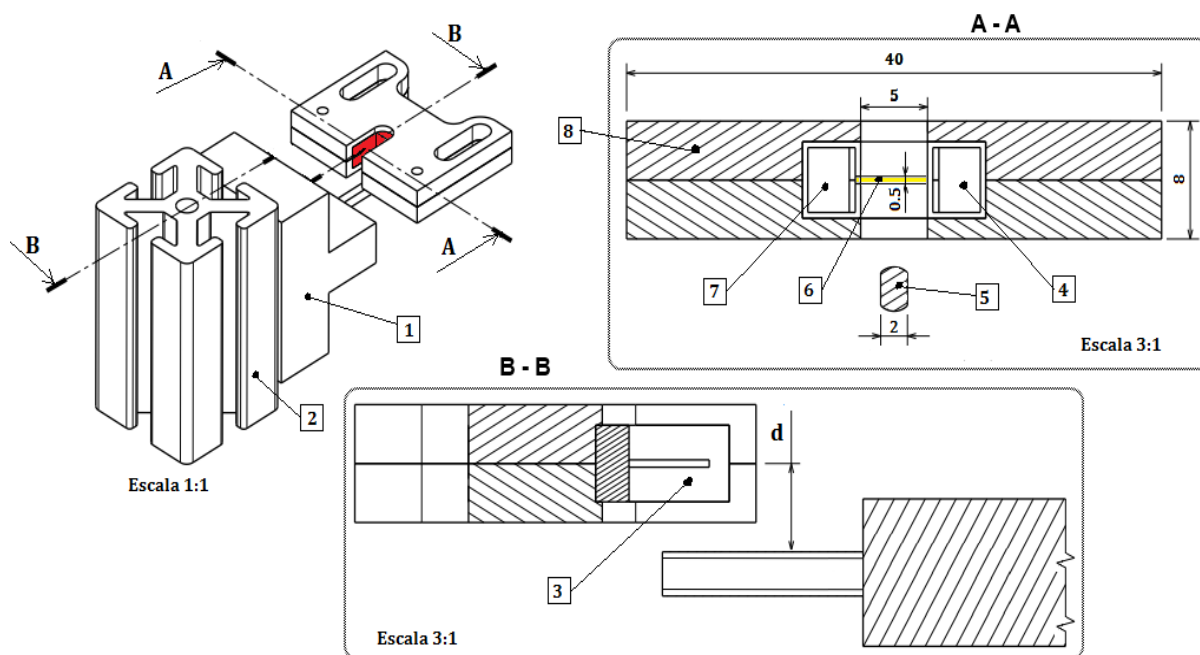


Figura 2.12 - Esquema de montagem do sensor na máquina de ensaios à fadiga em vista isométrica à esquerda e vistas em corte à direita. Peças assinaladas: 1 - Suporte do pino fim de curso; 2 - Perfil de alumínio; 3 - Sensor *Sharp*; 4 - Transístor recetor; 5 - Pino fim de curso, ajustável ao longo do perfil de alumínio; 6 - Feixe emitido com 0,5 mm de espessura; 7 - Díodo (Led) emissor; 8 - Suporte ou caixa do sensor. Unidades: mm.

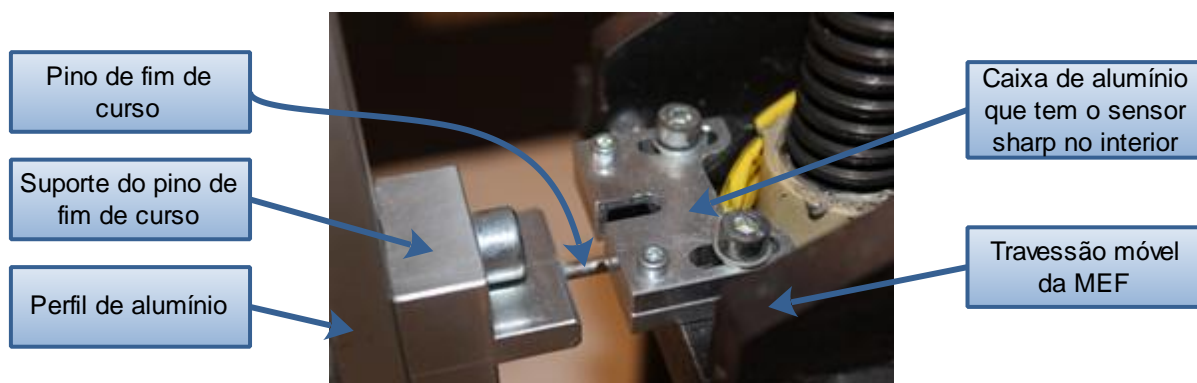


Figura 2.13 - Vista do sensor acoplado na máquina de ensaios.

Em funcionamento, o conjunto do sensor com a caixa têm movimento alternativo solidário com o travessão móvel da máquina, enquanto que o perfil de alumínio que suporta o pino fim de curso está fixado à mesa superior e base da máquina. Durante o movimento o referido pino entra periodicamente na caixa do sensor obstruindo a emissão de luz pelo díodo (indicação nº 5 da figura 2.12), obtendo-se do sensor um gráfico do tipo do da figura

2.14. Os valores mínimo e máximo servem de base à correção dos passos do motor conforme se descreve em detalhe no capítulo acerca do *software* para a recolha de dados.

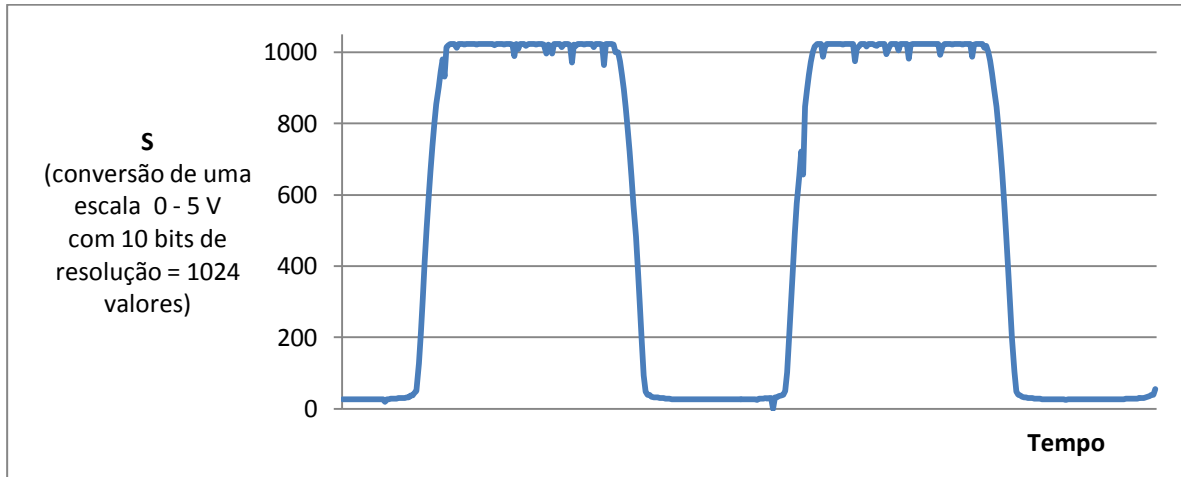


Figura 2.14 - Gráfico com dados recebidos do sensor ao longo de duas descidas e duas subidas do travessão móvel. A obstrução gradual do sensor provoca a subida do número de bits até à oclusão total (*plateau* com o valor máximo 1024).

2.1.6 Arduino Uno Rev3

O Arduino é uma plataforma de computação *open-source* baseada numa simples placa com entradas e saídas digitais e analógicas. Possui um ambiente de desenvolvimento próprio que utiliza a linguagem C. O Arduino tem a faculdade de ser usado para desenvolver objetos interativos autónomos e pode ser conectado a um *software* presente no computador (exemplo: *Flash*, *Processing*). O ambiente de desenvolvimento (IDE) *open-source* tem a possibilidade de ser obtido gratuitamente, disponível para os vários sistemas operativos. A figura 2.15 representa o Arduino Uno Rev3, placa utilizada na MEF.

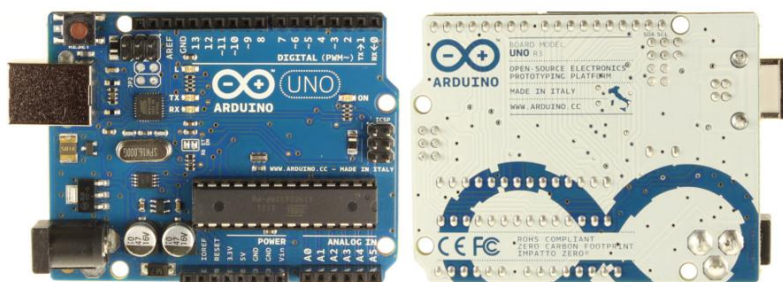


Figura 2.15 - Arduino Uno Rev3, vista frontal (esquerda), vista trás (direita).

O Arduino Uno Rev3 é uma placa com o microcontrolador ATmega 328. Possui 14 entradas/saídas digitais (das quais 6 podem ser usadas como saídas PWM - *Pulse With Modulation*), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16 MHz, conexão USB, uma entrada para fonte de alimentação, um conector ICSP (*In Circuit Serial Programming header*) e um botão de *reset*. Para começar a utilizar o microcontrolador basta conectá-lo a um computador por USB ou ligar a uma fonte AC-DC (ou bateria). Em suma, o Arduino Uno Rev3 apresenta as seguintes características:

- Tamanho: 5.3x6.8x1.0 cm;
- Microcontrolador: ATmega328;
- Tensão de operação: 5V;
- Tensão de entrada (recomendada): 7-12V;
- Tensão de entrada (limites): 6-20V;
- Pinos de entrada/saída (I/O) digitais: 14 (6 podem ser usados como saídas PWM);
- Pinos de entrada analógica: 6;
- Corrente DC por pino I/O: 40 mA;
- Corrente DC para o pino de 3.3V: 50 mA;
- Memória *Flash*: 32 kB (ATmega328), sendo 0.5 kB usados pelo *bootloader*;
- SRAM: 2 kB (ATmega328);
- EEPROM: 1 kB (ATmega328);
- Frequência de *clock*: 16 MHz.

Cada um dos 14 pinos digitais do Arduino Uno tem a faculdade de ser usado como entrada ou saída, através das funções *pinMode()*, *digitalWrite()* e *digitalRead()*, operando a 5V. O Arduino possui também entradas analógicas, rotuladas de A0 a A5, cada uma com 10 bits de resolução (i.e. 1024 valores diferentes). Permite várias formas de comunicação com um computador, com outro Arduino ou outros microcontroladores, e pode ser programado com o *software* Arduino [Arduino, 2012].

2.2 INTERVENÇÕES NA PARTE MECÂNICA

A conclusão da parte mecânica da máquina incidiu na colocação do sensor (suporte e fixação), do quadro elétrico e do suporte da célula de carga. Também houve intervenção na fixação do motor e para o ajuste dos fusos foram maquinados casquilhos, uma vez que os fusos apresentavam folga.

Relativamente ao suporte do sensor, pensou-se inicialmente colá-lo a uma chapa que se fixaria à máquina através de parafusos. Devido à pequena área de contacto entre o sensor e a chapa, verificou-se que o sensor descolava, o que levou a colocar esta opção de lado. Partindo do esboço da chapa, surgiu a ideia de fazer uma caixa (figura 2.16) com o mesmo formato do sensor. Neste novo conceito o sensor ficava completamente imóvel no interior da caixa, uma vez que a caixa é unida por ligações aparafusadas.

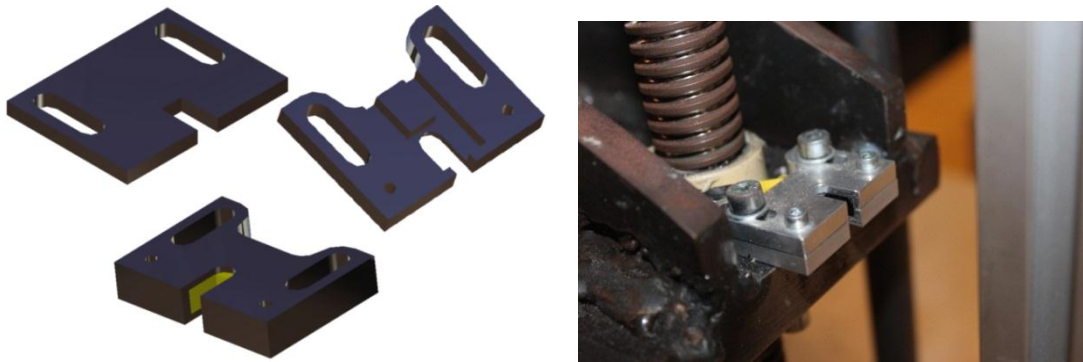


Figura 2.16 - Esboço final da caixa de suporte para o sensor à esquerda e caixa de suporte do sensor montado na máquina à direita.

Foi também concebido um suporte para o pino fim de curso, que foi ligado por parafusos ao perfil de alumínio (figura 2.17).



Figura 2.17 - Componentes de fixação da barra de fim de curso: Perfil de alumínio (esquerda); Peça para fixar o pino fim de curso (direita).

Finalmente, os suportes da célula de carga foram maquinados em material plástico, não condutor (figura 2.18).

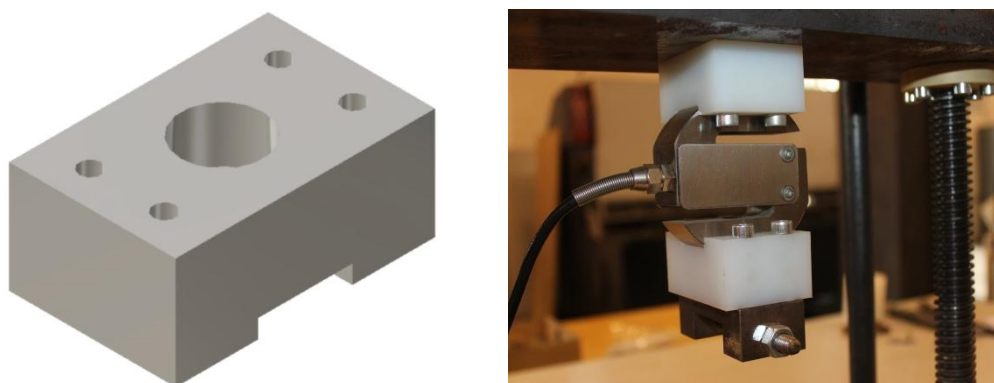


Figura 2.18 - Novo suporte para a célula de carga em plástico.

Os suportes do sensor, do pino de fim de curso e da célula de carga e os casquilhos para os fusos foram maquinados no centro de maquinagem (Mikron VCE 500) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (DEM-UA).

2.3 INTERVENÇÕES NA PARTE ELÉTRICA

A figura 2.19 representa esquematicamente os componentes principais da máquina e respetivas ligações elétricas. Assim, o controlo da máquina pode ser dividido em dois setores principais: o setor que inclui o Arduino, o *driver*, o motor passo-a-passo e o sensor, e o outro setor, ao qual pertencem a fonte de alimentação, a célula de carga e o amplificador.

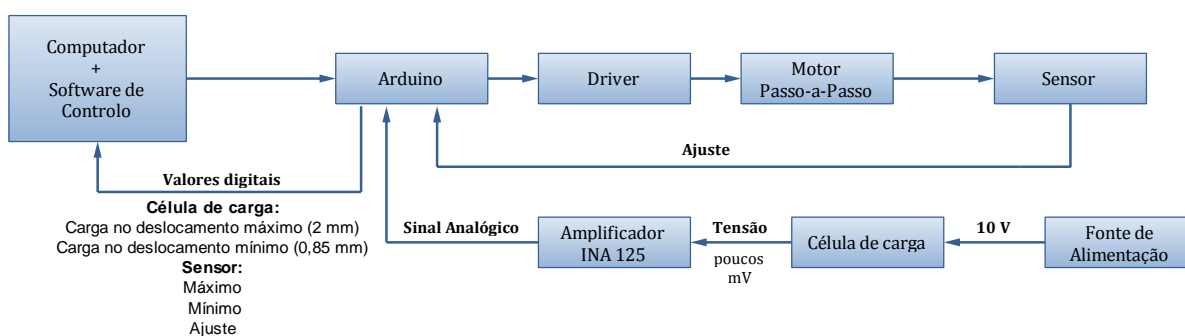


Figura 2.19 - Esquema dos componentes da máquina de ensaios à fadiga e suas ligações.

No primeiro setor, o computador com o programa de controlo da máquina (anexo F) envia, através da porta USB, as ordens de comando para o Arduino, que processa as ordens e transmite ao *driver* a sequência de funcionamento do motor passo-a-passo. Por seu turno, o *driver* vai enviar para o motor os impulsos necessários ao seu movimento, isto é, rodar à esquerda e rodar à direita até posições pré-programadas. O sensor de zero que está em funcionamento desde que o Arduino recebeu as instruções, envia para o Arduino os valores máximo e mínimo (figura 2.14) de controlo e o ajuste caso haja perda de passos.

Na segunda parte do esquema de controlo da máquina, a célula de carga é alimentada com 10 V através de uma fonte. Os dados da célula de carga recebidos pelo Arduino, isto é, carga no deslocamento máximo e carga no deslocamento mínimo pré-programados, são amplificados pelo amplificador de instrumentação INA 125. Em tempo real, os valores que o Arduino recebe são enviados para o computador, mostrados graficamente por um outro programa desenvolvido no *Processing* (Anexo G) e gravados num ficheiro de texto para serem tratados posteriormente.

No quadro elétrico, para as ligações dos componentes acima referidos, construído numa caixa de computador, foi inserido no Arduino uma placa *ProtoShield*, à qual se soldaram os componentes: resistências, condensadores, INA 125 e fios elétricos, que estavam montados numa placa *breadboard*. O aspeto final da soldadura dos componentes é visto na figura 2.21.

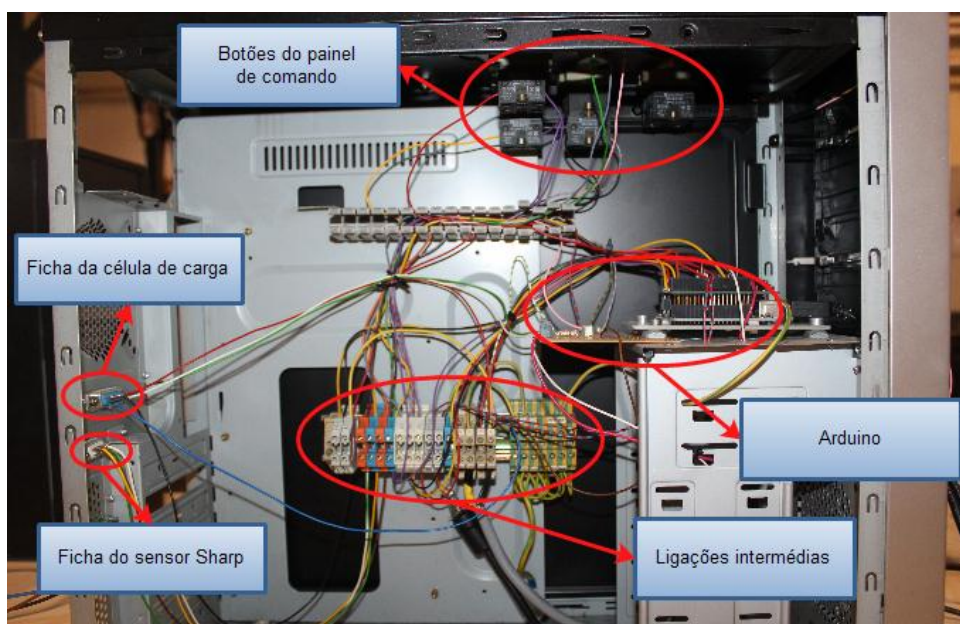


Figura 2.20 - Quadro elétrico.

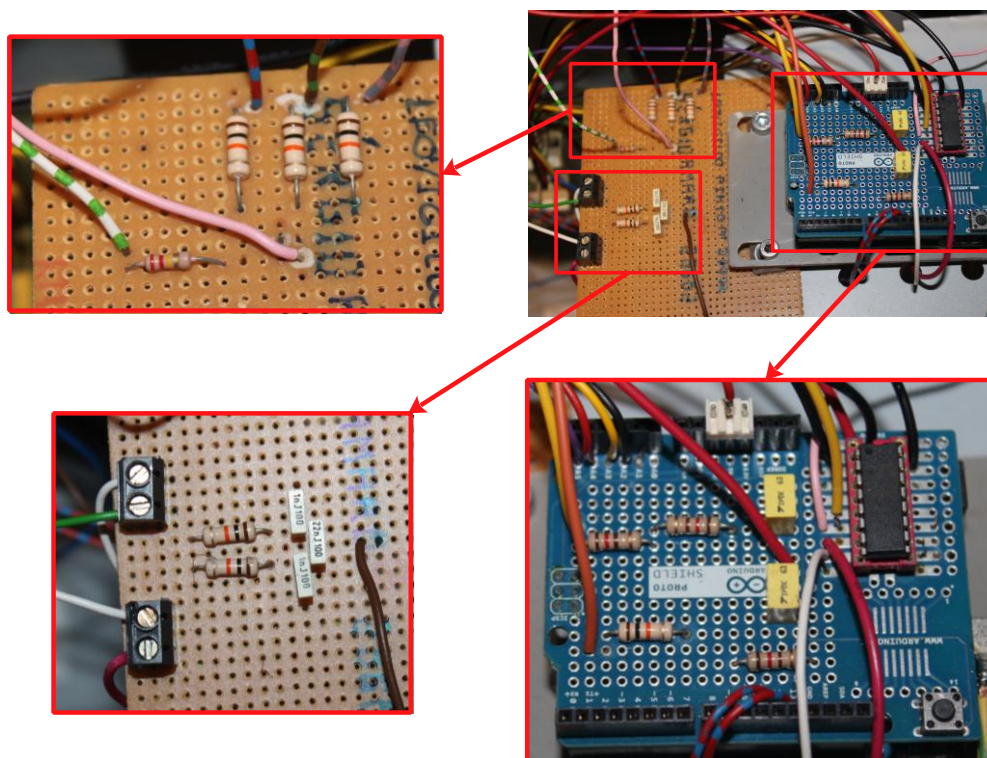


Figura 2.21 - Placa Arduino *Proto Shield* com componentes elétricos soldados.

Posteriormente, soldaram-se fichas nos cabos da célula de carga e do sensor provenientes da placa do Arduino, formando o quadro elétrico (figura 2.20) cujo painel (figura 2.22) inclui um botão para fazer rodar o motor à direita (subir), outro botão para movimentar o motor à esquerda (descer), um interruptor seccionador para controlo da máquina manual/automático, um potenciómetro para controlo da velocidade e um botão de emergência.

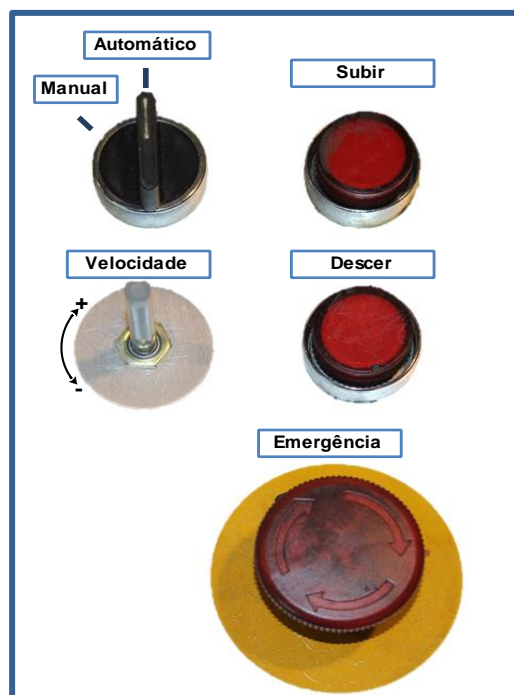


Figura 2.22 - Painel de controlo inserido no quadro elétrico.

Outro aspeto que mereceu atenção foram as ligações à terra da estrutura da máquina e do circuito elétrico montado. As ligações à terra têm particular relevância para proteção de pessoas, instalações e equipamentos, sendo por isso vital serem devidamente projetadas. Posto isto, há que referir alguns contratemplos nas ligações à terra. Começou por se criar um ponto para ligação à terra das diferentes partes da máquina no quadro elétrico. Este ponto comum foi ligado à terra da fonte de alimentação do *driver* de controlo do motor e respetivo computador. Porém, nos primeiros testes de leitura de dados notou-se que havia ruído nos dados obtidos. Pensando que seria das ligações feitas à terra modificou-se consideravelmente as ligações, ficando o novo esquema com duas ligações distintas. Uma das ligações à terra incluía o *driver* de controlo do motor e o computador e a outra ligação continha a fonte de alimentação do Arduino. Ainda dentro destas duas diferentes ligações à terra, ligou-se uma delas ao pilar da oficina. Visto que não se conseguiu a diminuição do ruído, optou-se pela primeira opção de ligação à terra comum.

Na realidade, o ruído revelou-se um dos problemas principais nas medições. Foi efetuado um trabalho exaustivo de investigação da causa do ruído. A utilização de um osciloscópio *GoldStar Oscilloscope OS-9020A 20MHz* mostrou que o ruído era causado essencialmente pelo motor passo-a-passo e, em menor escala pelo *driver*. O valor do ruído

medido era da ordem de 1V o que, naturalmente, deteriorava de forma dramática os sinais lidos. Tomou-se desde logo algumas medidas básicas como:

- Entrançar os cabos de dados e os cabos de alimentação separadamente e mantê-los separados uns dos outros;
- Utilização de fios com malha para alimentação e envio e receção de dados;
- Ligação à terra comum, como anteriormente referido.

Fizeram-se depois algumas alterações ao esquema inicial:

- Retirar *driver* de controlo do motor do contacto com o quadro elétrico;
- Algumas trocas de terra;
- Desacoplamento do motor da estrutura da máquina;
- Criação de suportes da célula de carga em material não condutor;
- Tentativas de malha com papel de alumínio (experiência: no cabo de corrente do motor, no próprio motor (gaiola de *Faraday*) e no cabo de dados da célula de carga);
- Revestimento do cabo de corrente do motor com malha;
- Implementação de um filtro passa-baixo que pode ser visto na figura 2.23 (duas resistências mais três condensadores).

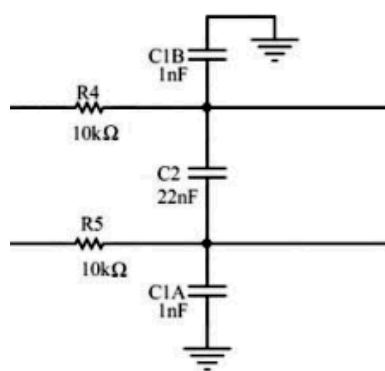


Figura 2.23 - Filtro passa-baixo aplicado [Guadagnini e outros, 2011].

O filtro passa-baixo foi inserido no esquema elétrico entre a ligação da célula de carga e o amplificador de instrumentação (INA 125), como se pode ver no anexo B. O filtro passa-baixo só foi aplicado na célula de carga uma vez que os resultados do sensor não apresentavam ruído que fosse, aparentemente, apreciável. Outro motivo pelo qual não se aplicou o filtro ao sensor foi que apenas foram utilizados os valores máximo e mínimo dados pelo sensor, isto é, quando o pino fim de curso se encontra na passagem da luz do emissor e

fora do sensor. Na verdade, o nível de ruído na linha do sensor era da mesma ordem de grandeza daquele existente na ligação da célula de carga. A questão é que enquanto no sensor é utilizada toda a gama possível do sinal (0 a 5V, ou seja, com 10 bit são 1024 valores), na célula de carga (1 ton) só são usados alguns quilogramas (Kg) pois o provete a ensaiar não requer mais carga.

As alterações acima referidas (aplicação do filtro e ligações à terra) foram implementadas devido ao facto de os dados que estavam a ser recebidos terem um ruído superior aos valores lidos pela célula de carga, como se pode ver na figura 2.24 e figura 2.25.

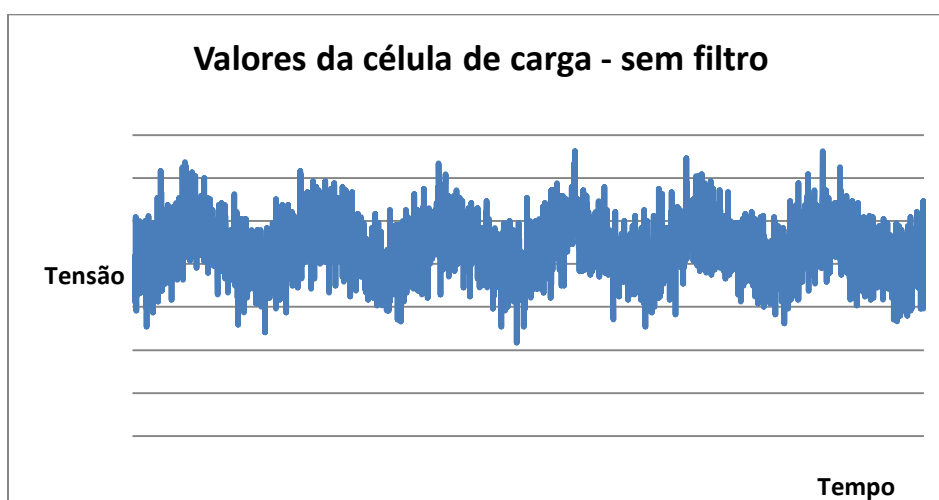


Figura 2.24 - Visualização gráfica de alguns ciclos da célula de carga, sem aplicar o filtro passa-baixo.

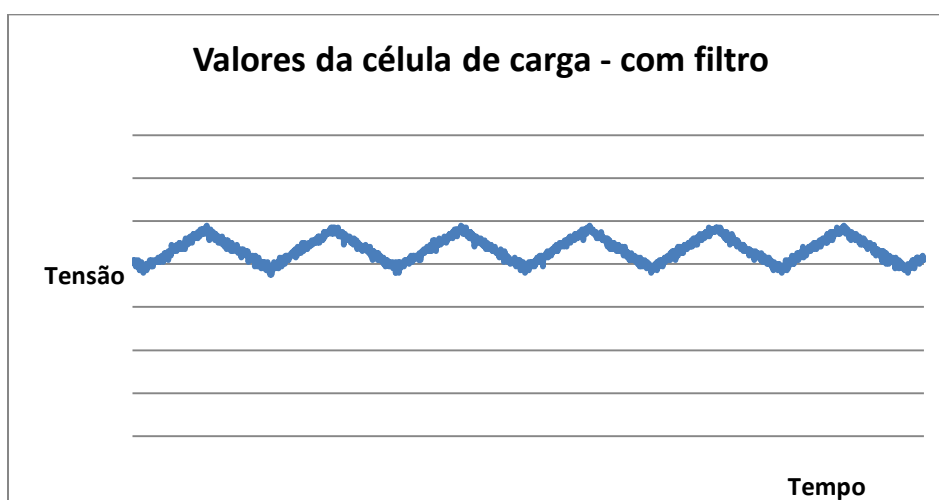


Figura 2.25 - Visualização gráfica de alguns ciclos da célula de carga, depois de aplicar o filtro passa-baixo.

2.4 INTERVENÇÕES NA PARTE DE CONTROLO

O diagrama de sequência da figura 2.26 resume o programa de controlo da máquina e as suas funcionalidades.

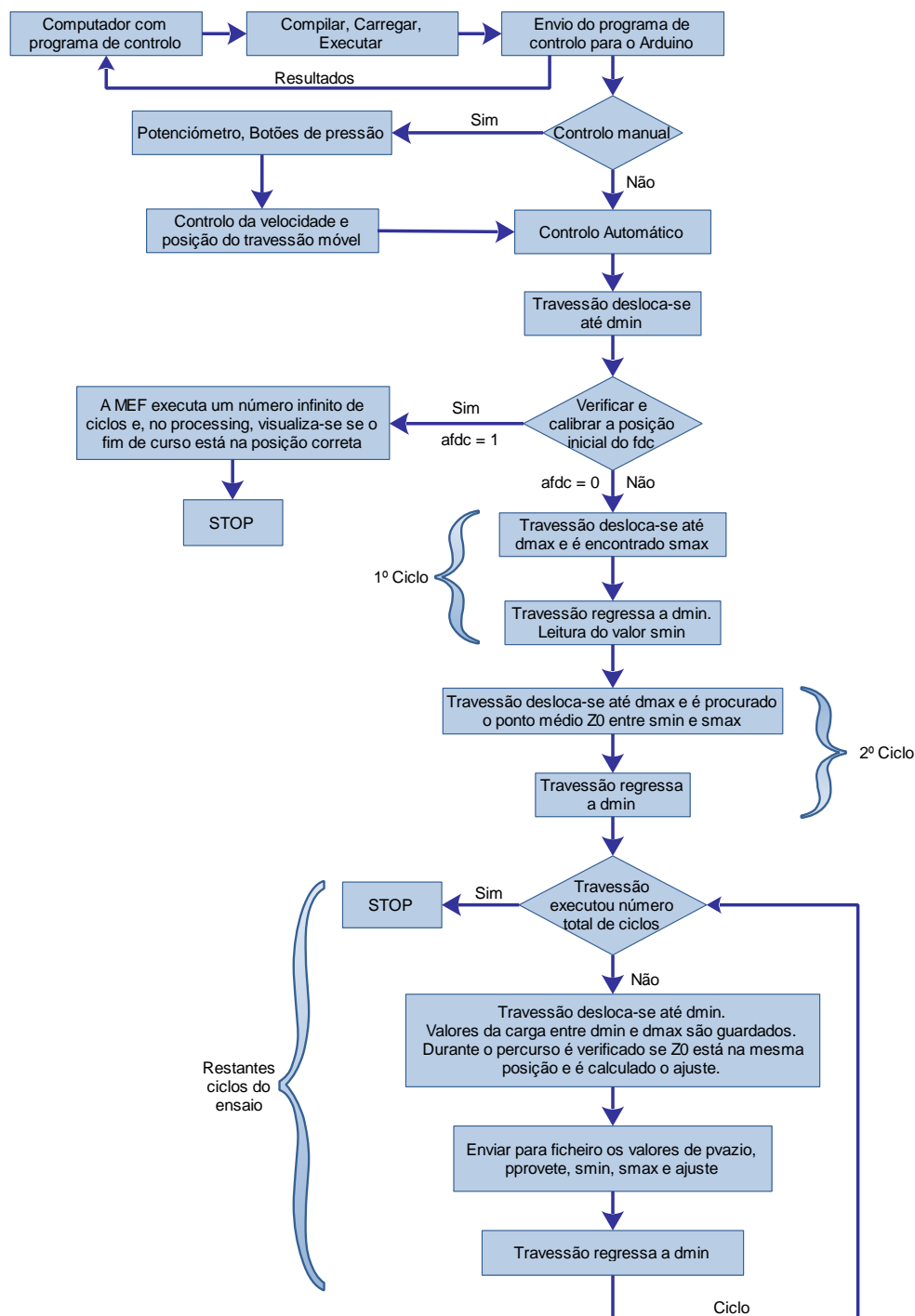


Figura 2.26 - Diagrama de sequência do programa de controlo da máquina de ensaios à fadiga.

Através do *software* disponível para o Arduino, previamente instalado no computador, compilou-se o programa de controlo, carregou-se e enviou-se para o *hardware* (Arduino). Através da função *void setup ()*, executada apenas uma vez, são inicializadas as variáveis, são definidos os pinos (portas de saída/ entrada do Arduino) a utilizar e os dados a utilizar no ensaio. O programa está realizado para que a máquina funcione de modo automático e de modo manual, sendo a escolha definida pela posição em que o interruptor seccionador se encontra (figura 2.22).

Em modo manual dispõe-se de dois botões de pressão para controlar o sentido de rotação do motor e de um potenciómetro que controla a velocidade do motor. De referir que se aumenta a velocidade girando o potenciómetro para a direita e que se diminui a mesma rodando em sentido inverso. Após movimentar o travessão para a posição pretendida, orienta-se o interruptor seccionador para a posição contrária e coloca-se a máquina a funcionar em modo automático. Este modo de funcionamento pode ser imediatamente ativado, sem passar pelo modo manual, se o interruptor seccionador se encontrar na posição apropriada quando se envia o programa para a placa Arduino. Existem dois processos de trabalho em modo automático. A forma de alterar este modo de funcionamento resume-se à mudança de variável *afdc* para "0" ou "1". Caso a variável *afdc* = 1, a máquina executa o programa que verifica se o fim de curso está no campo de deslocamento do sensor, efetuando um número de ciclos infinito desde a distância mínima (*dmin*) até à distância máxima (*dmax*). Naturalmente, antes de executar um ensaio em modo automático é imprescindível que o fim de curso esteja abaixo do sensor e dentro do percurso percorrido pelo sensor (figura 2.12 e figura 2.27).

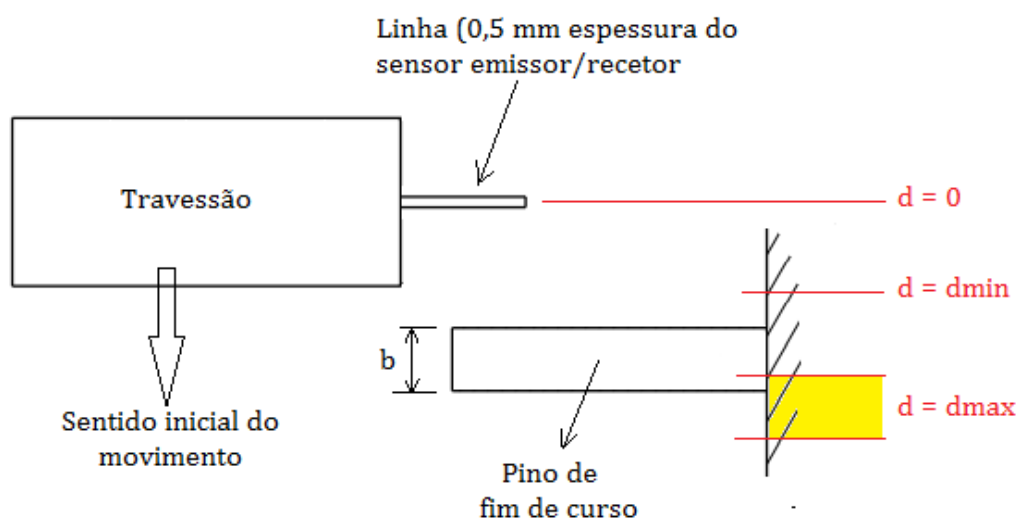


Figura 2.27 - Esquema da posição inicial do pino fim de curso relativamente ao sensor.

A figura 2.27 mostra que, no início do ensaio, o travessão se encontra na posição $d = 0$. Quando o travessão se desloca entre d_{min} e d_{max} é obrigatório que a linha de 0.5 mm de espessura do sensor (emissor/recetor) seja ocultada, pelo menos, por metade da largura b do pino. Verificando-se que o fim de curso está na posição correta, reinicia-se o programa com a variável $afdc = 0$ e, agora, para o número de ciclos previstos no ensaio de fadiga.

No modo automático da máquina, o travessão movimenta-se no sentido descendente, a baixa velocidade, até à posição d_{min} , espera nesta posição 0.5 segundos, e continua o movimento até d_{max} , posição em que é guardado o valor do sensor (s_{max}). Seguidamente o motor troca de sentido de rotação e movimenta-se novamente a baixa velocidade para a posição de d_{min} , onde é guardado o valor do sensor (s_{min}), e o motor inverte novamente o sentido de rotação também a baixa velocidade. Ao efetuar dois ciclos desde d_{min} até d_{max} , a baixa velocidade, é calculada a posição zero do fim de curso, média entre s_{min} e s_{max} e guardado esse valor com o nome $Z0$. Notar que a baixa velocidade do travessão nestes dois ciclos iniciais é fundamental. De facto, assim é garantido que não existe a possibilidade de perda de passos do motor pois, caso contrário, a posição $Z0$ poderia não ser fiável. Encontrado o zero do fim de curso, o programa executa o número de ciclos pré-definido no início do programa. Durante todos os ciclos que efetua é calculada a nova posição do zero do fim de curso, que é guardada na variável Z , e depois utilizada para o cálculo do ajuste do número de passos do motor, caso necessário. Este ajuste é portanto determinado pela diferença entre o novo zero (Z) e o zero guardado inicialmente ($Z0$), sendo efetuado ao longo de todo o ensaio. Para posterior análise de dados são armazenados durante o ensaio 5 variáveis: carga no deslocamento mínimo (p_{vazio}), carga no deslocamento máximo ($p_{provete}$), valor mínimo do sensor (s_{min}), valor máximo do sensor (s_{max}) e ajuste.

O motor roda comandado pelos impulsos enviados pelo *driver*, de t em t microssegundos, tal que:

- Cada rotação completa do motor corresponde a 400 impulsos (variável imposta pelo utilizador no painel do driver que pode variar de 400 a 60000 impulsos);
- Cada rotação do fuso corresponde a 5 mm de deslocamento linear, pois trata-se de um fuso TR24x5, onde 5 é o passo.

O tempo entre cada impulso é dado por

$$t(\mu s) = \frac{10^6}{2 \times 400 \times \frac{(d_{max} - d_{min})}{5} \times f} \quad (2.3)$$

sendo f a frequência de ensaio desejada.

Para além do software Arduino utilizado no comando e controlo da máquina de ensaios, usou-se a aplicação *Processing1.5.1*, para a qual se desenvolveu um outro programa (anexo G) que permite visualizar graficamente os resultados em tempo real. O *Processing* possibilita também gravar os resultados que são mostrados graficamente num ficheiro de texto, ajudando no tratamento posterior. Na figura 2.28 e figura 2.29 são mostrados dois exemplos de visualização dos resultados da célula de carga e do sensor, respetivamente.

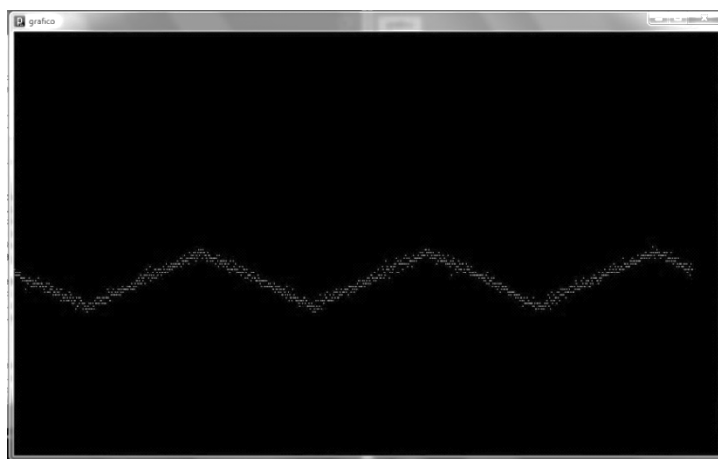


Figura 2.28 - Exemplo de visualização de dados da célula de carga com o programa *Processing*.

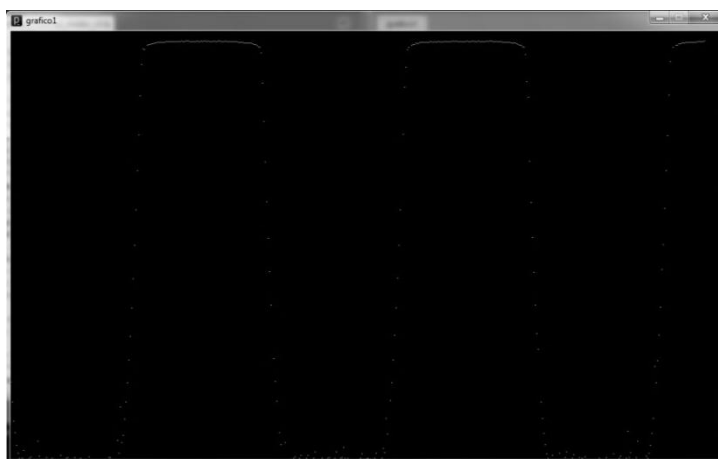


Figura 2.29 - Exemplo de visualização de dados do sensor com o programa *Processing*.

Finalmente, procedeu-se à calibração da célula de carga da MEF na máquina Shimadzu™ 50 KN-AG presente no DEM-UA. A montagem que se utilizou na calibração da célula de carga é apresentada na figura 2.30.

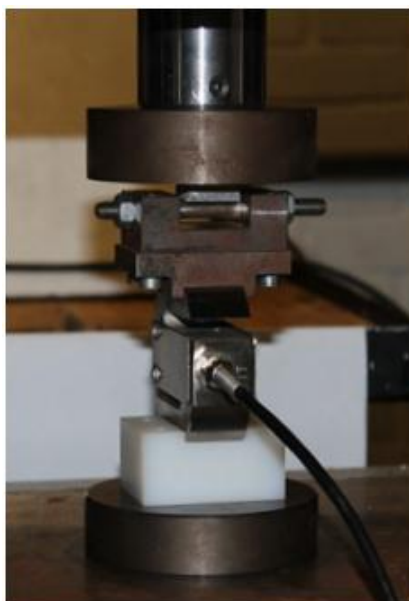


Figura 2.30 - Esquema de montagem para efetuar a calibração da célula de carga.

Durante a calibração obtiveram-se valores de tensão da célula, uma vez que se iria utilizar o Arduino para recolha de dados. A carga máxima imposta foi de 1000 N, dado que este valor não seria excedido nos ensaios de fadiga em modo II. Realizaram-se três testes para verificar a repetibilidade dos valores, sendo os resultados de um deles apresentado na figura 2.31. Notar que o valor da tensão não é zero para a carga zero porque a resistência de 215 k Ω utilizada no esquema elétrico (Anexo B) assim o impõe. Naturalmente, é possível substituir esta resistência fixa por uma resistência ajustável e, assim, garantir tensão = 0 para carga = 0.

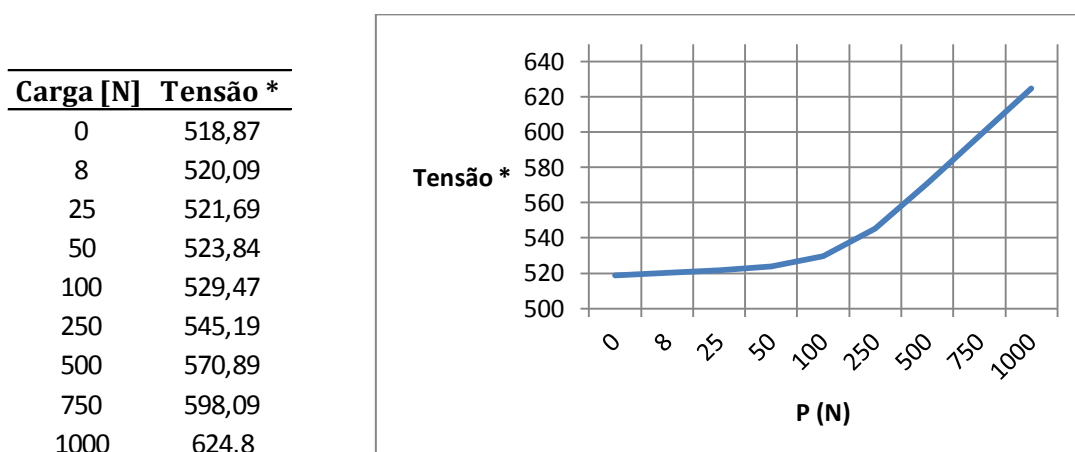


Figura 2.31 - Gráfico de calibração da célula de carga e respetivos valores (* conversão A/D de uma escala 0-5V com 10 bits de resolução = 1024 valores).



Capítulo 3

ENSAIOS DE FADIGA EM MODO II

3.1 OS PROVETES E SUA CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA

Ensaíram-se neste trabalho provetes laminados unidirecionais $[0^\circ]_{28}$ de carbono/epóxico produzidos a partir de pré-impregnado HS160REM fornecido pela empresa *Seal*. Durante a laminação foi inserido um filme desmoldante de PTFE com 15 μm de espessura para criar a fenda inicial. Os provetes foram obtidos de placas fabricadas no Instituto de Engenharia e Gestão Industrial (INEGI) por prensagem a quente. O corte dos provetes foi efetuado por jato de água.

Realizaram-se inicialmente ensaios para medir os módulos de flexão dos provetes que foram posteriormente ensaiados à fadiga. Este passo era essencial para se poder aplicar o método de tratamento de dados dito de fenda efetiva [Morais e Pereira, 2007]. Para isso recorreu-se a ensaios ENF nos quais se adotou a mesma geometria que foi usada para os ensaios de fadiga, ou seja (figura 1.5): fenda inicial de comprimento $a = 40$ mm, vão $2L = 125$ mm, largura $b = 20$ mm e espessura $2h = 4.1$ mm. Os ensaios foram efetuados na máquina Shimadzu™ AG-50KNG do DEM-UA, com uma célula de carga de 500 N de capacidade. Porém, como o objetivo era apenas estimar o módulo de flexão dos provetes e não medir G_{IIc} , impôs-se o deslocamento máximo de 2 mm igual ao que viria a ser usado nos ensaios de fadiga. Seguidamente, trataram-se as curvas carga-deslocamento obtidas (figura 3.1) no sentido de definir na zona linear a flexibilidade $C = \delta/P$.

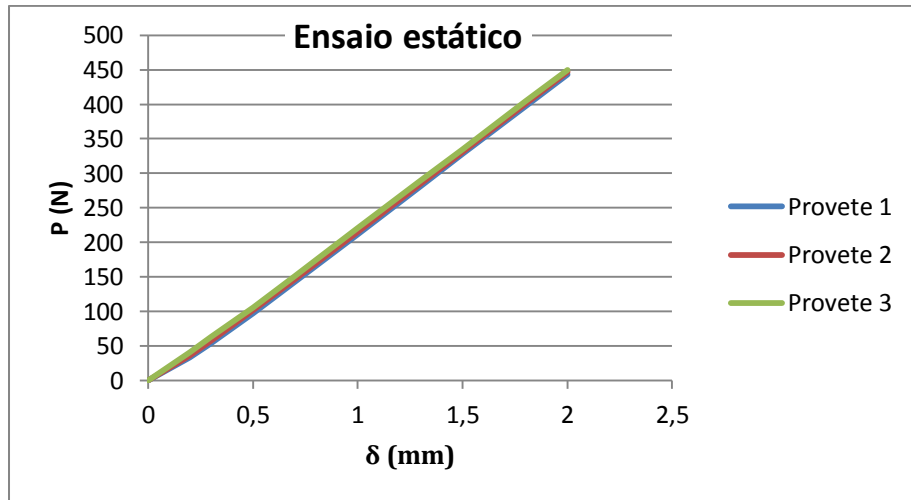


Figura 3.1 - Curvas carga-deslocamento medidas em ensaios ENF prévios.

A estimativa do módulo à flexão foi então obtida a partir da teoria das vigas corrigida [Morais e Pereira, 2007], segundo a qual

$$C = \frac{2L^3 + 3(a + \Delta_{II})^3}{8E_1bh^3} + \frac{3L}{10G_{13}bh} \quad (3.1)$$

com a correção para o comprimento da fenda [Morais, 2011]

$$\Delta_{II} = h \sqrt{\frac{E_1}{78G_{13}}} \quad (3.2)$$

e com o módulo de corte $G_{13} = 4.1 \text{ GPa}$ [Morais e Pereira, 2007]. Definido a flexibilidade de flexão

$$C_f = C - \frac{3L}{10G_{13}bh} \quad (3.3)$$

descontado o efeito de corte transversal, pode-se estimar o módulo de flexão a partir dos valores experimentais de C resolvendo a equação

$$E_1 = \frac{2L^3 + 3(a + \Delta_{II})^3}{8C_fbh^3} \quad (3.4)$$

o que foi feito através do método iterativo da secante, implementado em folha de cálculo.

3.2 ENSAIOS DE FADIGA

Ensaaios ENF anteriores [Morais e Pereira, 2007; Pereira e Morais, 2008] do material usado neste trabalho apontaram para valores de G_{IIc} à volta de 800 J/m². Logo, para se ter garantia de haver propagação de fadiga com um número de ciclos relativamente curto, optou-se por impor um valor de G_{max} de 500 J/m², aproximadamente. Segundo a teoria das vigas corrigida

$$G_{II} = \frac{9P^2(a + \Delta_{II})^2}{16b^2E_1h^3} \quad (3.5)$$

e com as características dos provetes usados, verificou-se que tal correspondia a impor um deslocamento máximo $\delta_{max} = 2$ mm, aproximadamente. Por outro lado, para tentar evitar que o provete se deslocasse no dispositivo de ensaio, adotou-se um deslocamento mínimo $\delta_{min} = 0.85$ mm que correspondeu a $G_{min} \approx 100$ J/m². Ensaíram-se 3 provetes, dois deles à frequência de 1 Hz e um a 5 Hz.

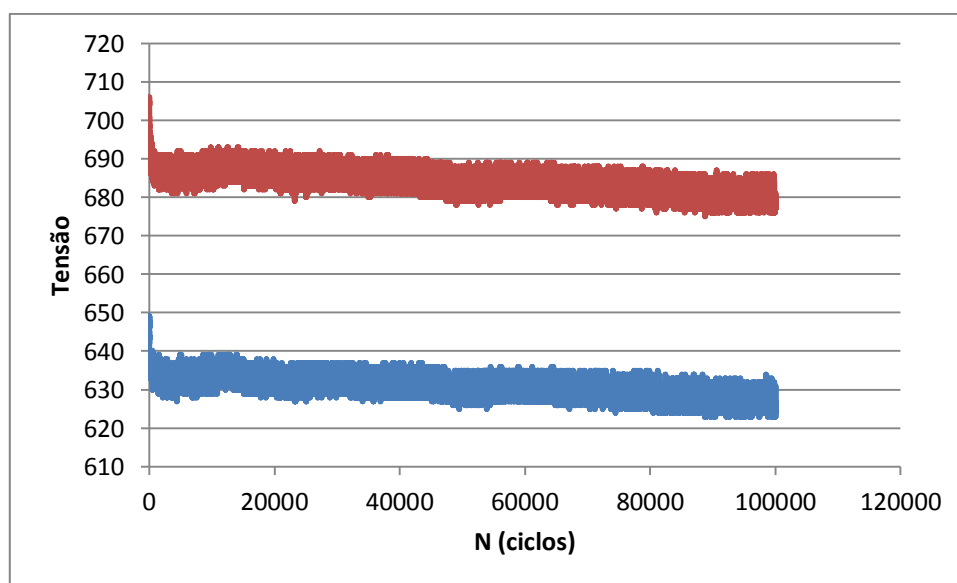


Figura 3.2 - Exemplo de resultados em bruto dos ensaios de fadiga com as tensões correspondentes às cargas mínima e máxima.

Os resultados em bruto de um ensaio de fadiga consistiram em dados tensões-número de ciclos contidos num ficheiro (figura 3.2). Face ao elevado número de valores (mais de 100000), os dados foram condensados fazendo médias locais de 50 pontos usando uma "Macro" desenvolvida no programa "Excel".

Posteriormente, as tensões foram convertidas em cargas e os resultados tratados tinham o aspeto gráfico típico da figura 3.3.

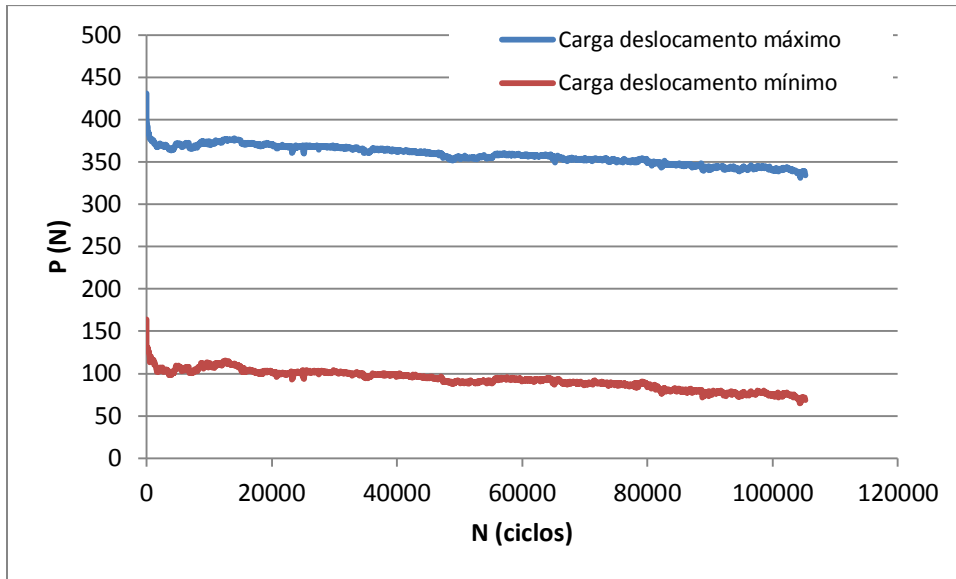


Figura 3.3 - Exemplo de resultados tratados.

No passo seguinte, aplicou-se o método da fenda efetiva [Morais e Pereira, 2007] para obter o comprimento da fenda

$$a_e = \sqrt[3]{\frac{8E_1bh^3C_f - 2L^3}{3}} \quad (3.6)$$

bem como

$$G_{II} = \frac{9P^2a_e^2}{16b^2E_1h^3} \quad 3.7$$

para as cargas P mínima e máxima registadas ao longo dos vários ciclos de carregamento.

Os resultados revelaram uma propagação muito rápida nos primeiros ciclos de carga (figura 3.4 e figura 3.5). Pensou-se que reduzir a frequência poderia evitar este fenómeno, mas tal não sucedeu. A propagação inicial rápida deveu-se provavelmente ao filme desmoldante usado para criar a delaminação inicial.

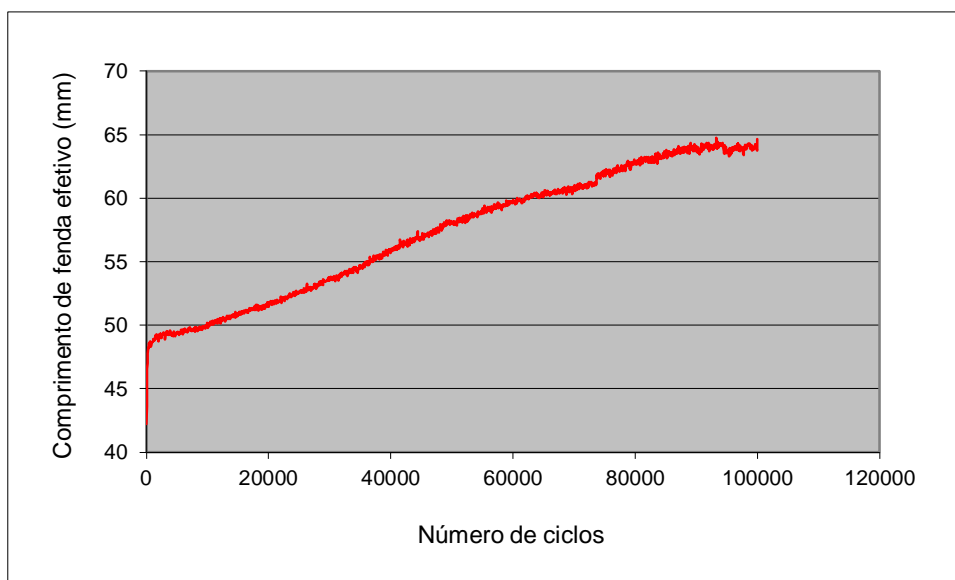


Figura 3.4 - Comprimento da fenda em função do número de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 5 Hz.

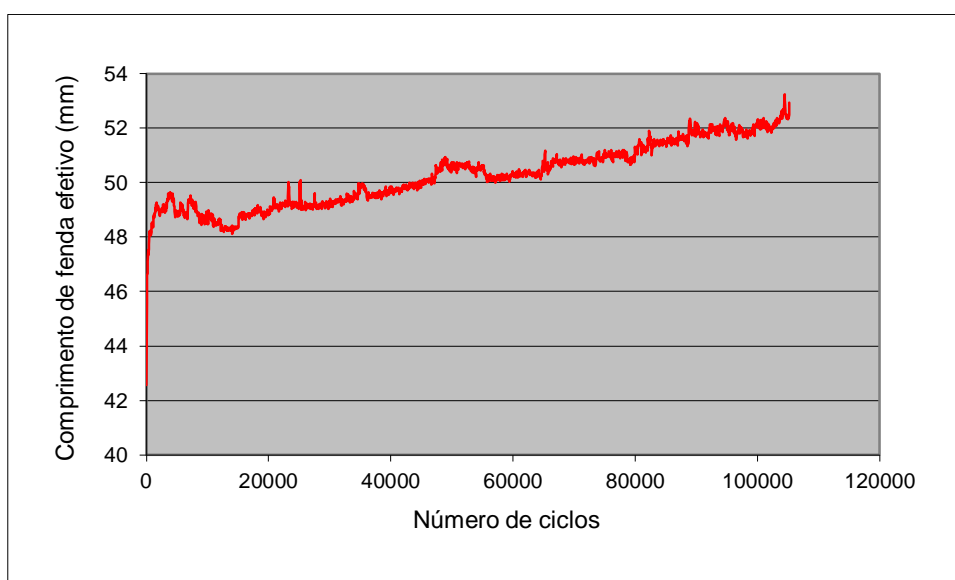


Figura 3.5 - Comprimento da fenda em função do número de ciclos para um provete ensaiado frequência de 1 Hz.

A análise dos dados das figura 3.4 e figura 3.5 mostrou que houve uma gama significativa de ciclos em que a taxa de propagação foi aproximadamente constante, como se pode verificar nas figura 3.6 e figura 3.7.

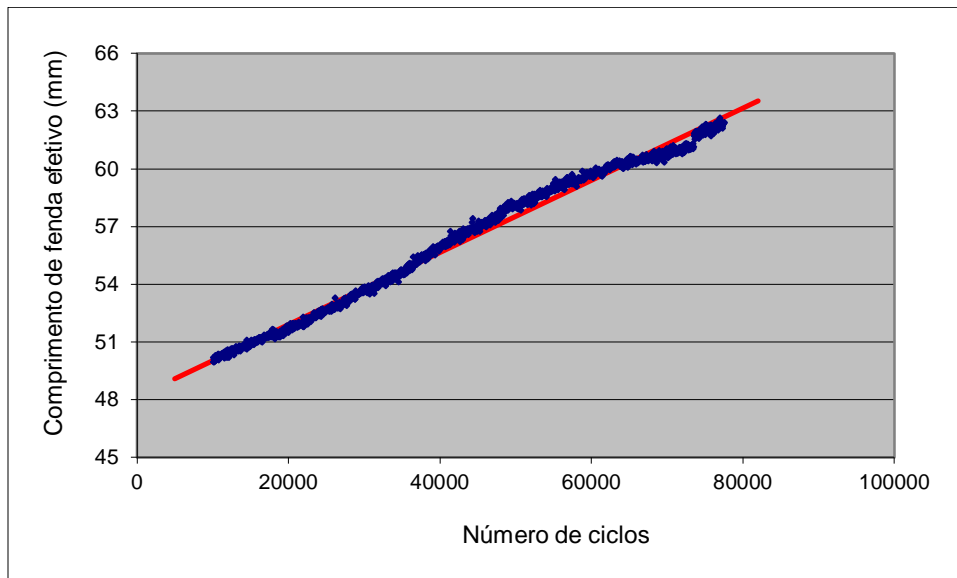


Figura 3.6 - Evolução do comprimento da fenda numa gama de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 5 Hz: resultados experimentais e reta de ajuste.

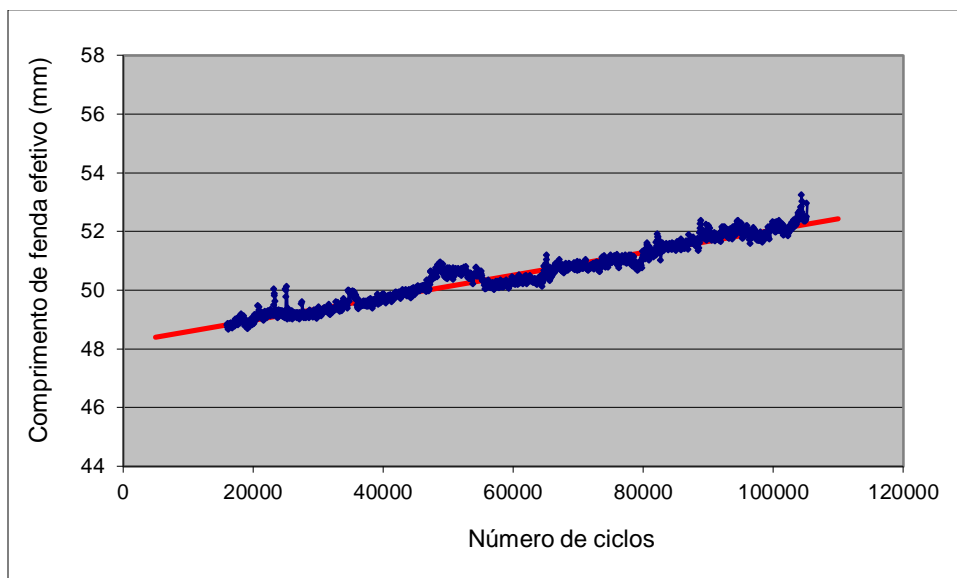


Figura 3.7 - Evolução do comprimento da fenda numa gama de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 1 Hz: resultados experimentais e reta de ajuste.

De forma a relacionar estes resultados com a Lei de Paris (equações 1.2 e 1.3) construíram-se os gráficos das figura 3.8 e figura 3.9, que mostram que G_{max} diminui durante os ensaios, mas que $\Delta G = G_{max} - G_{min}$ se manteve aproximadamente constante, sobretudo no ensaio a 1 Hz.

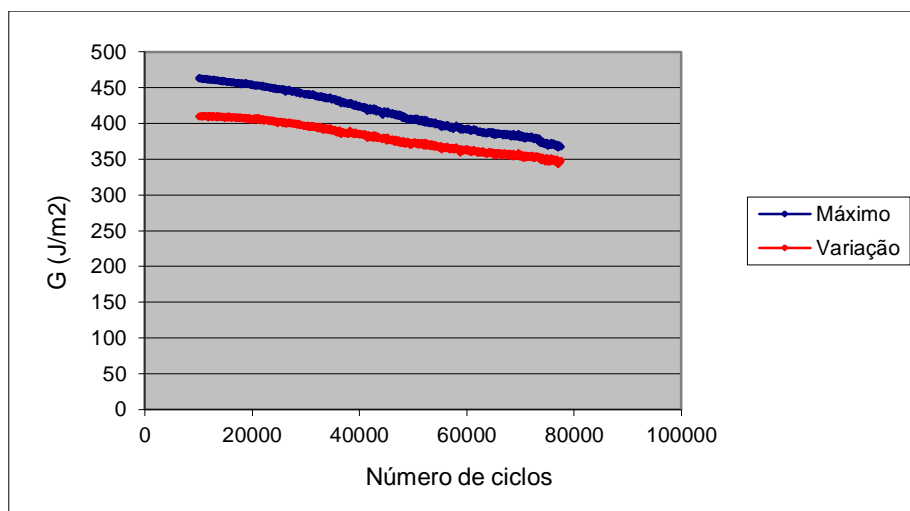


Figura 3.8 - Evolução de G_{max} e ΔG numa gama de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 5 Hz.

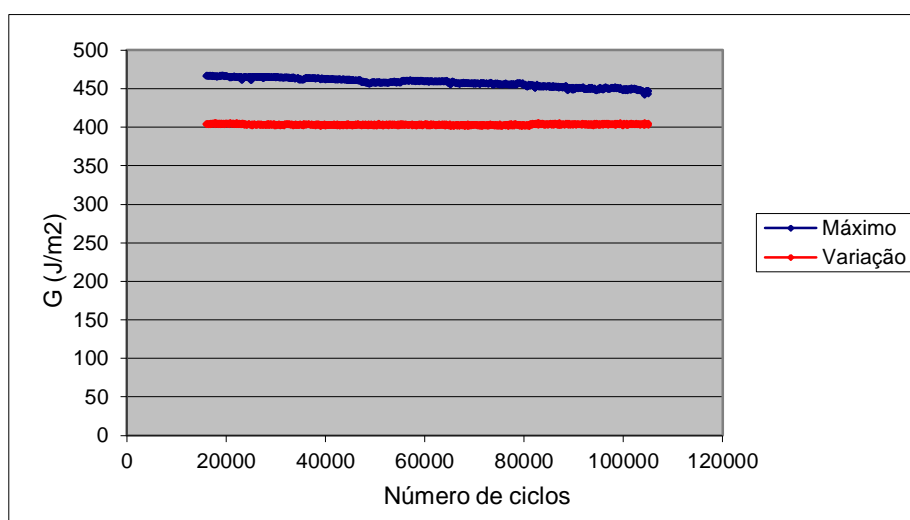


Figura 3.9 - Evolução de G_{max} e ΔG numa gama de ciclos para um provete ensaiado à frequência de 1 Hz.

Logo, estes resultados parecem estar de acordo com a Lei de Paris na forma da equação (1.2). Porém, seria necessário realizar mais ensaios com diferentes deslocamentos máximo e mínimo para obter os parâmetros A e m .



Capítulo 4

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizado para finalizar a máquina de ensaios à fadiga atingiu os objetivos principais inicialmente propostos, isto é,

- Tornar a máquina operacional;
- Validar o bom funcionamento da máquina mediante ensaios de delaminação sob fadiga em modo II.

As intervenções na componente mecânica e elétrica parecem ser satisfatórias, embora se deva assinalar algumas dificuldades em resolver os problemas de ruído nos dados recolhidos. A solução passou por recorrer à filtragem do sinal e à melhoria das ligações à terra. Na realidade, o ruído foi agravado por se ter trabalhado numa gama relativamente estreita da capacidade da célula de carga. Daí que se possa propor desde já as seguintes alterações para trabalhos futuros:

- Usar uma célula de carga de menor capacidade e portanto de maior resolução;
- Recorrer a outra fonte de alimentação.

Será também importante substituir as porcas da plataforma móvel às quais os fusos transmitem movimento, uma vez que a plataforma apresenta ligeiras oscilações.

Relativamente aos ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) em fadiga, o número escasso de provetes ensaiados permite apenas concluir que os resultados obtidos são realistas, parecendo mesmo ser consistentes com a bem conhecida Lei de Paris que relaciona a taxa de propagação de fenda com a variação da taxa crítica de libertação de energia. Todavia, é necessário um extenso programa de ensaios para caracterizar o comportamento do material à fadiga em modo II, esclarecendo questões como:

-
- A influência do tipo de pré-fenda nos resultados, pois o trabalho presente pareceu indiciar problemas com filme desmoldante;
 - A existência de eventuais deslocamentos horizontais do provete durante os ensaios;
 - A influência da frequência a que é realizado o ensaio;
 - A obtenção dos parâmetros A e m da Lei de Paris.

Podem ainda ser construídos dispositivos que permitam ensaios de modo I *Double Cantilever Beam* (DCB) e de modo-misto *Mixed-Mode Bending* (MMB).

REFERÊNCIAS

- [Arduino, 2012] Arduino, <http://www.arduino.cc/> Acedido em 2012.
- [Argüelles e outros, 2010] A. Argüelles, J. Vinã, A. F. Canteli, J. Bonhomme, Fatigue delamination, initiation, and growth, under mode I and mode II of fracture in a carbon-fiber epoxy composite, *Polymer Composites*, 31: 700-706, 2010.
- [ASTM D5528, 2001] ASTM D5528 – 01(2007)e3. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. West Conshohocken (PA): ASTM International.
- [ASTM D6671, 2006] ASTM D6671 / D6671M - 06 Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites. West Conshohocken (PA): ASTM International.
- [ASTM WK22949, 2011] Standard test method for determination of the mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites using the End-Notched Flexure (ENF) test. West Conshohocken (PA): ASTM International 2011.
- [Beghini e outros, 2006] M. Beghini, L. Bertini, P. Forte, Experimental investigation on the influence of crack front to fiber orientation on fatigue delamination growth rate under mode II, *Composites Science and Technology*, 66: 240-247, 2006.
- [Blanco e outros, 2004] N. Blanco, E. K. Gamstedt, L. E. Asp, J. Costa, Mixed-mode delamination growth in carbon-fibre composite laminates under cyclic loading, *International Journal of Solids and Structures*, 41: 4219-4235, 2004.
- [Brunner e outros, 2008] A. J. Brunner, B. R. K. Blackman, P. Davis, A status report on delamination resistance testing of polymer-matrix composites, *Engineering Fracture Mechanics*, 75: 2779-2794, 2008.
- [Brunner e outros, 2012] A. J. Brunner, S. Stelzer, G. Pinter, G. P. Terrasi, Mode II fatigue delamination resistance of advanced fiber-reinforced polymer-matrix laminates: Towards the development of a standardized test procedure, 2012.
- [BSJD, 2012] Shenzhen Baishan Mechatronics Co., Ltd. <http://www.bsjd.com> . Acedido em Janeiro 2012.
- [Bureau e outros, 2002] M. N. Bureau, F. Perrin, J. Denault, J. I. Dickson, Interlaminar fatigue crack propagation in continuous glass fiber/polypropylene composites, *International Journal of Fatigue*, 24: 99-108, 2002.

-
- [Chung, 2010] D. L. Chung. Composite Materials: Science and Applications. Springer-Verlag, New York, Second edition, 2010.
- [Datasheet INA 125, 2012],
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/ina125.pdf>, Acedido em Fevereiro de 2012.
- [Davies e outros, 1998] P. Davies, B. R. K. Blackman, and A. J. Brunner, Standard test methods for delamination resistance of composite materials: current status, Applied Composite Materials, 5:345-364, 1998.
- [Digi-Key, 2012] Digi-Key Corporation: Electronic components distributor, <http://www.digikey.com>. Acedido em Fevereiro de 2012.
- [Gibson, 2007] R. F. Gibson, Principals of composite material mechanics. CRC Press, 2007.
- [Guadagnini e outros, 2011] P. H. Guadagnini, F. S. da Rocha, V. E. Barlette, Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força, Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol 5, No. 4, 753-762, 2011.
- [Hambley, 2010] A. R. Hambley, Electrical Engineering: principles and applications (5th edition), Prentice Hall, 2010.
- [Hojo e outros, 2006] M. Hojo, S. Matsuba, M. Tanaka, S. Ochiai, A. Murakami, Mode I delamination fatigue properties of interlayer-toughened CF/epoxy laminates, Composites Science and Technology, 66: 665-675, 2006.
- [Hughes, 2006] Austin Hughes, Electric Motors and Drives: fundamentals, types and applications (3rd edition), Newnes, 2006.
- [ISO 15024, 2001] ISO 15024:2001. Fibre-reinforced plastic composites – determination of mode I interlaminar fracture toughness, G_{Ic} , for unidirectionally reinforced materials. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [Júnior, 2006] G. C. N. Júnior, Máquina Elétricas: teoria e ensaios (4^a edição), Editora Érica, 2011.
- [Kaw, 1997] Autar K. Kaw, Mechanics of Composite Material, second edition, CRC Press, 1997.
- [Kenane e Benzeggagh, 1997] Mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites under fatigue loading, Composites Science and Technology, 57: 597-605, 1997.
- [Matsubara e outros, 2006] Go Matsubara, Hideo Ono, Keisuke Tanaka, Mode II fatigue crack growth from delamination in unidirectional tape and satin-woven fabric laminates of high strength GFRP, International Journal of Fatigue, 28: 1177-1186, 2006.

- [Morais e Pereira, 2007] A. B. de Morais, A. B. Pereira, Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy unidirectional laminates, *Composites Part A*, 38: 785-794, 2007.
- [Morais, 2011] A. B. de Morais, Novel cohesive beam model for the End-Notched Flexure (ENF) specimen, *Engineering Fracture Mechanics*, 78: 3017-3029, 2011.
- [Morris, 2001] A. S. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles* (3rd edition), Butterworth Heinemann, 2001.
- [Moura e outros, 2005] M. Moura, A. Morais, A. Magalhães. *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. Publindústrias, 2005.
- [Pardini, 2000] L. C. Pardini. *Preformas para Compósitos Estruturais*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 10: 100-109, 2000.
- [Paris e outros, 2010] F. París, A. Blázquez, L. N. McCartney, A. Barroso, Characterization and evolution of matrix and interface related damage in $[0/90]_s$ laminates under tension. Part II: Experimental evidence, *Composites Science and Technology*, 70: 1176–1183, 2010.
- [Pereira e Morais, 2008] A. B. Pereira, A. B. de Morais. Mixed mode I + II interlaminar fracture of carbon/epoxy laminates. *Composites Part A*, 39: 322–333, 2008.
- [Rizzoni, 2004] G. Rizzoni, *Principals and Applications of Electrical Engineering* (4th edition), McGraw-Hill, 2004.
- [SHARP, 2012] Datasheet Sharp GP1S53VJ000F, <http://sharp-world.com>. Acedido em Janeiro de 2012.
- [Shindo e outros, 2009] Y. Shindo, T. Takeda, F. Narita, N. Saito, S. Watanabe, K. Sanada, Delamination growth mechanisms in woven glass fiber reinforced polymer composites under mode II fatigue loading at cryogenic temperatures, *Composites Science and Technology*, 69: 1904-1911, 2009.
- [Sinclair, 2001] I. A. Sinclair, *Sensors and Transducers* (3rd Edition), Newnes, 2001.
- [TML, 2012] Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., *Strain Gauges*, <http://www.tml.jp>, Acedido em Junho de 2012.
- [TU Delft, 2012] Delft University of Technology: TU delft <http://www.lr.tudelft.nl/index.php?id=26757&langen#delamination>. Acedido em: Março de 2012.



Capítulo 5

ANEXOS

Anexo A - Máquina de ensaios à fadiga

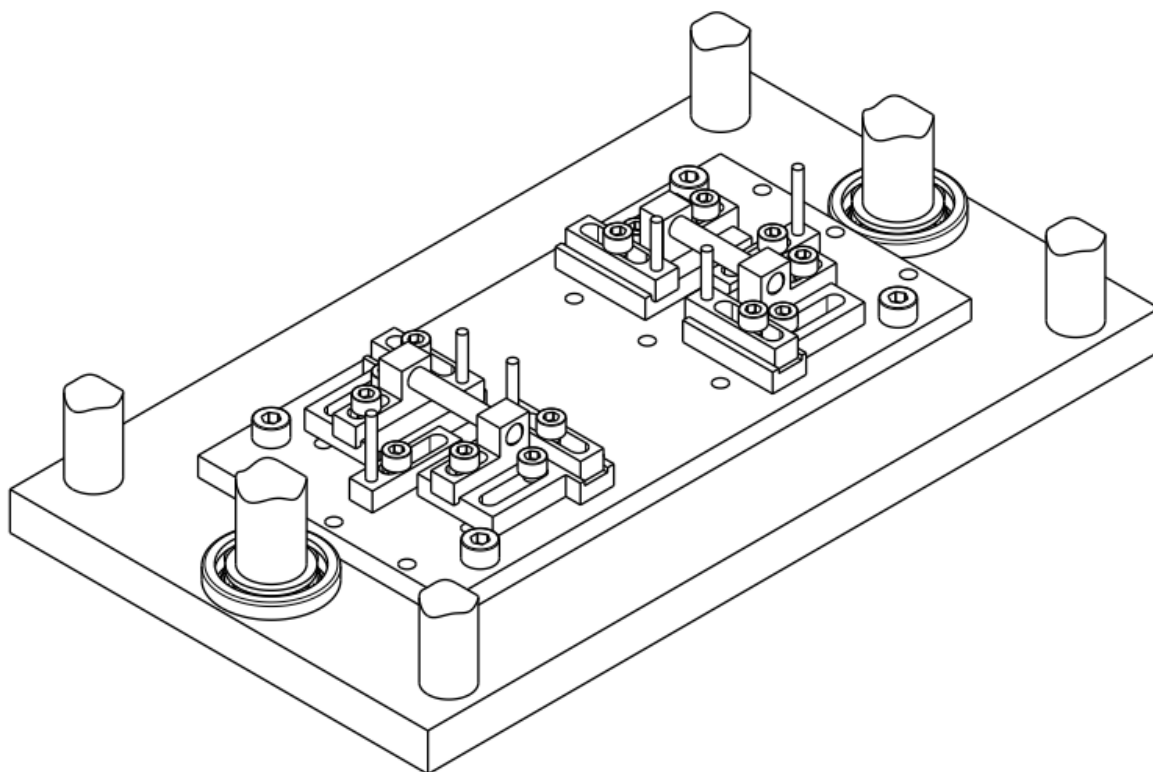
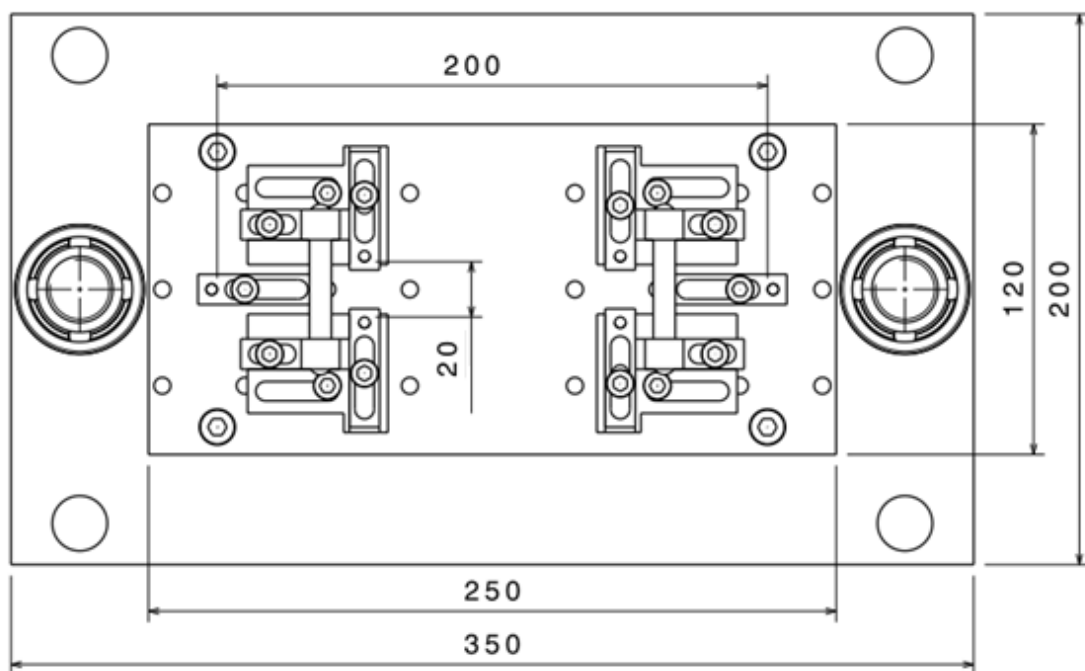
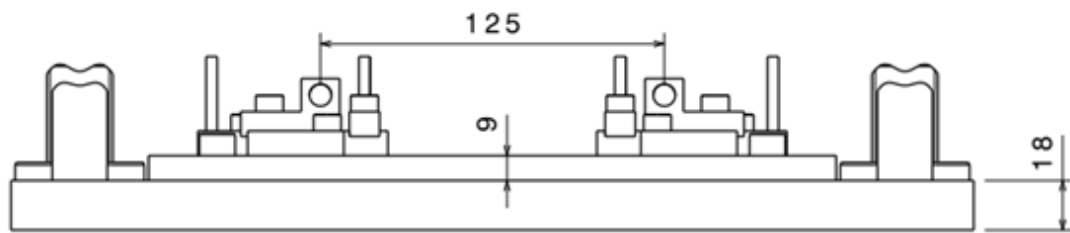


Figura 5.1 - Zona de fixação do provete, vista isométrica.



Escala 1:2

Figura 5.2 - Zona de fixação do provete, vista de cima e vista lateral.

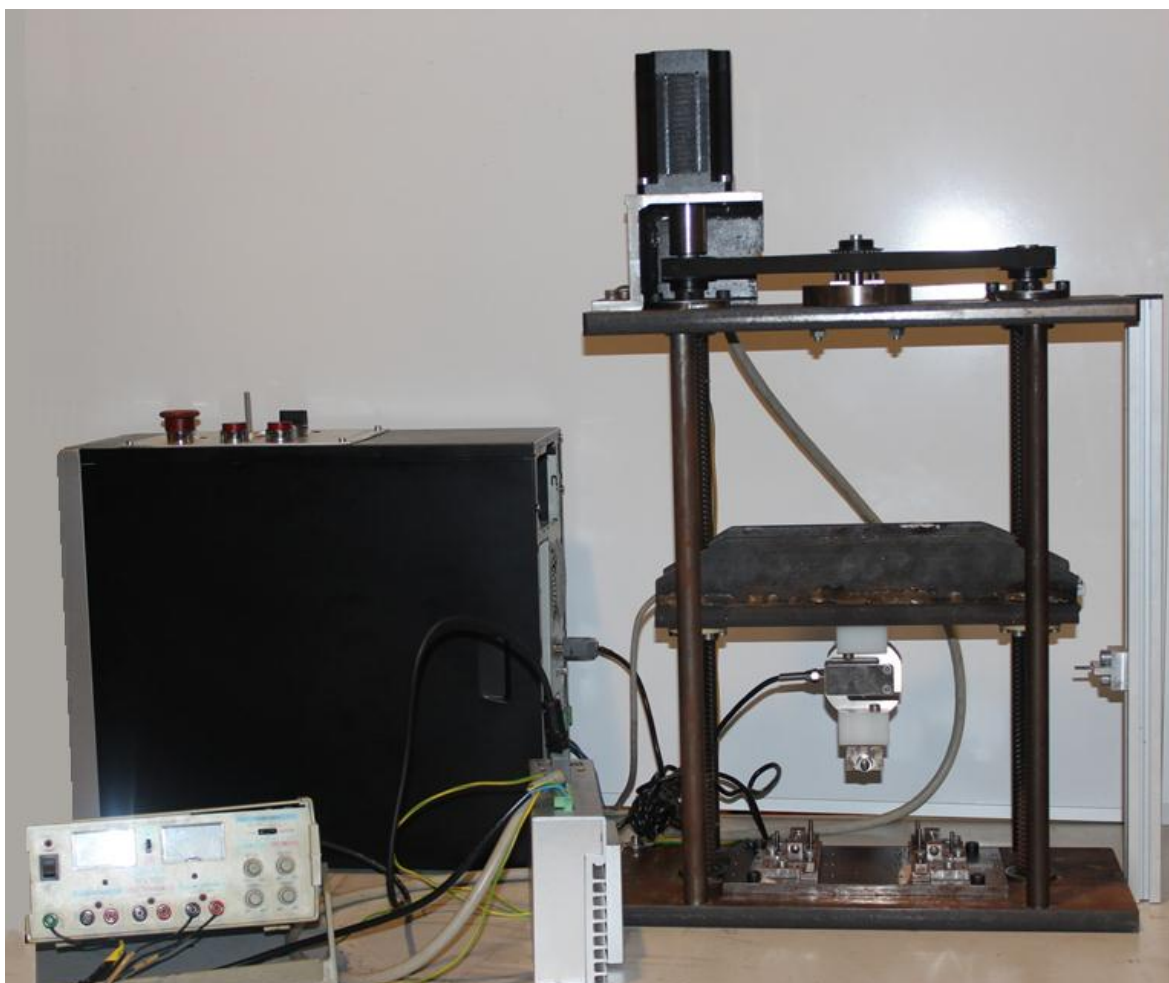
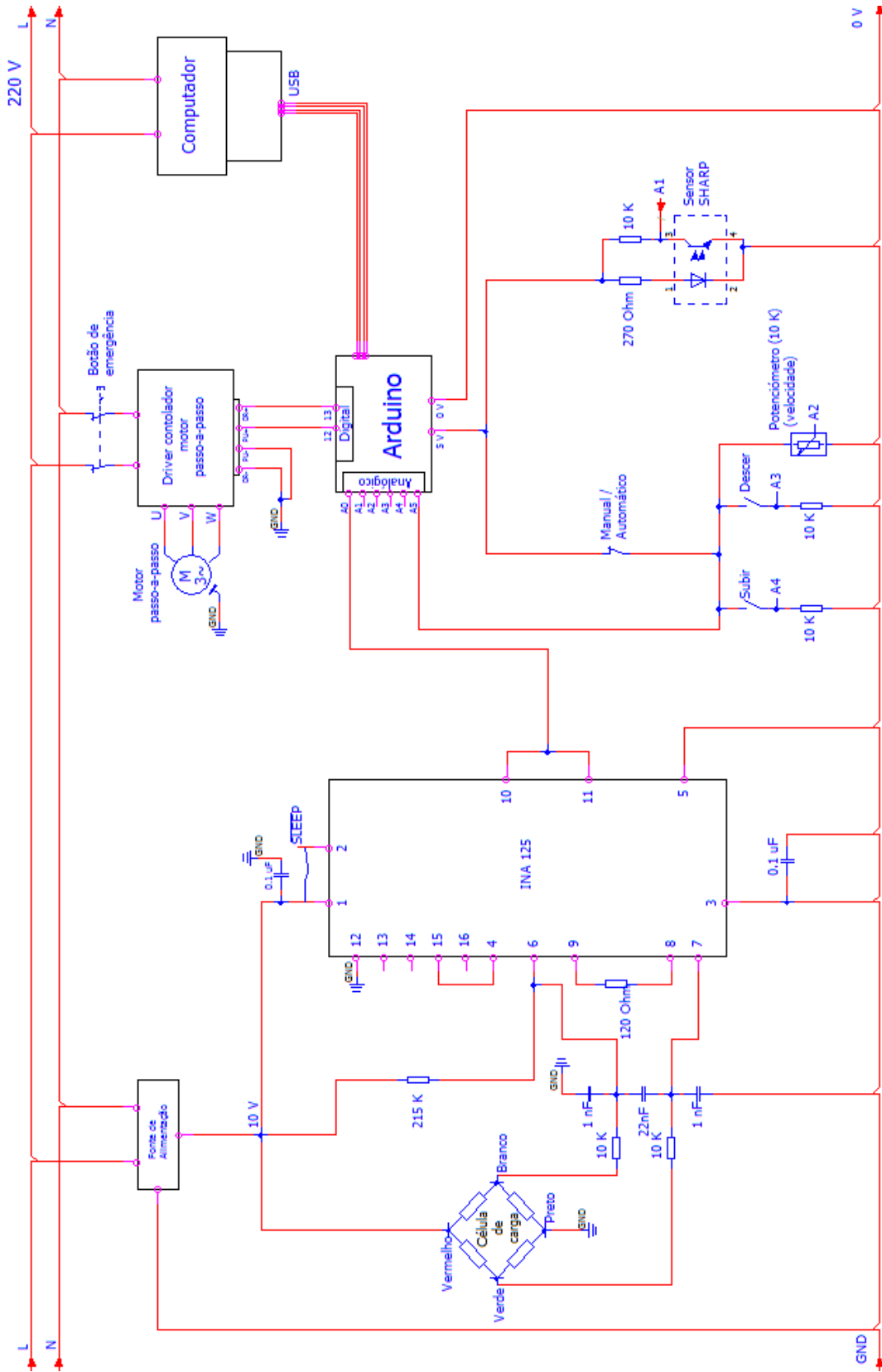


Figura 5.3 - Máquina de ensaios à fadiga.

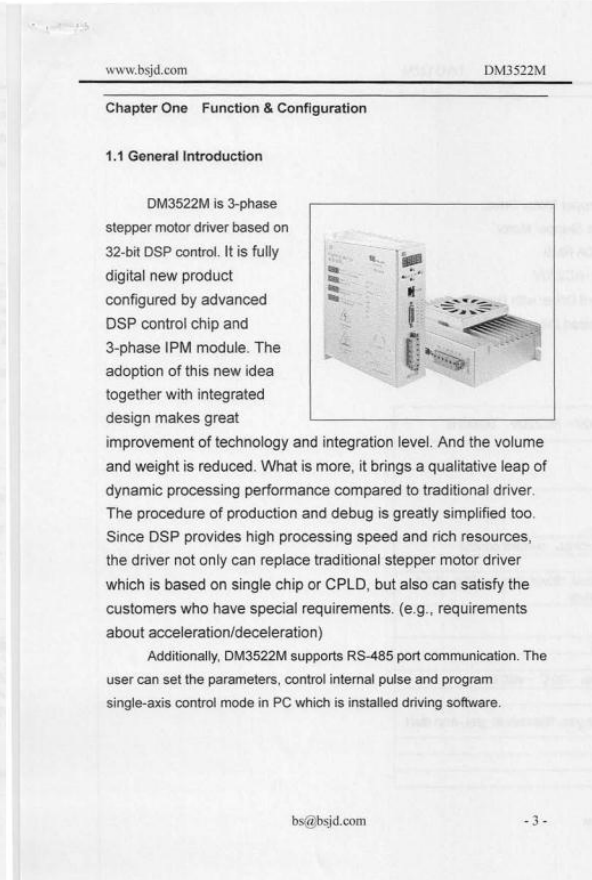
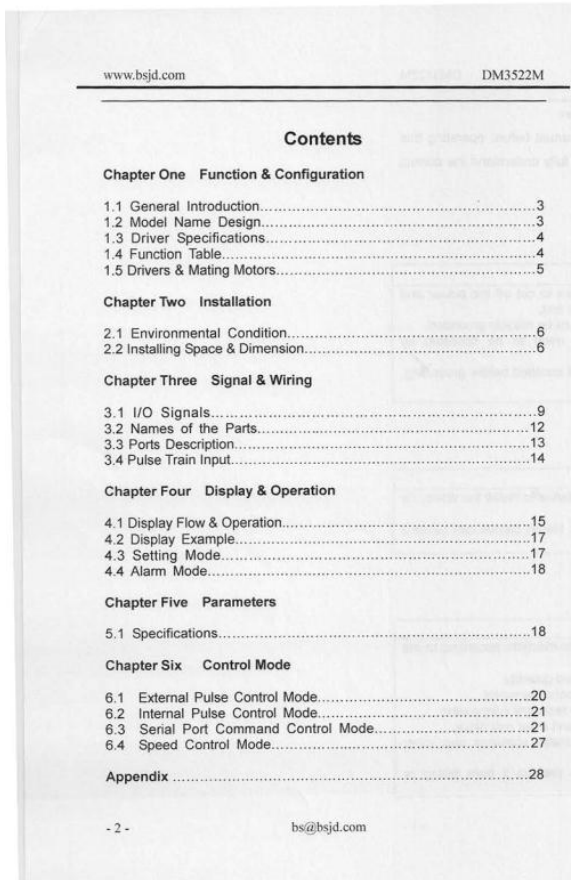
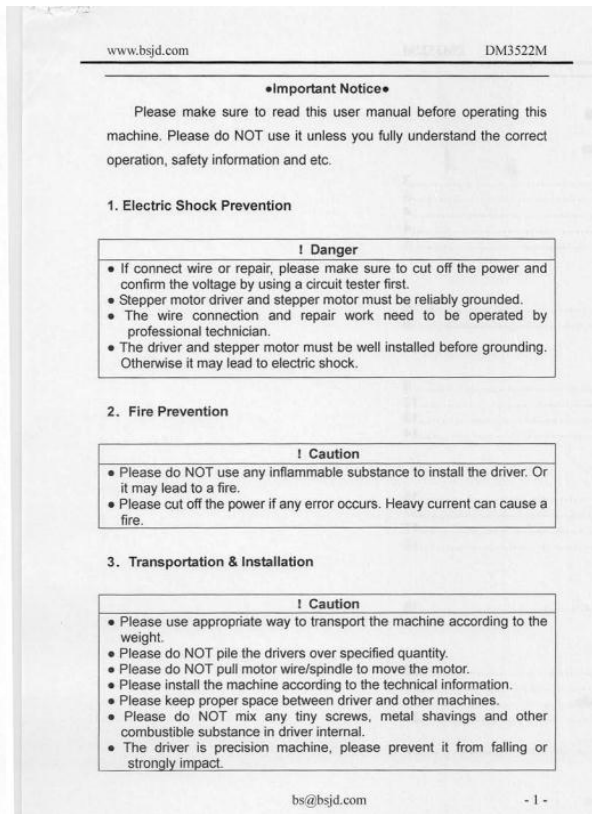
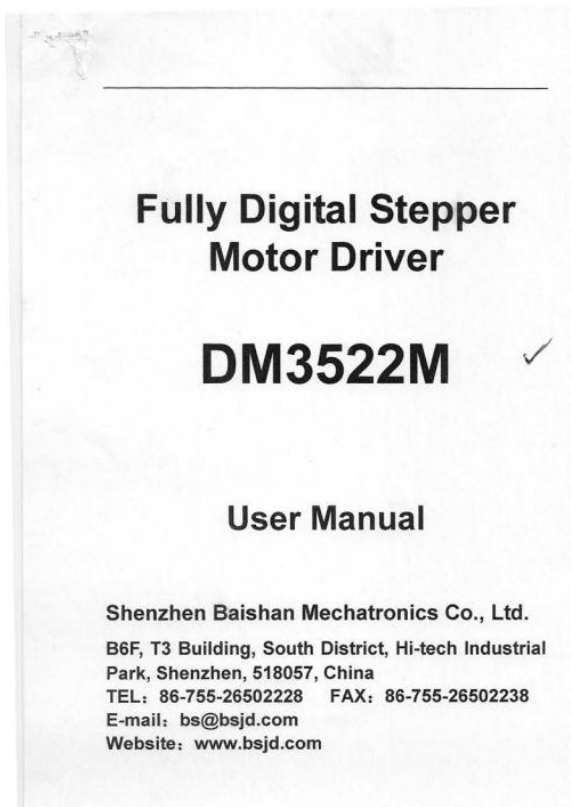
Anexo B – Esquema elétrico da MEF



Anexo C – Especificações técnicas da célula de carga

Modle	ST-7	
Capacity	1T	
Serial No	9050601	
Output	1.9995	mV/V
Zero	< 2	% of Full Seale
Creep (30min)	< 0.02	% of Full Seale
Non-linearity	< 0.02	% of Full Seale
Hysteresis	< 0.02	% of Full Seale
Repeataility	< 0.02	% of Full Seale
Temperature effect on Output	< 20	ppm/°C of Applied Load
Temperature effect on Zero	< 20	ppm/°C of Applied Load
Operating Temperature Range	-40°C to 80°C	
Compensated Temperature Range	-10°C to 40°C	
Safe overload	1.5xCapacity	
Input Impedance	385±3	ohms
Output Impedance	350±2	ohms
Insulation Resistance	>5000	Meg-ohme
Recommended Excitation	10VDC/AC	
Maximum Excitation	20VDC/AC	
Color code:		
Red	+Input	
Black	-Input	
Green	+Output	
White	-Output	

Anexo D – Manual *Driver* DM3522M



www.bsjd.com DM3522M

1.2 Model Name Design

DM Fully Digital Stepper Motor Driver
3 Mating 3-Phase Stepper Motor
5 Output: 1.2-5.0A RMS
22 Input : AC110~AC220V
X X=M: Standard Driver with Basic Function
 X=N: Customized Driver

1.3 Driver Specifications

Power Voltage, Frequency	Single-phase AC110V~AC220V, 50/60Hz
Power Allowable Fluctuation of Voltage	Within ±15%
Power Allowable Fluctuation of Frequency	Within ±5%
Control Mode	Sine Wave PWM control, current control
Dynamic Brake	Built-in
Protection Function	Over current, overload, driver overheating, short circuit between phases
Max Pulse Frequency Input	200Kpps
Micro Steps	Max 60000 pulse/R
Cooling Method	Air cooling
Temperature	0℃~+55℃ Storage: -20℃~+65℃
Humidity	Less than 90%RH
Surrounding Environment	Indoor, no corrosive gas, flammable gas, and dust
Above Sea Level	Less than 1000m
Vibration	5.0m/s ²
Weight	1.5Kg

- 4 - bs@bsjd.com

www.bsjd.com DM3522M

1.4 Function Table

The following is function table of stepping motor driver. Details please refer to each specific chapter.

Function	Note
Self-test function	Driver tests self status when powered up.
Micro steps change	High/low subdivision can be changed freely. (Refer to parameter BS02, BS03)
Command pulse choosing(single/double pulse)	Two pulse input methods for optional.
Change speed smoothly	Guarantee motor run smoothly when external pulse changes dramatically. (Refer to BS05)
Phase Memory Function	Automatically memorized motor phase if pulse stops 3 seconds.
Internal pulse control	No need to input any signal but directly use driver to run stepper motor.
Overload function	With overload function when start/stop the driver.
E-gear(Micro steps setting)	Pulse input can be reduced or enlarged X times.
Status display	Driver status can be shown on the LED display.
Alarm function	Give the alarm if driver or motor works abnormally.
PC communication	485 COM to PC or other drivers
Analog speed adjustment	Connect R to maintain motor running speed.
Speed mode	Set up any speed and enter start/stop switch value to control the motor.

1.5 Drivers & Mating Motors

The following chart is about driver and mating stepper motor model.

bs@bsjd.com - 5 -

www.bsjd.com DM3522M

Driver Model	Stepper Motor Model	Note
DM3522M	BSHB368-H, BSHB397-H, BSHB3910-H, BSHB3913-H, BSHB31112, BSHB31115, BSH31118, BSH31122, BSH31318, BSHB31322, BSH31325	Standard Driver
DM3522N	BSHB368-H, BSHB397-H, BSHB3910-H, BSHB3913-H, BSHB31112, BSHB31115, BSH31118, BSH31122, BSH31318, BSHB31322, BSH31325	Customized Driver

Chapter Two Installation

! Caution

- Please do NOT pile the drivers over the specified quantity.
- Please do NOT use any inflammables to install the driver, otherwise it may cause a fire.
- Please properly storage and use the driver under specified surrounding conditions.
- Please keep proper space between driver and other machines.
- Please do NOT mix any screws, metal shavings and other combustible substance in driver internal.
- The driver is precision machine, please prevent it from falling or strongly impact.

2.1 Environmental Condition

Environment	Condition
Temperature	0℃~+55℃(not frozen) storage: -20℃~+65℃(not frozen)
Humidity	Less than 90%RH(not coagulated)
Surrounding	Indoor (no sun) no corrosive gas, flammable gas, and dust
ASL	Above sea level less than1000m
Vibration	5.0m/ s ²

- 6 - bs@bsjd.com

www.bsjd.com DM3522M

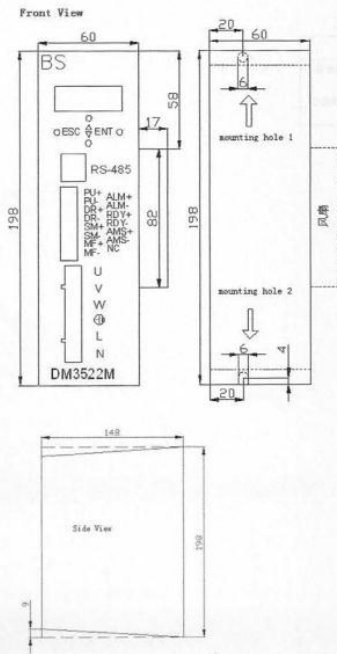
2.2 Installing Space & Dimension

! Caution

- Please comply with the instructions of installing direction. Otherwise it may cause fault.
- Please keep proper space between the drivers and inner wall of control cabinet. Otherwise it may cause fault.

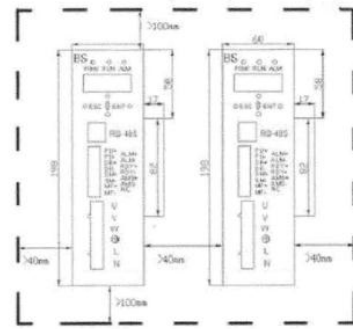
bs@bsjd.com - 7 -

(1) Installing Dimension (unit: mm)



(2) Notes for Placing Two Drivers (Unit: mm)

The users need to keep enough spaces between the driver and internal wall of control cabinet. And please install a fan to control the cabinet temperature under surrounding temperature.



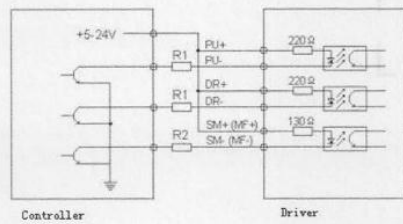
Chapter Three Signal & Wiring

3.1 I/O Signals

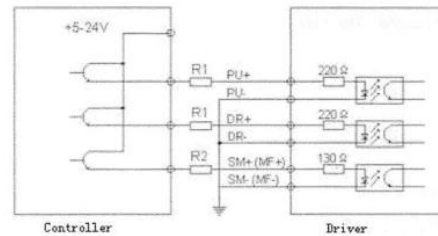
All input signals are optically isolated. To guarantee the reliable running of the built-in high-speed optocoupler, the driving current to control the signal is required to be 15mA at least. And the driver has been set in the optocoupler current limit resistor. When the input voltage is beyond 5V, please limit the current by connecting resistance R if necessary.

- Current-limiting Resistance Value:
 When controller/actuator signal outputs voltage:
 +5V: R1=0, R2=0
 +12V: R1=510Ω, R2=820Ω;
 +24V: R1=1.2KΩ, R2=1.8KΩ.

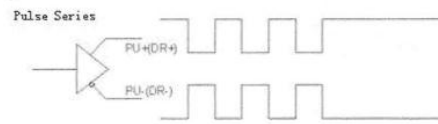
Common Anode Connection for Signal Input



Common Cathode Connection for Signal Input



Connection for Differential Signal Input



www.bsjd.com DM3522M

Signal Output

The driver outputs the signals through optocoupler. The max driving current can be 50mA.

RDY/ALM signals output

- 12 - bs@bsjd.com

www.bsjd.com DM3522M

3.2 Names of the Parts

RS45

DM3522M

bs@bsjd.com - 13 -

www.bsjd.com DM3522M

3.3 Ports Description

(1) CON1

Signal Name	Symbol	Pin No.	Function & Application
Pulse Input	PU+ PU-	CN1 1	For pulse train input. When BS04 chooses "pulse+direction" mode, it is for stepper pulse signal. If "CW/CCW rotating pulse" mode, it is for pulse signal of CW rotating. (The driving current is requested to be above 15mA.)
		CN1 2	
Direction Signal Input	DR+ DR-	CN1 3	When BS04 chooses "pulse+direction" mode, it is for direction signal. If "CW/CCW rotating pulse" mode, it is for pulse signal of negative rotating. (The driving current is requested to be above 15mA.)
		CN1 4	
Signal of Micro Steps Choosing	SM+ SM-	CN1 5	Choose the micro steps set by BS03 when input low level. Choose the micro steps set by BS02 when input high level.
		CN1 6	
Signal of Motor Free	MF+ MF-	CN1 7	It is valid when input low level. The driver cut off motor current and motor is in free state.
		CN1 8	
Signal of Fault	ALM+ ALM-	CN1 9	If driver occur failure or over current, overheating, overload, the signal input is valid. (low level) The max output current is 50mA.
		CN1 10	
Ready Signal Output	RDY+ RDY-	CN1 11	After driver is powered up, it will finish self-test. RDY is valid when the driver works normally and able to receive external signals. The max output current is 50mA.
		CN1 12	
Speed Adjusting Terminal	AMS+ AMS-	CN1 13 CN1 14	Input external analog to adjust motor running speed.
Useless Port	NC	CN1 15	NC

- 14 - bs@bsjd.com

www.bsjd.com DM3522M

(2) RS-485

Signal Name	Symbol	Pin No.	Applications
485 port	485-	CN2 1	B phase signal input
485 port	485+	CN2 2	A phase signal input
Internal power 5V	5V	CN2 7	Internal working power, please do NOT connect it in other ways.
Internal ground	GND	CN2 8	Internal power ground. To guarantee the reliable communication of port, the users can connect the port together with that of other drivers to the ground.
NC	N		3, 4, 5, 6, 7 are special leads. NC.

lanja e ban
lanja
preto

3.4 Pulse Train Input

There are two ways to input pulse train. Command pulse train can be set by parameter BS04.

Pulse Train Type		BS04	
Negative Logic	CW/CCW Rotating Pulse	PU	0000
	Pulse+Direction	PU	0001
Positive Logic	CW/CCW Rotating Pulse	PU	0002
	Pulse+Direction	PU	0003

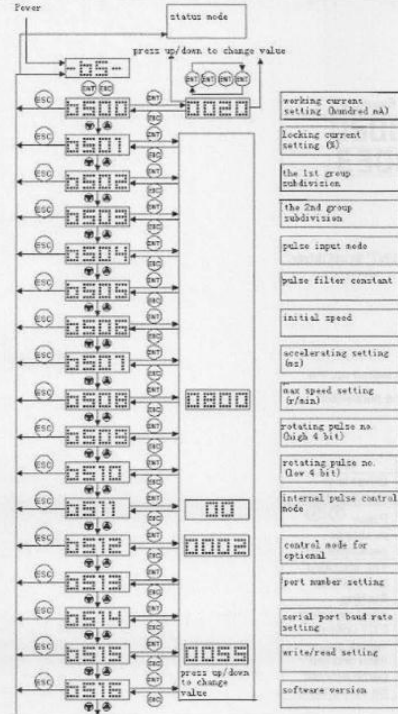
bs@bsjd.com - 15 -

Chapter Four Display & Operation

4.1 Display Flow & Operation

Status and parameters can be set via the LED display and four buttons. (Note: Please long press "ENT" for 3 seconds after entering parameter setting menu.)

After the driver is power up, please long press "ENT" for 3 seconds first, and then press to display the next. Details as below:



4.2 Display Example

Here is an example for reference.

Items	Status	Example
Motor running current	2.0A	0020
Subdivision Setting	10000 pulse/R	10E3

4.3 Setting Mode

When the driver is in standby state, please press "ENT" to set driver parameters.

(1) Operation Method

Take the following as example, after the driver is powered up, the current is adjusted from 2A to 2.8A via BS00. Display the parameter setting menu by pressing ENT button.

Steps	Operation	Display	Note
1	Power up the driver		Driver is in standby status.
2	Long press ENT for 3secs to display parameter no.		Press to change parameter no.
3	Press ENT again and display parameter content.		The specified value will be flashing.
4	Press button to increase the value until 0028		Keep pressing ENT until all values stop flash and the parameter will be saved then.

5	Press ESC to exit the setting mode.		Driver is in standby state again.
---	-------------------------------------	--	-----------------------------------

4.4 Alarm Mode

The fault signal is sent via LED indicator. If any error occurs, the LED indicator will display alarm information. And it will not disappear even after repowered up. The motor is in power-off state and driver will not accept any command.

Display	Content	Solution
AL01	No motor connected or motor fault occurs.	To check motor connection and see if motor works normally.
AL02	Driver is over heating (above 75 degrees)	Cut off the power to help driver down to ordinary temperature.
AL03	Over current	Cut off the power and check if motor is short-circuited.
AL04	Module protection	Cut off the power and check if motor is short-circuited.

Chapter Five Parameters

5.1 Specifications

(1) Basic Parameter Table

NO.	Symbolic NO.	Name & Function	Initial value setting	unit	Set range
0	BS00	To set motor running current	0030	hundred mA	0010-0070
1	BS01	To set motor locking current.	50% of the working current	%	0%-100%
2	BS02	The 1st group micro steps. Please choose this group	2000	Pulse/R	400-60E3

www.bsjd.com DM3522M

		when SM signal input is in high level.. 20E3 means $20 \times 10^3 = 20000$ pulse/R			
3	BS03	The 2 nd group micro steps. Please choose this group when SM signal input is in low level.. 4000 means 4000 pulse/R	4000	Pulse/R	400-60 E3
4	BS04	Pulse input mode. To choose waveform of pulse train input. 0000: CW/CCW rotating pulse control mode, it is valid on the trailing edge.. 0001: pulse and direction control mode, it is valid on the trailing edge.. 0002: CW/CCW rotating pulse control mode, it is valid on the rising edge. 0003: pulse and direction control mode, it is valid on the rising edge.	0001		0000-0 003
5	BS05	Driver pulse filter constant. The smoothing effect upon external pulse is stronger if the value is set bigger. And the high-speed function is also better. However,	3		0-6

- 20 - bs@bsjd.com

www.bsjd.com DM3522M

		the driver response time is longer too. If PC gives opposite direction with previous instruction, please delay BS05 setting time and then give opposite direction instruction. When the value is 0, there is no smoothing function.			
6	BS06	The initial speed of internal pulse control/serial ports control/speed control mode. The value must be less or equal to the value of BS08.	50	R/min	10-200
7	BS07	The accelerating speed of internal pulse control/serial ports control/speed control mode.	150	ms	20-200 0
8	BS08	The max speed of internal pulse control/serial ports control/speed control mode.	100	R/min	10-300 0
9	BS09	The rotating pulse count of internal pulse control mode. Please set the four high bit.	2000		1-9999
10	BS10	The rotating pulse count of internal pulse control. Please set low four bit.	0000		1-9999
11	BS11	Internal pulse	00		

bs@bsjd.com - 21 -

www.bsjd.com DM3522M

		control status.. Using up and down to CW/CCW rotate.			
12	BS12	Parameter range reference: 0000: External pulse input mode 0001: Internal pulse control mode 0002: serial port control mode 0003: speed control mode	0000		0000-0 003
13	BS13	Port setting 0001. No.1 port	1		1-32
14	BS14	Serial port baud rate setting 48: 4800 96:9600 192:19200 384:38400 560:56000 576:57600 1152:115200 2304:230400	192	Hundred b/s	48 96 192 384 560 576 1152 2304
15	BS15	read/write setting 0055: BS00-BS15 readable, writable; Other value: BS00-BS14 only readable, BS15 writable	55		0-90
16	BS16	Microsoft version 3A00			

Chapter Six Control Mode

6.1 External Pulse Control Mode

- 22 - bs@bsjd.com

www.bsjd.com DM3522M

When parameter (BS12) is set 0000, the driver is in the state of receiving external pulse mode. The users need to pay attention to the following parameters setting under this mode.

- BS02: The 1st group micro steps. Please choose this group when SM input signal is high. 10E3 means $10 \times 10^3 = 10000$ pulse/R.
- BS03: The 2nd group micro steps. Please choose this group when SM input signal is low.
- BS04: To choose the waveform of pulse train input. 0000: CW/CCW rotating pulse control mode, it is valid on the trailing edge of the pulse. 0001: Pulse+direction control mode, it is valid on the trailing edge of the pulse. 0002: CW/CCW rotating pulse control mode, it is valid on the rising edge of pulse. 0003: Pulse+direction control mode, it is valid on the rising edge of the pulse.
- BS05: Driver filter constant. If the value is larger, the smoothing function upon external pulse will be the stronger. And the high speed performance will be better as well. However, the response time of driver will be longer. When PC sends out the command of opposite rotating direction with previous one, the users need to delay the time set via BS05 and then give opposite motion command.

6.2 Internal Pulse Control Mode

When parameter (BS12) is set 0001, the driver is in the state of internal pulse control mode. Please pay attention to the following parameter setting under this state.

bs@bsjd.com - 23 -

1. BS02: The 1st group micro steps. Please choose this group when SM input signal is in high level. 10E3 means $10 \times 10^3 = 10000$ pulse/R.
2. BS03: The 2nd group micro steps. Please choose this group when SM input signal is in low level
3. BS06: The initial speed of internal pulse control, which must be less or equal to the value set via BS08.
4. BS07: The accelerating time (ms) of internal pulse control
5. BS08: The max speed of internal pulse control.
6. BS09: The rotating pulse number of internal pulse control (high 4 bit)
7. BS10: The rotating pulse number of internal pulse control (low 4 bit)
8. BS11: The status of internal pulse control. Press UP/DOWN to do positive/negative rotation. ←

6.3 Serial Port Command Control Mode

The driver supports RS485 COM port. (RTU Protocol) All basic and extended parameters can be directly written or read through the port. All information transmitted or received must be in the unit of 8 bytes. After each write operation, the driver will return the data sent by the master if they are received normally. Likewise, after each read operation, data will be sent back also.

Communication Rules: When communication command is transmitted to the driver, the matching port number will receive the command, read the information, run the task and finally send back the result. The returning information includes port number, function code, result data and error code. If any error occurs, there is no information.

The format of information frame comes as below:

Port No.	Func tion Code	Write/ Read Add.	Write/ Read Add.	Data	Data	Error Code	Error Code
8 bit (1 byte)	8 bit(1 byte)	High 8 bit Add.(1byte)	Low 8 bit Add.(1byte)	High 8 bit data(1 byte)	Low 8 bit data(1 byte)	High 8 bit check code(1 byte)	Low 8 bit check code(1 byte)

Port No.: Port number is the 1st byte of information frame, from 0-255. This byte indicates that the slave set by the user can receive information sent from master. Each slave has only one port number. And only the slave which matches the port number can response and return the information. When the information is sent back, the port number will state from which slave it comes.

Function Code: The function code sent by master is to instruct what task the slave needs to run.

Code	Content & Operation
03	Read data, to read the value under the appointed address.
06	Write data, to write the data to the appointed address.

Write/Read Add: The master writes/reads the driver address. Details are as the addresses listed in 6.2.

Data (read parameter data):

Function code 03: Master reads the data from driver.

Function code 06: Master writes the data to driver.

6.3.1 Basic Parameters (Writable/Readable)

NO.	Add. (1 byte)	Unit	Note(3 byte data)	Setting Range (decimal) Other value is invalid.
0	0x00	100mA	Current setting (unit: mA). Example: 2.3A, the written value is 0x17.	0x0-0x50 (0-80)
1	0x01	%	Set locking current.	0x0-0x64 (0-100)
2	0x02	Pulse/ R	Micro steps: 0x0-400 pulse/R; 0x1-500 pulse/R 0x2-600 pulse/R; 0x3-800 pulse/R 0x4-1000 pulse/R; 0x5-1200 pulse/R 0x6-2000 pulse/R; 0x7-3000 pulse/R 0x8-4000 pulse/R; 0x9-5000 pulse/R 0x10-6000 pulse/R; 0x11-10000 pulse/R 0x12-12000 pulse/R; 0x13-20000 pulse/R 0x14-30000 pulse/R; 0x15-60000 pulse/R	0x0-0x15
3	0x04		Pulse input mode. Used to choose waveform of pulse train input signal. 0000: positive/negative rotating pulse control mode, valid on the trailing edge. 0001: pulse+direction control mode, valid on the trailing edge. 0002: positive/negative rotating pulse control mode, valid on the raising edge. 0003: pulse+direction control mode, valid on the raising edge.	0x0000-0x0001
4	0x06	R/Min	Starting up speed	0x00-0xC8 (0-200)
5	0x07	ms	Accelerating time	0x14-0x7D0 (20-2000)
6	0x08	R/Min	Max speed	0x10-0xBB8 (10-3000)
7	0x09	Pulse	High 4 bit pulse count	0x1-0xFFFF (1-65536)
8	0x0A	Pulse	Low 4 bit pulse count	0x1-0xFFFF (1-65536)
9	0x50		Star/stop command written into the address.	0x55 0xAA

			If written into 0x055, motor runs in positive direction according to the parameter set by 0x6-0xA. If 0x155, motor will run in opposite direction according to the parameter set by 0x5-0x7. When written into 0xAA, motor gradually slows down and finally stops. If 0xCC, motor stops immediately.	0xCC
10	0x23		Read 0x23, when the return value is 0x55, the motor is working, but if 0xAA, the motor stops working.	

6.3.2 Program Example

The driver can only be applied as slave. Before communication, the driver is set in serial port mode. The baud rate of host and slave needs to be set the same. When program, please make sure that port parameter of master complies with the requirements of MODBUS protocol.

Note: All following examples are based on port no. 1.

- 1) Set the driver current to be 2.3A by serial port communication.

Master->Slave data: 01 06 0000 0017 C9C4

Slave->Master data: 01 06 0000 0017 C9C4

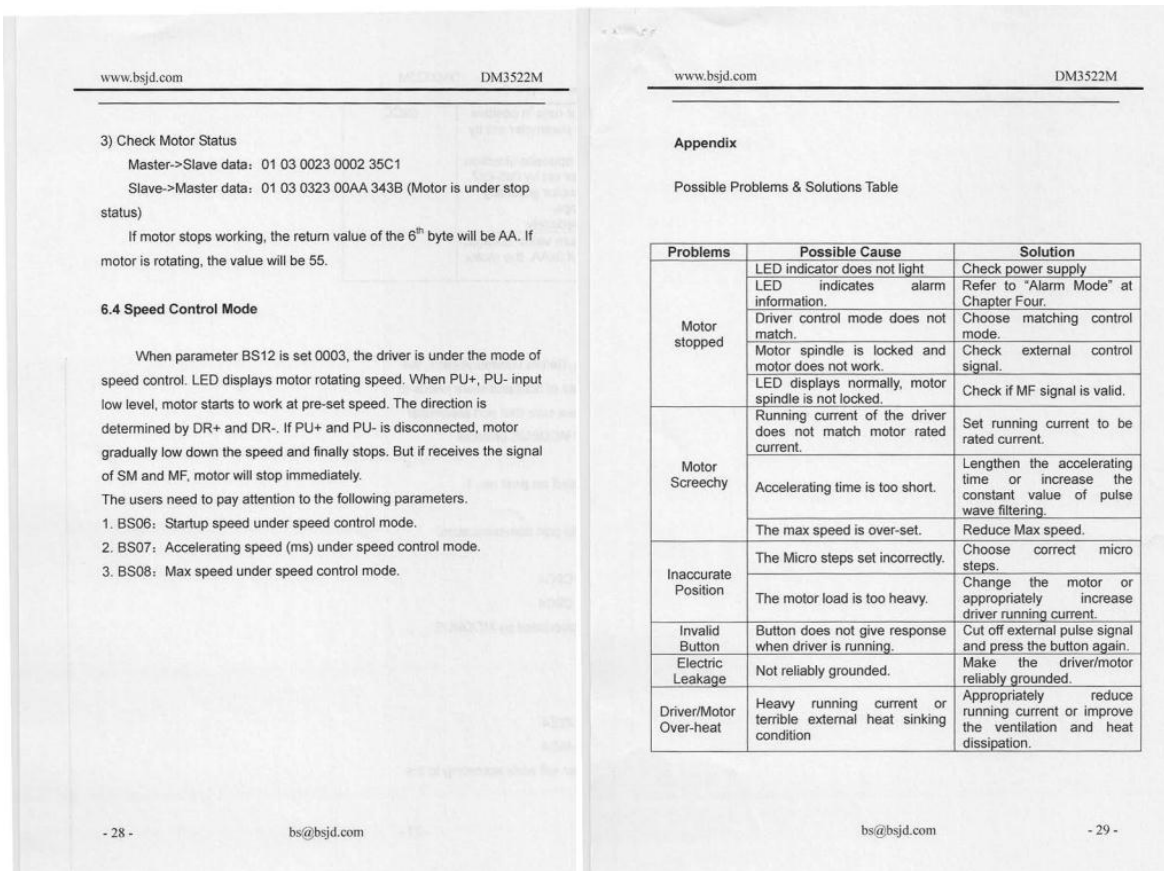
The final two bytes are CRC code which is calculated by MODBUS protocol.

- 2) Start-up the Motor

Master->Slave data: 01 06 0050 0055 49E4

Slave->Master data: 01 06 0050 0055 49E4

After the command is sent successfully, driver will work according to the parameter set by 0x0-0xA.



Anexo E - Especificações técnicas do motor passo-a-passo BSHB3923-H



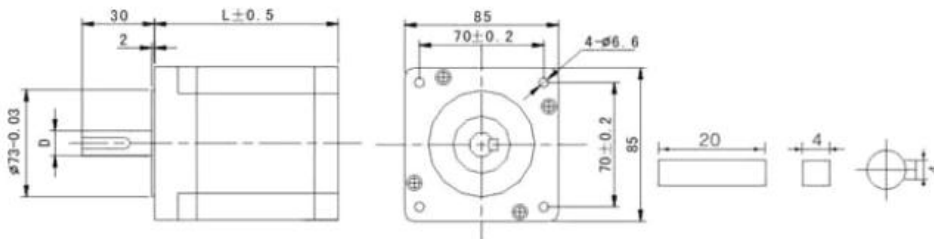
General specifications

Stepping Accuracy.....within 5%
 Temperature.....80°C Max
 Ambient Temperature.....-20°C ~ +50°C
 Insulation Resistance.....100MΩMin 500VDC
 Dielectric Strength.....500V AC 1minute
 Allowable Radial Load.....0.06mm Max (450g load)
 Allowable Thrust Load.....0.08mm Max (450g load)

Specifications

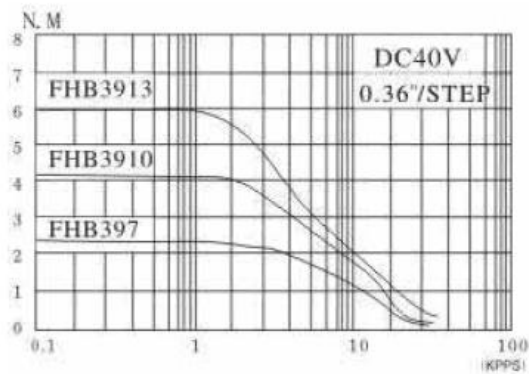
Model	Step Angle (°)	Length L(mm)	Holding Torque (N.m)	Phase Current (A)	Power Supply	Rotor Inertia (g.cm ²)	Weight (Kg)
BSHB 397-H	1.2	69	2	1.75	AC110V 2A	1.32	2
BSHB 397		69	2	5.8	DC40V 5A	1.32	2
BSHB 3910-H		97	4	2	AC110V 2.5A	2.4	3
BSHB 3910		97	4	5.8	DC40V 5A	2.4	3
BSHB 3913-H		125	6	2.25	AC110V 2.5A	3.48	4
BSHB 3913		125	6	5.8	DC40V 5A	3.48	4

Dimension

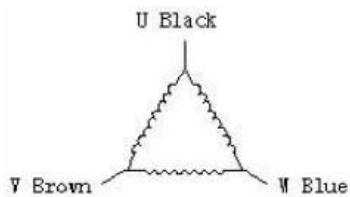


Model	D(mm)	Note
BSHB397(H)	12	Flat key 4×20
BSHB3910(H)	12	Flat key 4×20
BSHB3913(H)	14	Flat key 4×20

Frequency-torque characteristics



Connections



Anexo F – Programa de controlo da MEF (Arduino)

```
void setup () { // Inicializar o pino digital como uma saída para sentido de rotação do motor
pinMode (12, OUTPUT);
pinMode (13, OUTPUT);
Serial.begin (9600);
}
// ***** Variáveis utilizadas no programa que podem ser alteradas pelo utilizador *****
double frequencia = 1; // Frequência de rotação do motor [Hz]
int duracao = 20; // Número total de ciclos predefinido
double dmin = 0.85; // Deslocamento mínimo em cada ciclo [mm]
double dmax = 2.0; // Deslocamento máximo em cada ciclo [mm]
int afdc = 1; // Encontrar fim de curso para sensor (se afdc=1)
// ***** Variáveis *****
double deslocamento = dmax - dmin; // Deslocamento total do ensaio
double p; // Carga (lida da célula de carga)
int nimpulso = int (deslocamento * 80); // Número de impulso que impõe ao deslocamento total do ensaio
int nimpulso_dmin = int (dmin * 80); // Número de impulso que impõe ao deslocamento mínimo
int t = int (1000000 / (2 * 80 * deslocamento * frequencia)); // Tempo de pausa [microsegundos]
// Variáveis a utilizar durante a construção do programa
int durac, fdc, ciclo, nimp, a4, s, smin, smax, smax0, Z, Z0, ajuste;
int manual, subir, descer, velocidade;
double pvazio = 0; // Leitura da célula de carga (deslocamento mínimo)
double pprovete = 0; // Leitura da célula de carga (deslocamento máximo)
int n = 1; // Variável de média (n - intervalo de números com média)
int i = 0;
// Um ciclo do ensaio é constituído por carga + descarga, ou seja, motor roda à direita e depois à esquerda
void loop () {
durac = 1; fdc = 0;
smax = 200; nimp = 0;
// ***** Controlo Manual do Motor *****
manual = analogRead (A5);
while (manual > 500) {
manual = analogRead (A5);
subir = analogRead (A4);
descer = analogRead (A3);
velocidade = analogRead (A2);
if (subir > 500) {
digitalWrite (12, HIGH);
delayMicroseconds (1);
digitalWrite (12, LOW);
delay (velocidade);
}
if (descer > 500) {
digitalWrite (13, HIGH);
delayMicroseconds (1);
digitalWrite (13, LOW);
delay (velocidade);
}
} // ***** Fim de programa para controlo manual do motor *****
// Início do programa que nos dá todos os valores que estão a ser enviados pelo sensor
// ***** Verificar posição do fim de curso (fdc) *****
while (afdc == 1) {
// Quando afdc=1, corre o programa que verifica a posição do fim de curso.
while (nimp <= nimpulso){ // Sentido de rotação do motor à direita (vai até dmin)
nimp = nimp+1;
digitalWrite (13, HIGH);
s = analogRead (A1); // Leitura do sensor fdc depois do impulso(A1)
Serial.println (s);
Serial.println (s); // Esta repetição do valor "s" e os 3 dados vazios são
// para o processing funcionar com afdc=0 e afdc=1
}
```

```
Serial.println (" ");
Serial.println (" ");
Serial.println (" ");
delayMicroseconds (10);
digitalWrite (13, LOW);
delay (10);
}
nimp=0;
while (nimp <= nimpulso){
  nimp=nimp+1;
  digitalWrite(12, HIGH);
  s = analogRead(A1); // Leitura do sensor fdc depois do impulso(A1)
  Serial.println(s);
  Serial.println(s);
  Serial.println(" ");
  Serial.println(" ");
  Serial.println(" ");
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(12, LOW);
  delay(10);
}
nimp=0;
}
// ***** Motor Roda até dmin e faz uma pequena pausa *****
while (nimp < nimpulso_dmin) {
  nimp = nimp + 1;
  digitalWrite (13, HIGH);
  delayMicroseconds (10);
  digitalWrite (13, LOW);
  delay (10);
}
delay (500);
nimp = 0;
// ***** Parte do programa que encontra vai ler o valor máximo do fim de curso *****
while (nimp <= nimpulso){ // Sentido de rotação do motor à direita (vai até dmin)
  nimp = nimp + 1; // Enviar impulso ao motor
  digitalWrite (13, HIGH);
  s = analogRead (A1); // Leitura do sensor fdc depois do impulso
  delayMicroseconds (10); // Esperar 10 microsegundos
  if (s>smax){ // Ir até dmax e encontra o valor máximo do sensor smax
    smax = s;
  }
  digitalWrite (13, LOW);
  delay (10);
}
// Regressa a dmin porque nimpulsos = dmax-dmin
nimp = 0;
while (nimp <= nimpulso){
  nimp = nimp + 1;
  digitalWrite (12, HIGH);
  delayMicroseconds (10);
  digitalWrite (12, LOW);
  delay (10);
}
// ***** Encontra o valor médio associado ao fim de curso *****
nimp = 0;
smin = analogRead (A1); // Leitura do sensor fdc no inicio do ciclo (mínimo do sensor)
while (nimp <= nimpulso){ // Sentido de rotação do motor à direita (vai de dmin a dmax)
  nimp = nimp + 1;
  digitalWrite (13, HIGH);
  s = analogRead (A1); // Leitura do sensor fdc depois do impulso
  delayMicroseconds (10);
  digitalWrite (13, LOW);
```

```

if (s>((smin+smax)/2) && fdc==0){ // Vai no sentido de dmax e encontra a4 (valor médio que é calculado)
  a4 = nimp;
  fdc = 1;
  Z0 = a4; // Posição zero do fim de curso
}
delay (10);
}
// Sentido de rotação do motor à esquerda (regressa a dmin)
nimp = 0;
while (nimp <= nimpulso){
  nimp = nimp + 1;
  digitalWrite (12, HIGH);
  delayMicroseconds (10);
  digitalWrite (12, LOW);
  delay (10);
}
// ***** Executa o número de ciclos predefinido no início do programa *****
while (durac < duracao){
  nimp = 0;
  smin = analogRead (A1); // Leitura do sensor fdc no início do ciclo
  smax0 = 200;
  ajuste = 0;
  fdc = 0;
  p = analogRead (A0); // Leitura da carga
// A variável n é alterada no início do programa, caso não se queira guardar todos os valores
  pvazio = pvazio + p/n; // Carga em vazio (carga para o deslocamento mínimo)
  while (nimp <= nimpulso + ajuste){ // Desloca-se desde dmin até dmax com ajuste
    // do número de passos do motor - caso necessário

    nimp = nimp + 1;
    digitalWrite (13, HIGH);
    s = analogRead (A1); // Leitura do sensor fdc depois do impulso
    delayMicroseconds (1);
    digitalWrite (13, LOW);
    if (s>((smin+smax)/2) && fdc==0){ // Vai no sentido de dmax e encontra a4
      a4 = nimp;
      fdc = 1;
      Z = a4; // Posição atual do fim de curso
      ajuste = Z-Z0; // Ajuste a ser dado se o motor tiver perdido passos (valor calculado para todos os ciclos)
    }
    if (s>smax0){
      smax0 = s;
    }
    delayMicroseconds (t);
  }
  p = analogRead (A0);
// A variável n é alterada no início do programa, caso não se queira guardar todos os valores
  pprovete = pprovete + p/n; // Carga máxima (carga para o deslocamento máximo)
  i = i + 1;
  if (i==n){ // Impressão dos resultados (pvazio, pprovete, smin, smax0, ajuste)
    Serial.println (pvazio);
    Serial.println (pprovete);
    Serial.println (smin);
    Serial.println (smax0);
    Serial.println (ajuste);
    i = 0;
    pvazio = 0;
    pprovete = 0;
  }
}
// Sentido de rotação do motor à esquerda (regressa a dmin)
nimp=0;
while (nimp <= nimpulso){
  nimp = nimp + 1;
  digitalWrite (12, HIGH);

```



```
    delayMicroseconds (1);
    digitalWrite (12, LOW);
    delayMicroseconds (t);
}
smax = smax0;
durac = durac + 1;
}
// ***** Ciclo infinito: é equivalente a parar o programa *****
while (durac >= duracao){
    delay (5000);
}
}
```

Anexo G - Programa complementar de visualização dos resultados (*Processing*)

```
// This program takes ASCII-encoded strings
// from the serial port at 9600 baud and graphs them. It expects values in the
// range 0 to 1023, followed by a newline, or newline and carriage return

import processing.serial.*;
Serial myPort;
int xpos = 1;
int i = 0;

PrintWriter resultado;
void setup () {
  resultado = createWriter ("result.txt");
  size (1000, 600);
  println (Serial.list());
  myPort = new Serial (this, Serial.list () [1], 9600);
  myPort.bufferUntil ('\n');
  background (0);
}
void draw () {
}

void serialEvent (Serial myPort) {
  String inString = my.Port.read.StringUntil ('\n');
  if (inString != null) {
    inString = trim (inString);
    i = i+1;
    if (i <= 4) { // Escreve em ficheiro os valores (pvazio, pprovete, smin, smax e ajuste)
      resultado.print (inString);
      resultado.print (" ");
      if (i <= 2) { // Apresenta os dois primeiros valores em gráfico (pvazio+pprovete) ou (s+s)
        float inByte = float (inStrig);
        inByte = map (inByte, 0, 1023, 0, height);
        stroke (255, 255, 0);
        point (xPos, inByte);
        if (xPos >= width) {
          xPos = 0;
          background (0);
        }
        else {
          xPos ++;
        }
      }
    }
    else {
      resultado.println (inString); // Escreve em ficheiro o último valor e muda de linha
      i = 0;
    }
  }
}
void keyPressed () {
  resultado.println ("terminei"); // Grava no final do ficheiro a palavra "terminei" clicando numa tecla qualquer
  resultado.flush ();
}
```