



**Luís Carlos da Rocha  
Carneiro Pais**

**Recuperação de máquina universal de ensaios para  
uma nova especialização em testes de fadiga**





**Luís Carlos da Rocha  
Carneiro Pais**

**Recuperação de máquina universal de ensaios para  
uma nova especialização em testes de 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 de António Manuel de Bastos Pereira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Alfredo Manuel Balacó de Moraes, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



## **Júri**

Presidente

**Prof. Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira**

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Orientadores

**Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira**

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Morais**

Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Arguente

**Prof. Doutor Luís Manuel Pires Martins de Abreu**

Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda



## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira pelos seus conhecimentos teóricos e práticos nesta temática, pela sua disponibilidade no auxílio do trabalho experimental, pela experiência que tem na orientação de dissertações e acima de tudo pelas suas qualidades humanas o que me deu ainda mais força para finalizar esta dissertação.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor Alfredo Balacó de Morais, pela sua ajuda na organização e desenvolvimento da dissertação. Devo-lhe também agradecer pela forma como ao longo dos anos, explicava sucintamente os conteúdos de diferentes disciplinas em que tive o prazer tê-lo como professor. Não poderia deixar de agradecer pelo bom humor diário que alegrava os dias de qualquer um que convivesse consigo.

Aos meus amigos, André Reis, Pedro Victória, Daniel Fontes, Leandro Reis e José Pinto pelo apoio incondicional que tive da parte deles e por me fazerem acreditar que o meu esforço seria recompensado.

Aos meus amigos, Bruno Oliveira, Luís Gonçalo Campos, Sérgio Cruz, Tiago Santos, Nuno Santos, Joana Guimarães, Hugo Ribeiro e André Castro, que tive o prazer de conhecer durante o curso e que foram muito importantes na aprendizagem de vários conteúdos.

Por fim, quero agradecer à minha família pelo apoio incondicional e por me terem dado esta oportunidade única na minha vida, que será para sempre recordada com grande orgulho.





**Palavras-chave**

Máquinas de ensaios de fadiga, ensaio à flexão, programa de controlo.

**Resumo**

Atualmente, o estudo do comportamento à fadiga dos materiais tem um importante papel no mundo da engenharia. O Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro recebeu recentemente uma máquina universal de ensaios que estava inoperacional. O objetivo deste trabalho foi recuperar e adaptar a máquina à realização de ensaios de fadiga. Inicialmente, procedeu-se a uma revisão do estado do conhecimento relativamente aos tipos de carregamentos cíclicos e aos componentes e dispositivos usados nas máquinas de fadiga. Posteriormente, avaliou-se o estado dos componentes da máquina e realizaram-se algumas transformações e acrescentos às partes mecânica, elétrica e de controlo com a finalidade de tornar a máquina funcional. Finalmente, para efeitos de validação, realizou-se um ensaio à flexão que mostrou que a máquina está apta para realizar ensaios de fadiga.



**Keywords**

Fatigue testing machine, bending test, control program.

**Abstract**

Fatigue testing has nowadays an important role in engineering. The Department of Mechanical Engineering of the University of Aveiro was recently offered a non-operational universal testing machine. The objective of this work was to recover the machine and to adapt it to fatigue tests. Initially, a state-of-the-art review was conducted focussing on the types of cyclic loadings and on components and fixtures used in fatigue testing machines. Then, after evaluating the functionality of the machine components, several modifications were made and new components were added to the mechanical, electrical and control parts. Finally, for assessment purposes, a flexural test was conducted which showed that the machine can be used to perform fatigue tests.



## Índice

LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	V
LISTA DE GRÁFICOS	VII
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Enquadramento e objetivos	2
1.2 Carregamentos típicos de fadiga	2
1.3 Ensaios de fadiga	3
1.3.1 Ensaios de fadiga a alto ciclo	5
1.3.2 Ensaios de fadiga a baixo ciclo	7
1.3.3 Propagação de fendas por fadiga	8
1.4 Máquinas de ensaios de fadiga	10
1.5 Considerações finais	14
CAPÍTULO 2 MÁQUINA DE ENSAIOS DE FADIGA	16
2.1 Estrutura inicial	16
2.1.1 Motor passo-a-passo	18
2.1.2 Célula de carga	18
2.2 Intervenções na máquina de ensaios de fadiga	20
2.2.1 Intervenções na componente elétrica	20
2.2.1.1 Arduino Mega 2560 R3	21
2.2.1.2 Driver	23
2.2.1.3 Fonte de alimentação S-201-12	23
2.2.1.4 Carta de aquisição	24
2.2.2 Intervenções na componente mecânica	25
2.2.2.1 Suporte de provetes	26
2.2.2.2 Fixador de amarras ao travessão da MEF	29
2.2.3 Intervenções na componente de controlo e aquisição de dados	29
2.2.3.1 Controlo Manual	31
2.2.3.2 Controlo Automático	33
CAPÍTULO 3 TRABALHO EXPERIMENTAL	36
3.1 Calibração da célula de carga	36
3.2 Ensaio experimental	39
3.2.1 Provede utilizado	39
3.2.2 Tratamento de dados	40

CAPÍTULO 4 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	46
4.1 Conclusões	46
4.2 Desenvolvimentos futuros	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXOS	52

## Lista de figuras

Figura 1.1 - Curva do ciclo de tensão invertida (Campbell, 2008).	2
Figura 1.2 - Curva do ciclo de tensão alternada (Campbell, 2008).	3
Figura 1.3 - Equipamento de teste elaborado por Wilhelm Albert (History of Fatigue - ATZ online, 2015).	4
Figura 1.4- Representação do número aproximado de artigos publicados ao longo dos anos (Wataru Tsutsui, 2008).	4
Figura 1.5 - Esquema representativo do equipamento de testes de fadiga de Wohler (Wataru Tsutsui, 2008).	5
Figura 1.6 - Curvas de Wöhler para três materiais diferentes (Boyer, 1986).	6
Figura 1.7 - Gráfico típico $\Delta\epsilon$ vs. $N_f$ (Boyer, 1986).	7
Figura 1.8 - Curva de crescimento da fenda em função do número de ciclos (Campbell, 2008).	8
Figura 1.9 - Curva de propagação da fenda (Campbell, 2008).	9
Figura 1.10 - Curva da taxa de crescimento da fenda numa liga de aço ASTM A533 B1 (Boyer, 1986).	9
Figura 1.11 - Curva da taxa de crescimento da fenda numa liga de alumínio (Campbell, 2008).	10
Figura 1.12 - Máquina de ensaios de fadiga axiais (Boyer, 1986).	10
Figura 1.13 - Máquina de ensaios de fadiga à flexão (Testresources, 2015).	11
Figura 1.14 – Máquina de ensaios de fadiga à torsão (ADMET, Materials Testing System Manufacturer, 2015).	11
Figura 1.15 - Tipo de apertos para ensaios de fadiga axiais (Boyer, 1986).	12
Figura 1.16 - Representação de um motor de íman permanente(Simpson, 1996).	12
Figura 1.17 - Representação do movimento de um motor passo-a-passo de relutância variável: a) posição 0° graus; b) posição 30° graus; c) 60° graus; d) tabela dos ângulos das posições de dente do rotor no motor passo-a-passo (Simpson, 1996).	13
Figura 1.18 - Representação de um motor passo-a-passo híbrido. (Brites & Santos, 2008)	14
Figura 2.1 - Estrutura Inicial da máquina de ensaios de fadiga.	16
Figura 2.2 - Célula de carga acoplada no travessão móvel.	17
Figura 2.3 - Motor passo-a-passo acoplado na máquina.	17

Figura 2.4 - Parte inferior da MEF.	18
Figura 2.5 - Motor passo-a-passo BSHB3913 (BSJD, 2015).	18
Figura 2.6 - Disposição dos extensómetros na ponte de <i>wheatstone</i> (All About Circuits, 2015).	19
Figura 2.7 - Célula de carga do tipo Pancake Load Cell (Procter & Chester, 2012).	19
Figura 2.8 - Quadro Elétrico.	20
Figura 2.9 - Esquema de ligação dos componentes elétricos.	21
Figura 2.10 - Plataforma Arduino Mega 2560 R3 (Arduino, 2015).	21
Figura 2.11 - Plataforma USB Serial Light Adapter (Arduino, 2015).	22
Figura 2.12 - Driver DM3722M (BSJD, 2015).	23
Figura 2.13 - Fonte de Alimentação S – 201 – 12 (Stepper Online, 2015).	24
Figura 2.14 – Módulo NI-9237 (National Instruments, 2015).	24
Figura 2.15 – Chassi NI cDAQ-9178 (National Instruments, 2015).	25
Figura 2.16 – Módulo NI-9237 acoplado no Chassi NI cDAQ-9178.	25
Figura 2.17 – Adaptador RJ50.	25
Figura 2.18 - Carril acoplado à base.	26
Figura 2.19 - Componentes de fixação do provete na sua largura acoplados ao carril.	26
Figura 2.20 - Sistema de posicionamento na direção da largura do provete.	27
Figura 2.21 - Sistema de posicionamento na direção do comprimento do provete.	27
Figura 2.22 - Suporte com o provete preso e apto para a realização do ensaio.	28
Figura 2.23 - Centro de Maquinagem MIKRON VCE 500 (multipino plataforma B2B, 2015).	28
Figura 2.24 - Fixador a ligar ao travessão da MEF.	29
Figura 2.25 - Esquema da sequência do programa de controlo LabVIEW.	31
Figura 2.26 - Esquema com a sequência lógica dos botões manuais.	32
Figura 3.1 - Máquina de ensaios à tração/compressão Shimadzu <sup>TM</sup> AGS-X STD (Shimadzu, 2015).	36
Figura 3.2 - Calibração da célula de carga na Shimadzu <sup>TM</sup> AGS-X STD.	38
Figura 3.3 - Provete utilizado no ensaio de verificação.	40
Figura 3.4 - Esquema representativo de um ensaio ENF (Pereira & Morais, 2008).	40
Figura 3.5 - Ensaio de verificação.	41



## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - <i>String</i> enviada para o arduino relativa aos botões <i>UP</i> e <i>DOWN</i> .	33
Tabela 2.2 - <i>String</i> enviada para o arduino relativa ao botão <i>STOP</i> .	33
Tabela 2.3 - <i>String</i> enviada para o arduino relativa à aquisição de dados.	34
Tabela 2.4 - <i>String</i> enviada para o arduino relativa à carga liga na célula de carga.	34
Tabela 3.1 - Tabela de calibração manual.	37
Tabela 3.2 - Registo do tratamento de dados da calibração da célula de carga.	37
Tabela 3.3 - Tabela de calibração final.	39



## Lista de gráficos

Gráfico 3.1 - Gráfico 2D da calibração da célula de carga.....	38
Gráfico 3.2 - Representação das forças máximas aplicadas.....	41
Gráfico 3.3 - Representação das forças mínimas aplicadas.....	42
Gráfico 3.4 - Representação dos deslocamentos no movimento descendente. ....	42
Gráfico 3.5 - Representação dos deslocamentos no movimento ascendente. ....	42



---

*Capítulo 1*  
*Introdução*

## Capítulo 1 Introdução

### 1.1 Enquadramento e objetivos

Ao longo dos anos e com a evolução na engenharia, tem-se estudado com maior rigor todo o tipo de fraturas mecânicas que podem ocorrer nos diferentes tipos de materiais. A fadiga mecânica tem-se revelado uma das causas de fratura mais importantes em componentes de máquinas e estruturas. Para estudar o comportamento dos materiais à fadiga, é necessária a recorrência a ensaios de amostras, onde se medem o número de ciclos de vida até à rutura ou se observa a propagação de fendas perante ciclos de carregamento impostos.

Recentemente, foi oferecida ao Departamento de Engenharia Mecânica uma máquina de ensaios de fadiga (MEF) que não se encontrava operacional. O objetivo principal deste trabalho foi torná-la capaz de realizar ensaios de fadiga. Para atingir esse objetivo, foram efetuadas as seguintes tarefas:

- Identificação e correção das avarias que faziam com que a MEF não estivesse operacional;
- Projeto e construção de componentes para a realização de ensaios de fadiga;
- Integração no equipamento de um sistema de controlo do carregamento por aplicação de deslocamento ou forças.

### 1.2 Carregamentos típicos de fadiga

A rutura por fadiga ocorre quando um componente está sujeito a carregamentos cíclicos durante um determinado intervalo de tempo. Existem alguns ciclos de tensão típicos de várias aplicações, entre os quais se incluem o ciclo de tensão invertida (ver Figura 1.1), no qual a tensão máxima e a tensão mínima são simétricas. Trata-se de uma situação habitual na flexão de veios rotativos e em testes de fadiga (Campbell, 2008). A variação temporal é sinusoidal (Reed-Hill & Abbaschian, 1994).

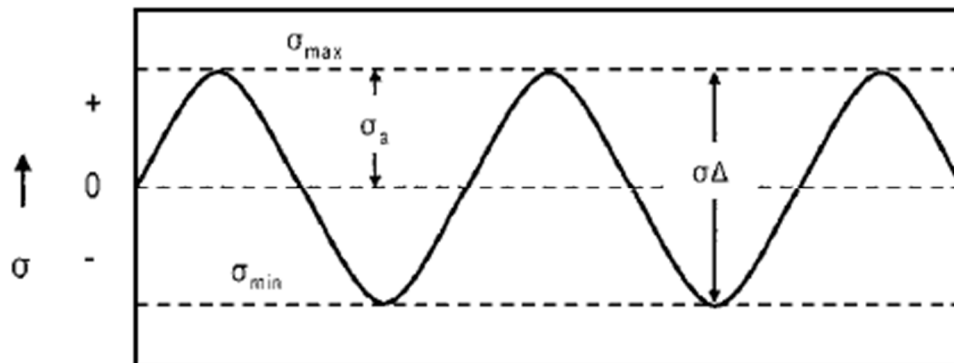


Figura 1.1 - Curva do ciclo de tensão invertida (Campbell, 2008).

Por sua vez, no ciclo de tensão alternada, o mais comum em aplicações de engenharia, as tensões máximas ( $\sigma_{max}$ ) e mínimas ( $\sigma_{min}$ ) são assimétricas, como se pode observar na Figura 1.2 (Campbell, 2008).

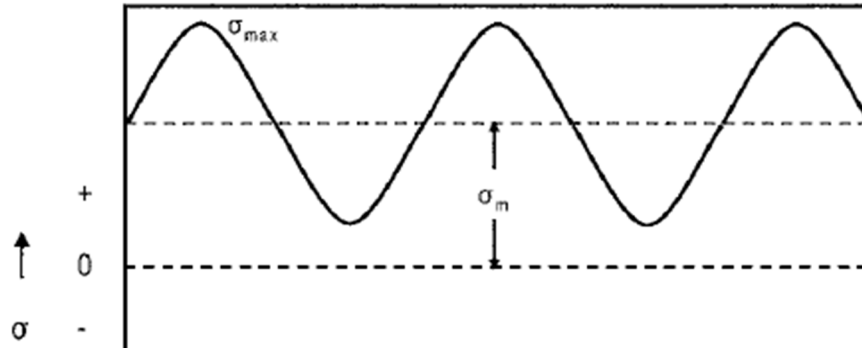


Figura 1.2 - Curva do ciclo de tensão alternada (Campbell, 2008).

Independentemente da forma de variação temporal em questão, sabe-se que a geração e propagação de defeitos de fadiga depende de alguns parâmetros, tais como a tensão máxima  $\sigma_{max}$ , a tensão mínima  $\sigma_{min}$ , a variação de tensão cíclica  $\Delta\sigma$ , a amplitude da tensão cíclica  $\sigma_a$ , a tensão média cíclica  $\sigma_m$ , o rácio de tensão  $R$  e a relação de amplitude  $A$ . Entre estes parâmetros aplicam-se as seguintes relações:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1.2)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \quad (1.5)$$

### 1.3 Ensaios de fadiga

Um ensaio de fadiga pode ser descrito como um processo no qual é estudado o comportamento de uma amostra perante um carregamento cíclico aplicado. Os ensaios de fadiga foram aperfeiçoados ao longo dos anos. De acordo com Schutz (1996), os primeiros resultados conhecidos de um teste de fadiga foram publicados em alemão por Wilhelm Albert no ano de 1837 (Les Pock, 2007). Wilhelm Albert realizou ensaios em correntes de minas de extração de minério de ferro. Numa das extremidades da corrente foi colocado um peso, sendo que a outra extremidade foi suportada através de um disco. As ligações da cadeia foram repetidamente sujeitas à flexão, através do movimento transmitido por um outro disco que era acionado por um moinho, conforme ilustrado na Figura 1.3.

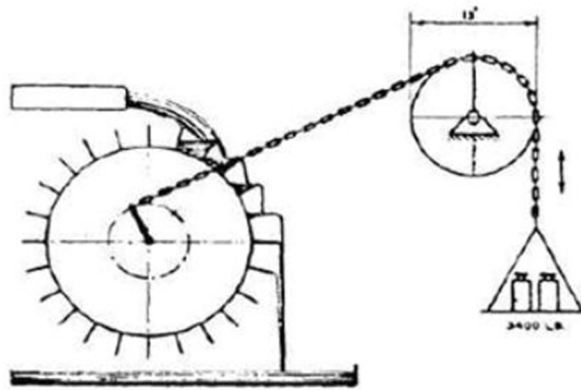


Figura 1.3 - Equipamento de teste elaborado por Wilhelm Albert (History of Fatigue - ATZ online, 2015).

Desde este marco histórico, muitos investigadores empenharam-se em desenvolver equipamentos e técnicas mais elaboradas de modo a serem obtidos resultados mais precisos. A Figura 1.4 é reveladora do interesse nesta temática por vários investigadores ao longo dos anos, mostrando o crescimento acentuado do número de publicações.

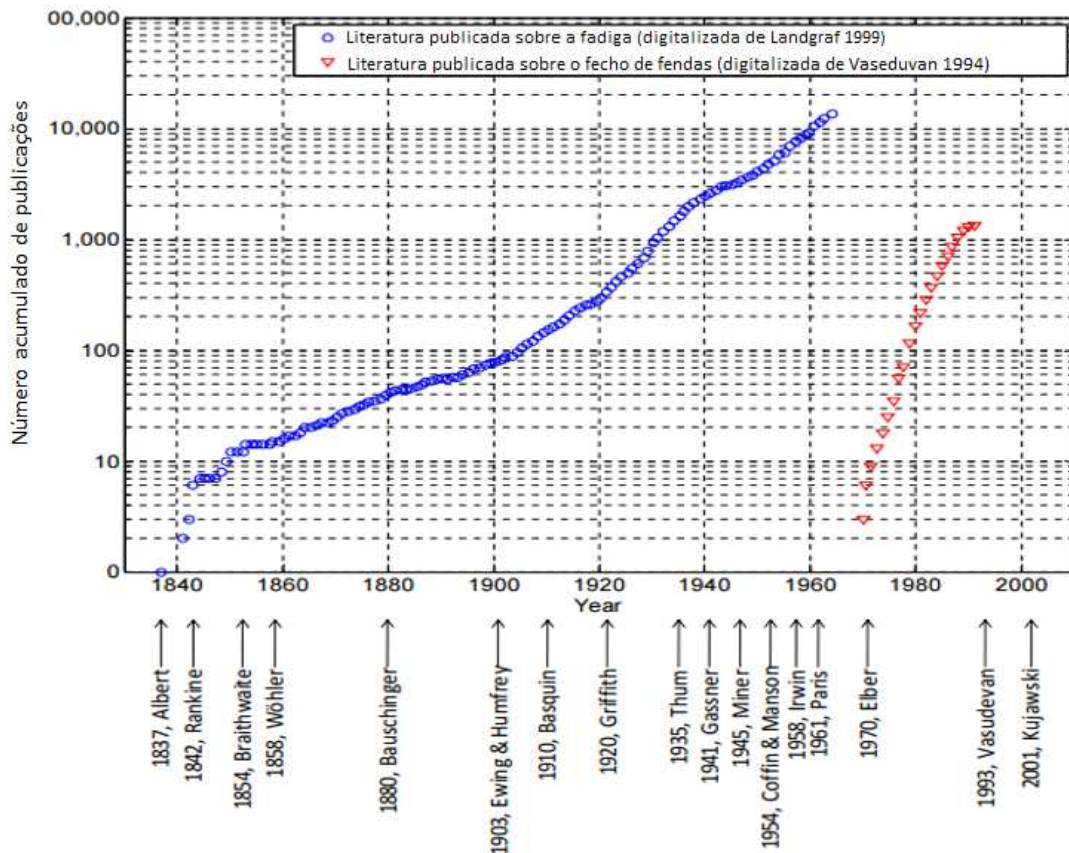


Figura 1.4- Representação do número aproximado de artigos publicados ao longo dos anos (Wataru Tsutsui, 2008).



Rankine foi um dos primeiros engenheiros a reconhecer que as falhas por fadiga dos eixos ferroviários eram causadas pela iniciação e crescimento das fendas frágeis. Rankine examinou vários eixos ferroviários quebrados, particularmente depois do acidente do comboio de Versalhes em 1842, quando os eixos de uma locomotiva se partiram repentinamente. Rankine mostrou que a rutura se deveu ao crescimento progressivo de uma fenda, acelerado pelo efeito da concentração de tensões (Rao, 2011).

Em 1860, William Fairbairn e August Wöhler realizaram estudos sistemáticos da rutura por fadiga. Fairbairn estudou o efeito de carregamentos repetitivos em vigas de ferro forjado e fundido, mostrando que a fratura poderia ocorrer pelo crescimento da fenda devido a defeitos originais do próprio material (Rao, 2011). Wöhler resumiu o trabalho realizado por Fairbairn em vários artigos sobre eixos ferroviários, ajudando a melhorar os procedimentos de teste de eixos e o projeto daqueles para aumentar a vida útil. Além disso, desenvolveu um equipamento de ensaio de veios rotativos sob flexão, com base no qual foi introduzido o conceito de limite à fadiga (ver Figura 1.5) (History of Fatigue - ATZ online, 2015).

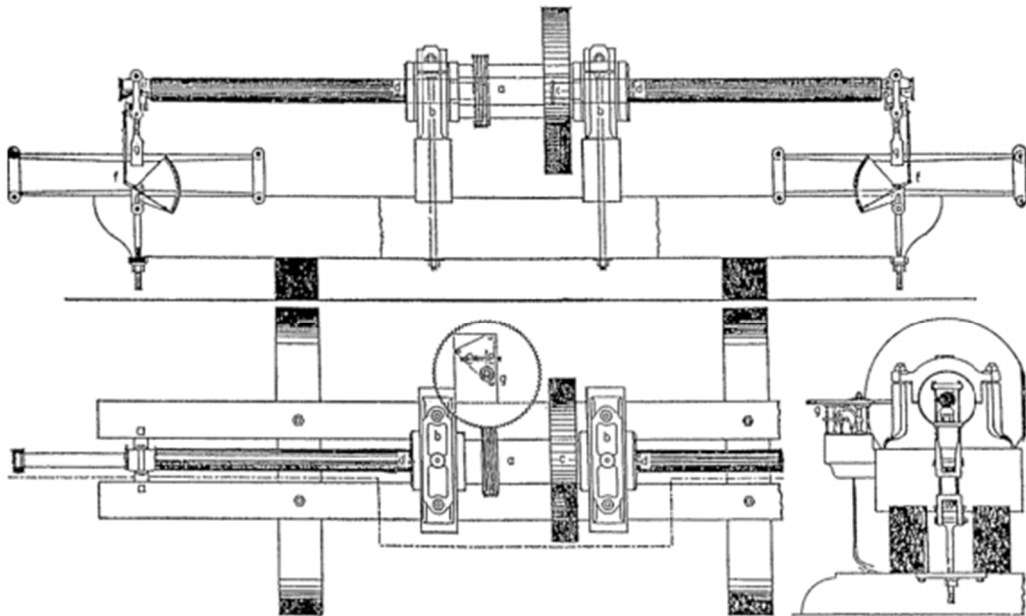


Figura 1.5 - Esquema representativo do equipamento de testes de fadiga de Wohler (Wataru Tsutsui, 2008).

### 1.3.1 Ensaios de fadiga a alto ciclo

O trabalho desenvolvido por Wöhler sobre fadiga ficou marcado pela primeira investigação sistemática de curvas S-N, também conhecidas como curvas de Wöhler, que permitem descrever o comportamento de uma amostra durante um ensaio de fadiga (Rao, 2011). A curva de Wöhler de um material relaciona a vida de fadiga e a amplitude de tensão de uma amostra. As curvas de Wöhler de muitos materiais podem ser aproximadas pela Lei de Basquin:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1.6)$$

sendo  $\sigma'_f$  o coeficiente de resistência à fadiga e  $b$  o expoente de resistência à fadiga (Ritchie, Karihaloo, & Milne, 2003).

A Figura 1.6 apresenta as curvas de Wöhler de uma liga de alumínio e de dois tipos de aço. É importante referir que a Lei de Basquin se aplica exclusivamente à fadiga a altos ciclos, ou seja, superior a  $10^5$  ciclos no regime elástico. Habitualmente, estes ensaios são realizados até  $10^7$  ciclos e por vezes até  $10^8$  ciclos para metais não-ferrosos o que torna conveniente a escala logarítmica para o eixo do número de ciclos. Embora a tensão global aplicada seja baixa o suficiente para o comportamento do material se manter em regime elástico, podem existir deformações plásticas junto à fenda de fadiga da amostra (Campbell, 2008).

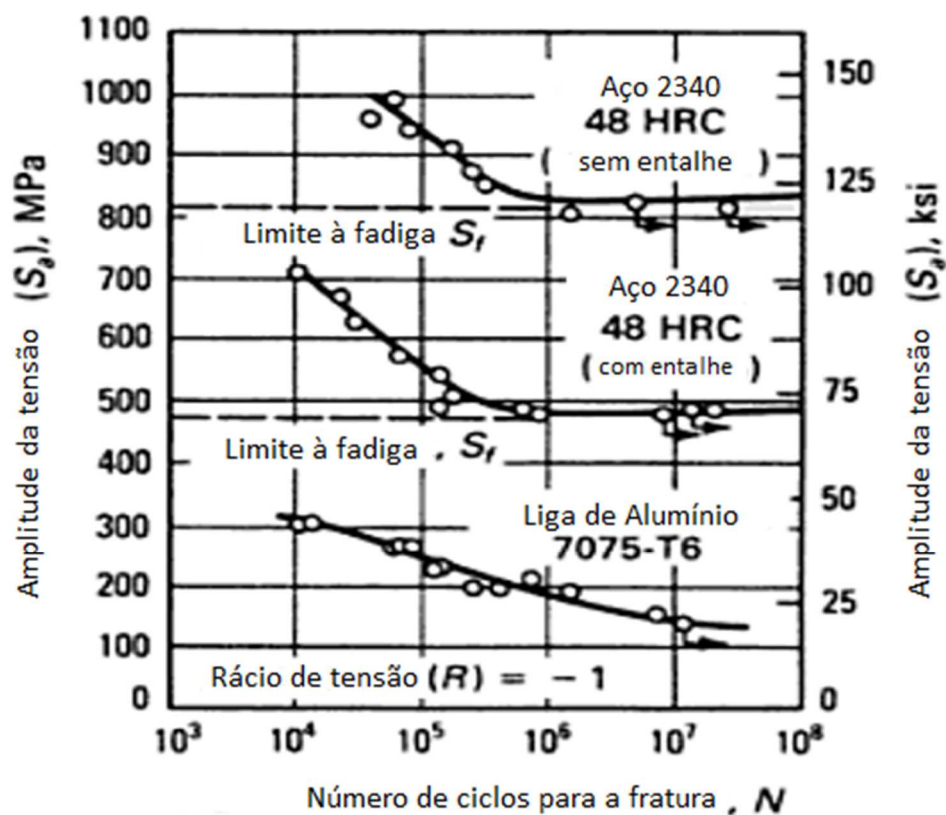


Figura 1.6 - Curvas de Wöhler para três materiais diferentes (Boyer, 1986).

Estes ensaios de fadiga permitem estudar várias propriedades importantes dos materiais, tais como o limite à fadiga, a resistência à fadiga e a vida de fadiga.

A base do termo “limite à fadiga” está no facto de que, enquanto a amostra sofrer uma carga inferior ao valor estabelecido para o material em questão, nunca irá sofrer rutura por fadiga. O alumínio, o cobre e o magnésio são materiais que não possuem limite de fadiga, pelo que, se sujeitos a um número de ciclos suficiente, acabam por sofrer rutura por fadiga (Reed-Hill & Abbaschian, 1994). Numa curva S-N, o limite à fadiga é representado por um patamar inferior horizontal (Boyer, 1986).

A tensão à qual ocorre a falha mecânica para um determinado número de ciclos é designada por resistência à fadiga (Reed-Hill & Abbaschian, 1994). Normalmente, a resistência à fadiga aumenta à medida que a resistência à tração estática aumenta. Por exemplo, os aços de alta resistência termicamente tratados com tensões de cedência ( $\sigma_y$ ) de 1400 MPa possuem resistências à fadiga muito maiores do que uma liga de alumínio com uma tensão de cedência de 480 MPa (Campbell, 2008).

O número de ciclos necessários para ocorrer a falha mecânica num material a uma determinada tensão é designado por vida de fadiga (Reed-Hill & Abbaschian, 1994). Evidentemente, à medida que o valor de tensão aplicado é reduzido, a vida de fadiga aumenta (Campbell, 2008).

### 1.3.2 Ensaio de fadiga a baixo ciclo

Estes ensaios realizam-se durante um baixo número de ciclos a níveis de carga que impõem deformação elastoplástica com a amplitude de deformação constante. A vida à fadiga pode ser descrita pela lei de Manson-Coffin, como se pode observar na equação 1.7 (Ritchie, Karihaloo, & Milne, 2003):

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (1.7)$$

sendo,  $\varepsilon'_f$  o coeficiente de ductilidade à fadiga e  $c$  o expoente de ductilidade à fadiga.

O comportamento da vida de fadiga é representado num gráfico de escala logarítmica,  $\Delta\varepsilon$  vs.  $N_f$ , como se exemplifica na Figura 1.7. A variação da deformação total é separada em componentes plástica e elástica (Boyer, 1986).

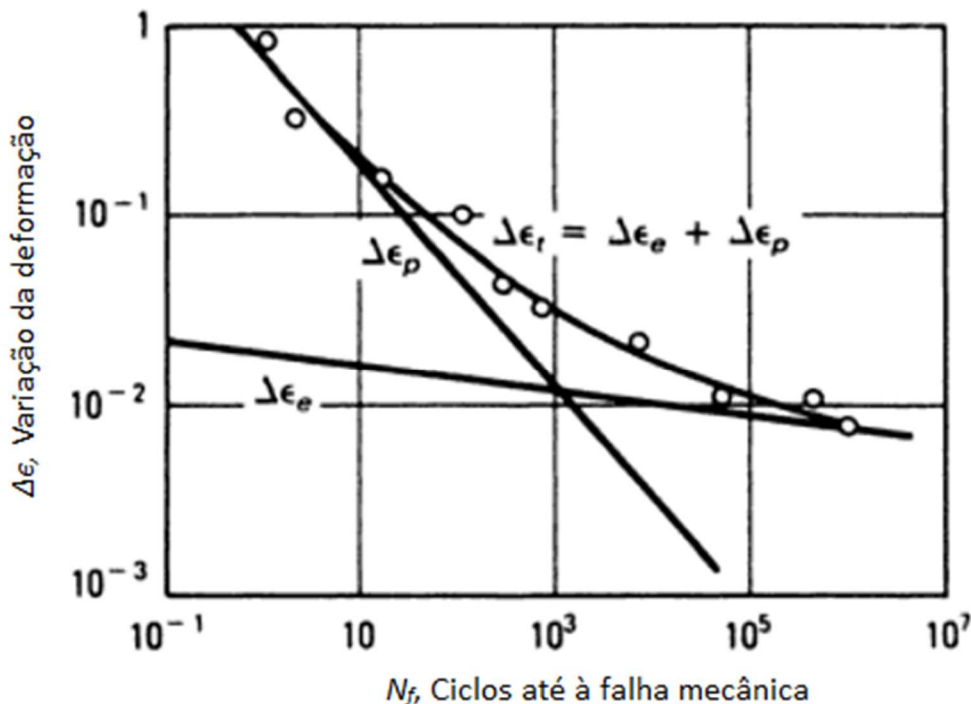


Figura 1.7 - Gráfico típico  $\Delta\varepsilon$  vs.  $N_f$  (Boyer, 1986).

### 1.3.3 Propagação de fendas por fadiga

A taxa de propagação de fendas por fadiga a altos ciclos pode ser tratada pela mecânica da fratura linear elástica. Esta assume que todas as estruturas contêm defeitos e que as fendas crescem a partir de um tamanho inicial  $a_0$ , até um tamanho crítico  $a_c$ , que corresponde à falha mecânica após um determinado número de ciclos (ver Figura 1.8) (Campbell, 2008).

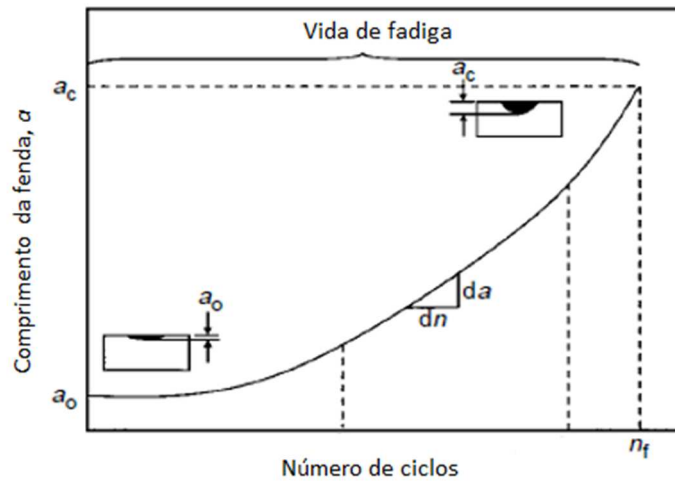


Figura 1.8 - Curva de crescimento da fenda em função do número de ciclos (Campbell, 2008).

A taxa de crescimento da fenda  $\frac{da}{dN}$ , que pode ser determinada a partir do declive da curva, é inicialmente lenta mas aumenta bastante com o comprimento da fenda devido ao efeito crescente de concentração de tensões (Campbell, 2008). Usualmente, a evolução da propagação das fendas por fadiga, que contempla diferentes fases, é visualizada num gráfico com escala logarítmica, que relaciona a taxa de crescimento da fenda com a variação cíclica do fator de intensidade da tensão,  $\Delta K$ , conforme se pode verificar na Figura 1.9 (Boyer, 1986). Neste gráfico distinguem-se 3 fases (Boyer, 1986):

- Região I: não existe propagação da fenda, e que é delimitada pelo limiar de fadiga,  $\Delta K_{th}$ ;
- Região II: a taxa de crescimento da fenda é estável e essencialmente logarítmica-linear, e pode ser modelada pela lei de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.8)$$

sendo  $a$  o tamanho da fenda e  $C$  e  $m$  parâmetros empíricos relacionados com o material da amostra (ver Figura 1.10 e Figura 1.11) com as condições ambientais e do próprio carregamento cíclico imposto (por exemplo de  $R$ , como se vê na Figura 1.11). Tipicamente,  $m$  varia entre 2 e 4 para casos de metais.

- Região III: Os valores de  $\Delta K$  são elevados, e ocorre um rápido crescimento da fenda imediatamente antes da rutura da amostra (Boyer, 1986).

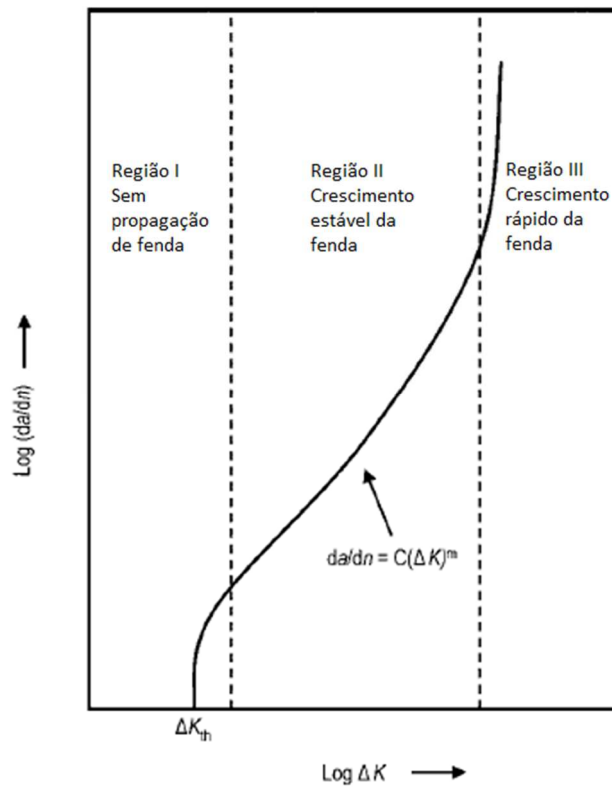


Figura 1.9 - Curva de propagação da fenda (Campbell, 2008).

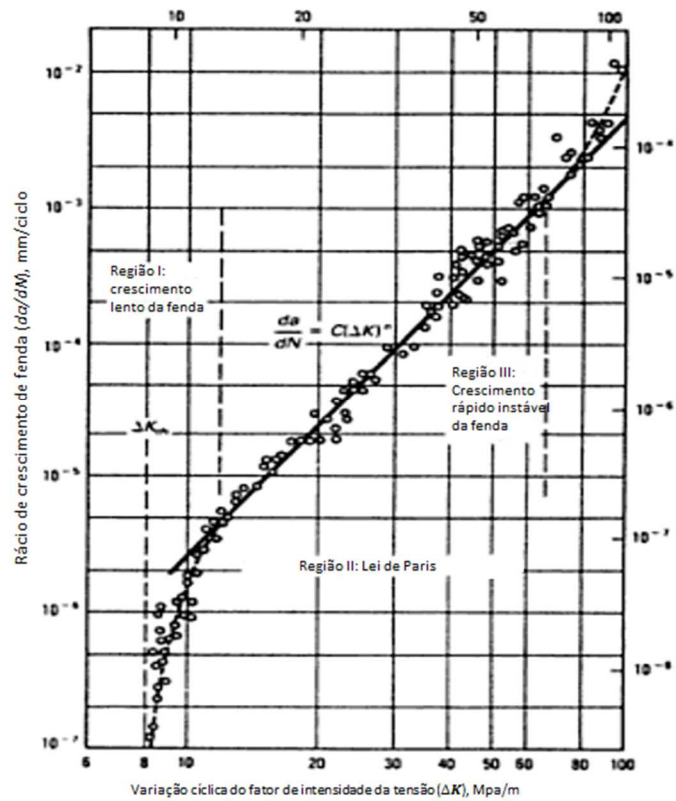


Figura 1.10 - Curva da taxa de crescimento da fenda numa liga de aço ASTM A533 B1 (Boyer, 1986).

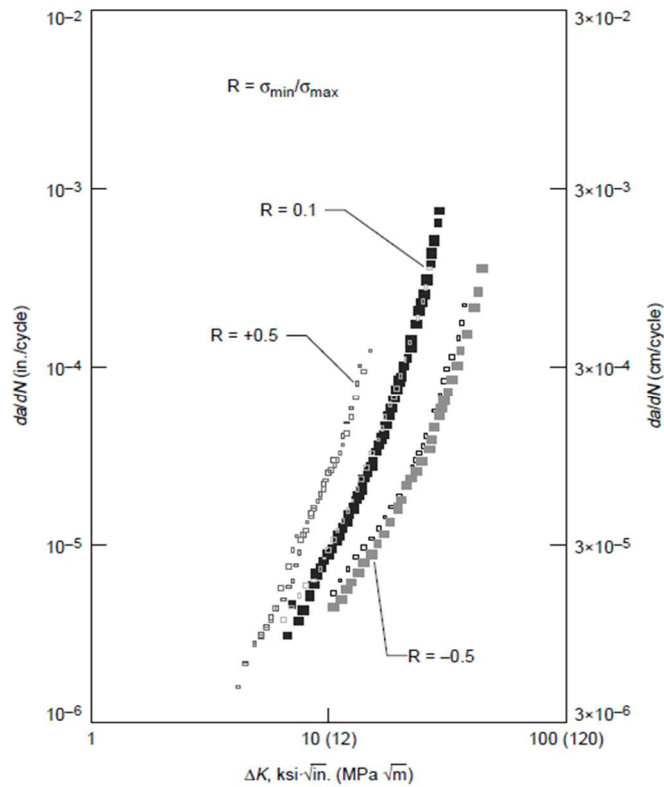


Figura 1.11 - Curva da taxa de crescimento da fenda numa liga de alumínio (Campbell, 2008).

#### 1.4 Máquinas de ensaios de fadiga

As máquinas de ensaios de fadiga podem aplicar cargas axiais, de flexão ou de torção. Os ensaios axiais exigem geralmente cargas mais elevadas. Quer os ensaios axiais, quer os de flexão são habitualmente realizados em máquinas universais (ver Figura 1.12 e Figura 1.13). Já os ensaios à torção exigem equipamentos específicos (ver Figura 1.14)

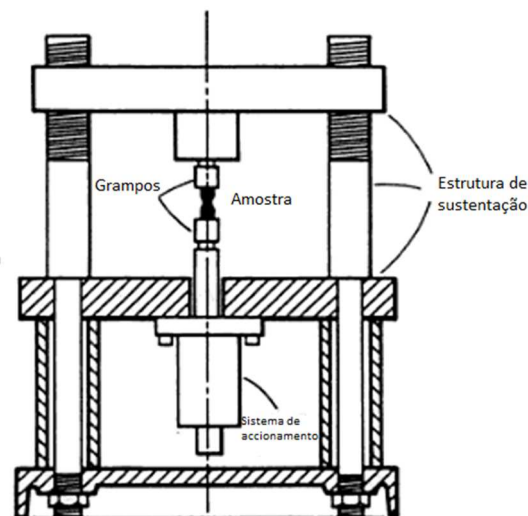


Figura 1.12 - Máquina de ensaios de fadiga axiais (Boyer, 1986).

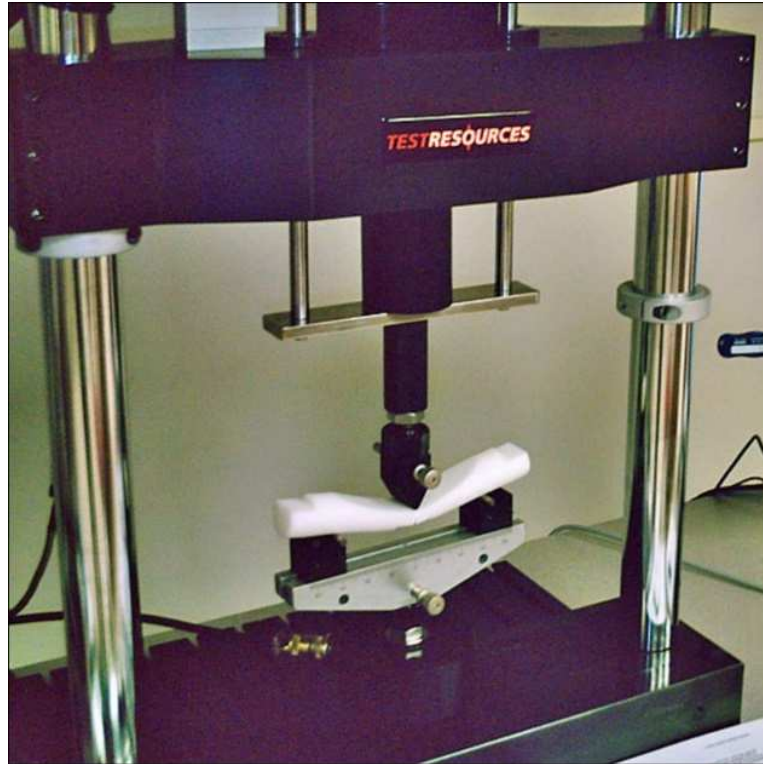


Figura 1.13 - Máquina de ensaios de fadiga à flexão (Testresources, 2015).

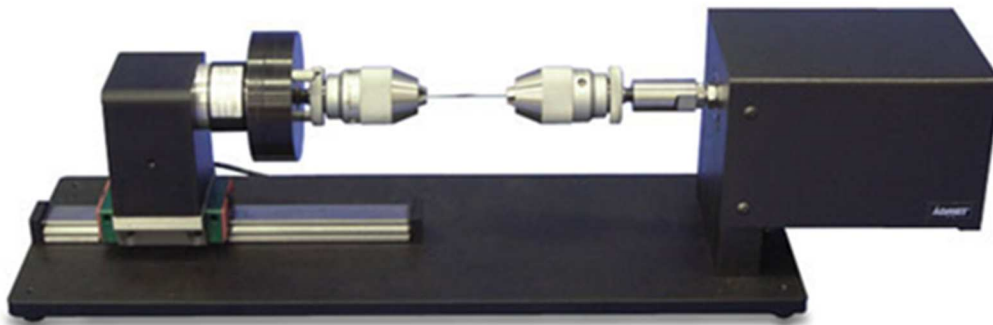


Figura 1.14 – Máquina de ensaios de fadiga à torsão (ADMET, Materials Testing System Manufacturer, 2015).

Independentemente do tipo de carregamento aplicado, uma MEF possui sempre os seguintes componentes principais (Boyer, 1986):

- Sistema de acionamento, habitualmente elétrico ou servo-hidráulico (Boyer, 1986);
- Sistema de controlo, que estabelece os parâmetros dos ensaios;
- Sistema de fixação da amostra, cujos exemplos estão indicados na Figura 1.15.

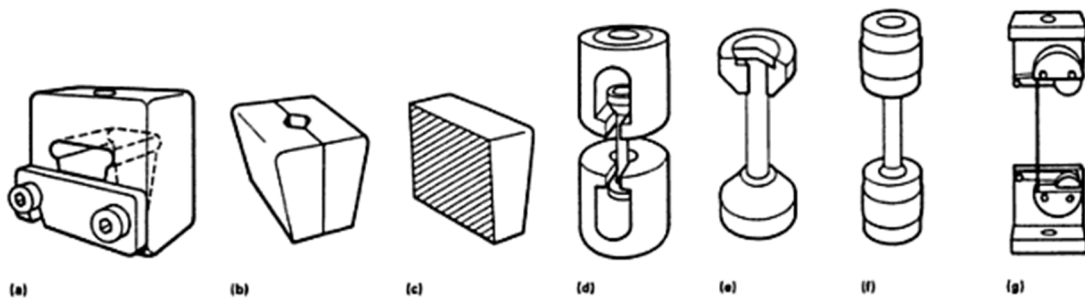


Figura 1.15 - Tipo de apertos para ensaios de fadiga axiais (Boyer, 1986).

Os motores passo-a-passo desempenham um papel importante entre as máquinas com sistema de acionamento elétrico. Os motores passo-a-passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos angulares discretos. O rotor de um motor passo-a-passo é girado em pequenos incrementos angulares designados por “passos”. A rotação do motor é executada em função dos impulsos elétricos que são recebidos, assim como da sequência na qual os impulsos são aplicados. A velocidade de rotação do rotor é dada pela frequência de impulsos recebidos e pelo ângulo de rotação (Brites & Santos, 2008). Já o número de dentes no rotor e no estator, determina o ângulo do passo que irá ocorrer cada vez que a polaridade dos enrolamentos do estator estiver invertida. Quanto maior o número de dentes, menor o ângulo do passo (Simpson, 1996). Existem três tipos de motores deste género:

- Motor passo-a-passo de íman permanente: funciona sob uma reação entre um rotor de um íman permanente e um campo eletromagnético, que é gerado por estator. É importante referir que o rotor neste tipo de motores não possui dentes, podendo-se considerar liso na superfície (Brites & Santos, 2008). Uma particularidade deste tipo de motores é o facto de o seu binário ser remanescente e conseguir mantê-lo numa posição específica quando é desligado (Simpson, 1996). A Figura 1.16 representa um motor passo-a-passo de íman permanente, estando no centro o rotor sem dentes, como já foi referido, e à sua volta, o estator com quatro bobinas;

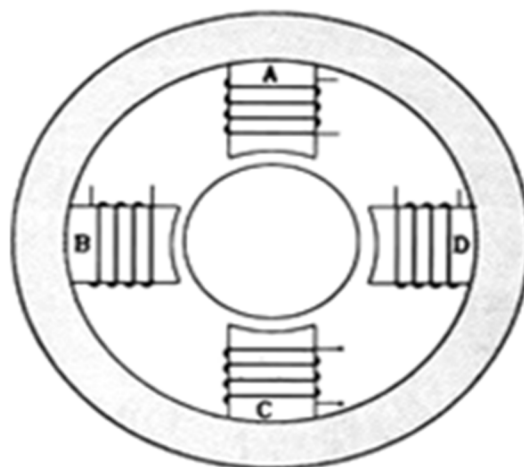


Figura 1.16 - Representação de um motor de íman permanente(Simpson, 1996).



Motor passo-a-passo de relutância variável: em relação ao motor do tipo anterior, difere sobretudo no facto de apresentar um rotor de ferro com vários dentes (Brites & Santos, 2008). Já o seu estator é bastante idêntico ao motor passo-a-passo de ímã permanente. Quando as bobinas do estator são energizadas, os dentes do rotor vão-se alinhar com os seus pólos que também são igualmente energizados. Este tipo de motores funciona com o princípio de minimizar a relutância ao longo do seu percurso magnético. Alternando os enrolamentos que recebem energia do estator, o seu campo magnético altera-se e o rotor é movido para uma nova posição (Simpson, 1996). A relação entre o ângulo do passo e os números de dentes do rotor e do estator é dada por:

$$\psi = \frac{N_s - N_r}{N_s \times N_r} \quad (1.9)$$

sendo que  $N_s$  representa o número de dentes do estator,  $N_r$  o número de dentes do rotor e  $\psi$  o ângulo de cada passo. Na Figura 1.17 está representado um motor passo-a-passo de relutância variável com quatro dentes no rotor e com seis enrolamentos no estator. Pode-se também visualizar uma tabela, que permite identificar a posição de cada dente do rotor ao longo de uma volta no motor;

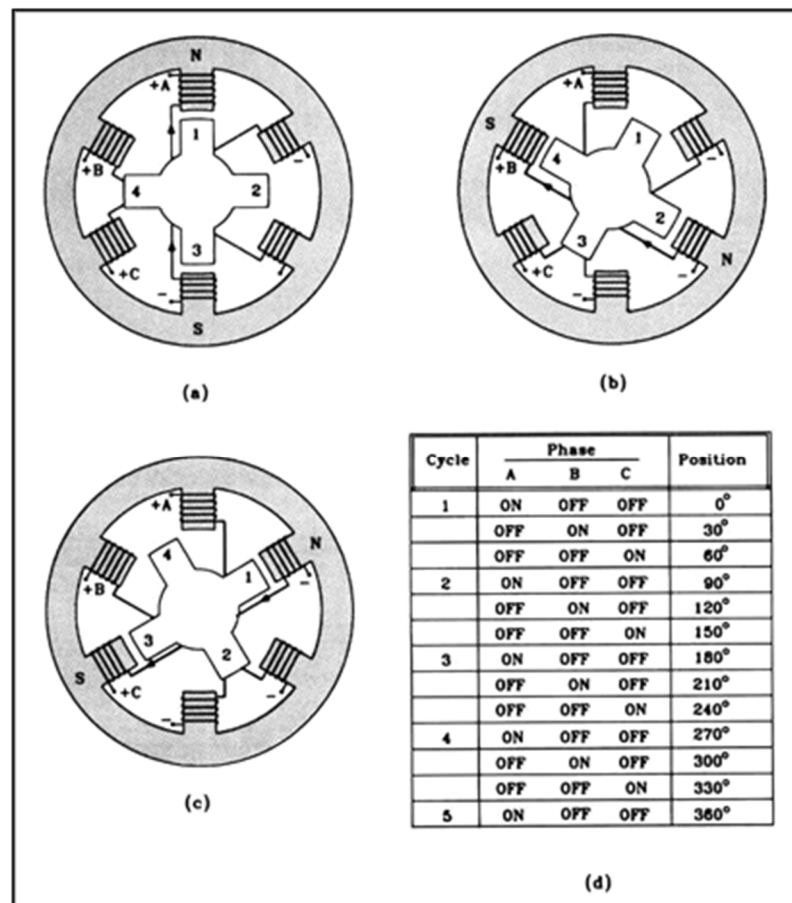


Figura 1.17 - Representação do movimento de um motor passo-a-passo de relutância variável: a) posição 0° graus; b) posição 30° graus; c) 60° graus; d) tabela dos ângulos das posições de dente do rotor no motor passo-a-passo (Simpson, 1996).

- Motor passo-a-passo híbrido: este motor é conhecido por combinar as melhores características dos dois tipos de motores já descritos. O rotor é multidentado como no motor de relutância variável e contém um íman permanente em redor do seu eixo. O estator do mesmo modo, também apresenta vários dentes, só que com ranhuras, como se pode verificar na Figura 1.18. Neste motor, os ângulos de passo típicos estão compreendidos entre  $0,9^\circ$  a  $3,6^\circ$  (100-400 passos por volta) (Brites & Santos, 2008).

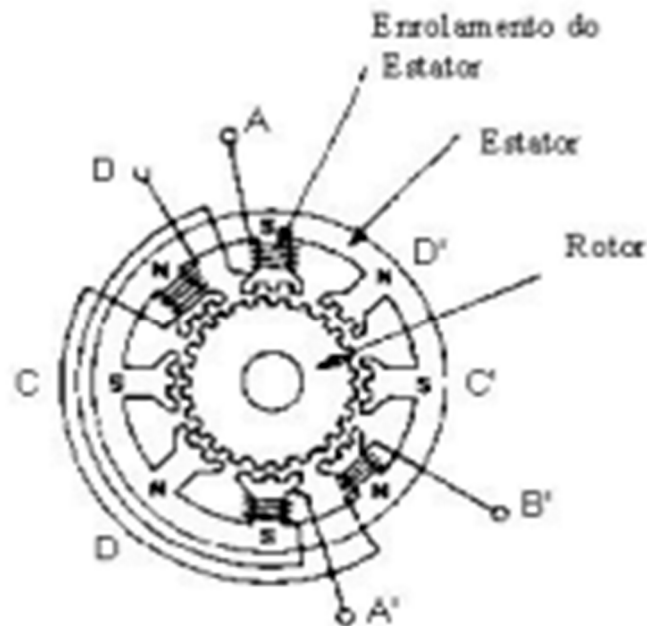


Figura 1.18 - Representação de um motor passo-a-passo híbrido. (Brites & Santos, 2008)

## 1.5 Considerações finais

A revisão bibliográfica foi realizada com o intuito de conhecer melhor a “fadiga mecânica”, sobretudo no que diz respeito às formas de caracterizar o comportamento dos materiais. Pretende-se neste trabalho tornar funcional uma MEF que foi oferecida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, sendo que foi importante estudar adaptações possíveis de efetuar neste tipo de equipamentos, de forma a realizar diferentes tipos de ensaios de fadiga. De facto, o objetivo é posteriormente utilizar a MEF para realizar ensaios em amostras metálicas e compósitas.

---

*Capítulo 2*  
*Máquina de ensaios de fadiga*

## Capítulo 2 Máquina de ensaios de fadiga

### 2.1 Estrutura inicial

O Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro foi presenteado com uma máquina de ensaios universal. Contudo, esta estava inicialmente inativa. Este trabalho teve por finalidade recuperar o equipamento, adaptando-o a ensaios de fadiga e melhorando-o tanto a nível mecânico como a nível elétrico.

Numa primeira fase, a MEF apresentava a estrutura que está representada na Figura 2.1. Como se pode verificar, esta não possuía dispositivo de contacto com o provete. No entanto, a máquina já tinha acoplado um motor passo-a-passo na sua parte inferior, e uma célula de carga no travessão móvel. Podem-se visualizar de uma maneira mais explícita como aqueles dispositivos estão acoplados na máquina (ver Figura 2.2 e Figura 2.3).



Figura 2.1 - Estrutura Inicial da máquina de ensaios de fadiga.



Figura 2.2 - Célula de carga acoplada no travessão móvel.



Figura 2.3 - Motor passo-a-passo acoplado na máquina.

A MEF pode ser movida através de rodas e tem uma altura de 158 cm desde a sua parte superior até à mesa onde está acoplado o motor passo-a-passo. Essa mesa tem uma forma aproximadamente quadrangular, sendo que as suas medidas são de 738 mm x 728 mm. A zona de trabalho, ou seja, a área onde é colocado o suporte de provetes, tem uma forma retangular cujas medidas são de 407 mm x 179 mm.

A parte superior da máquina é unida através de quatro varões de suporte à mesa que engloba o motor passo-a-passo. O movimento do travessão é garantido por dois fusos trapezoidais (TR24x5) através do motor passo-a-passo (Ver Anexo A). Estes fusos estão associados a duas polias dentadas com um diâmetro aproximado de 200 mm e interligadas entre si através de uma correia, como se pode verificar na Figura 2.4. O motor passo-a-passo está ligado a uma polia lisa com 37,5 mm. Por fim, ao seu lado esquerdo está localizado um veio interligado a uma polia lisa de aproximadamente 200 mm. Este veio tem como finalidade verificar qual o sentido de rotação do motor, associando-o ao movimento de subida ou descida do travessão móvel onde está inserido a célula de carga.



Figura 2.4 - Parte inferior da MEF.

### 2.1.1 Motor passo-a-passo

O motor passo-a-passo que vinha acoplado à MEF, com a referência BSHB3913 – H, é de natureza híbrida e possui um binário de 6 N.m (ver Figura 2.5). Este, em conjunto com a transmissão por polia e as características do fuso, estabelecem a velocidade do travessão. As suas especificações e principais características estão representadas no Anexo B.



Figura 2.5 - Motor passo-a-passo BSHB3913 (BSJD, 2015).

### 2.1.2 Célula de carga

Uma célula de carga é um dispositivo que converte um deslocamento mecânico num sinal elétrico. Para isso possui sensores designados por extensómetros que são soldados em superfícies e dispostos num circuito elétrico denominado por ponte de *wheatstone* (Procter & Chester, 2012). Este tipo de circuito é frequentemente encontrado em aparelhos de

medição. A resistência dos extensómetros varia em função da deformação superficial a que a célula de carga está sujeita. (Rizzoni, 2009)

Na Figura 2.6 está representada a disposição dos extensómetros numa ponte de *wheatstone*, sendo que os pontos 1 e 3 da ponte de *wheatstone* correspondem às tensões de excitação e pontos de 2 e 4 correspondem às tensões de sinal de saída. É importante referir que, apesar da variação das suas resistências, a tensão de saída é proporcional à força que é aplicada na célula de carga (All About Circuits, 2015).

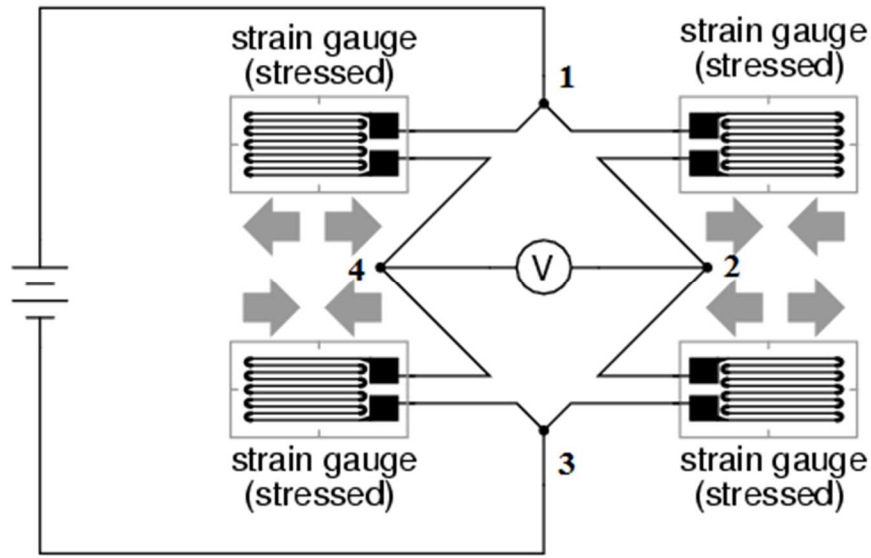


Figura 2.6 - Disposição dos extensómetros na ponte de *wheatstone* (All About Circuits, 2015).

A célula de carga utilizada no travessão móvel da MEF foi uma *Pancake Load Cell* do modelo BD-PLC-S-1200, que pode ser utilizada tanto em ensaios de fadiga, como também em ensaios quase-estáticos. Na Figura 2.7 está representado um exemplo de uma célula de carga idêntica à que foi utilizada na MEF. No Anexo C apresenta-se as suas principais características e especificações técnicas.



Figura 2.7 - Célula de carga do tipo Pancake Load Cell (Procter & Chester, 2012).

## 2.2 Intervenções na máquina de ensaios de fadiga

No sub-capítulo anterior foi descrita a estrutura inicial da MEF, completamente inapta para a realização de qualquer tipo de ensaio. Neste sub-capítulo pretende-se abordar todas as alterações que foram necessárias implementar de modo a torná-la operacional com a garantia de segurança na realização de um ensaio de fadiga. Com o auxílio de alguns dispositivos elétricos, da construção de componentes adicionais e, essencialmente, através de *softwares* de controlo e de envio de dados, foi possível tornar a máquina funcional.

### 2.2.1 Intervenções na componente elétrica

As intervenções de carácter eléctrico tiveram uma importância fundamental na geração do movimento do travessão pelo fuso trapezoidal. Para tal recorreu-se ao *software* que envia dados para a plataforma Arduino, que se encontra localizada no quadro eléctrico, a ser alimentada. Por sua vez, os seus *outputs* são enviados para o driver que transmite ao motor passo-a-passo o sentido no qual o travessão se vai movimentar. Em sentido inverso, a força aplicada na célula de carga é lida num programa de controlo instalado no computador com o auxílio de uma carta de aquisição. Na Figura 2.8 está representada a disposição dos componentes no quadro eléctrico.

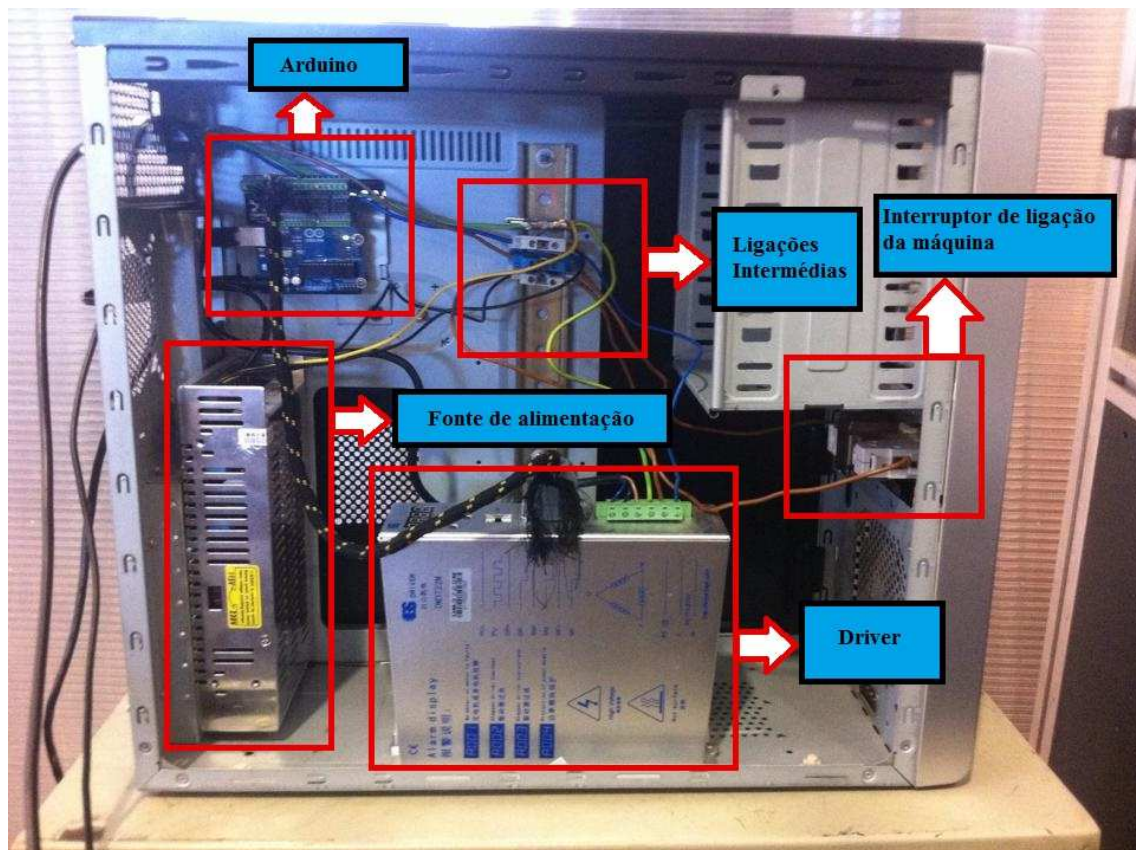


Figura 2.8 - Quadro Elétrico.

Na Figura 2.9 está representado um esquema que relaciona os elementos envolvidos no processo de movimentação do travessão da MEF. No Anexo D está representado o esquema eléctrico do circuito de todos os componentes eléctricos.



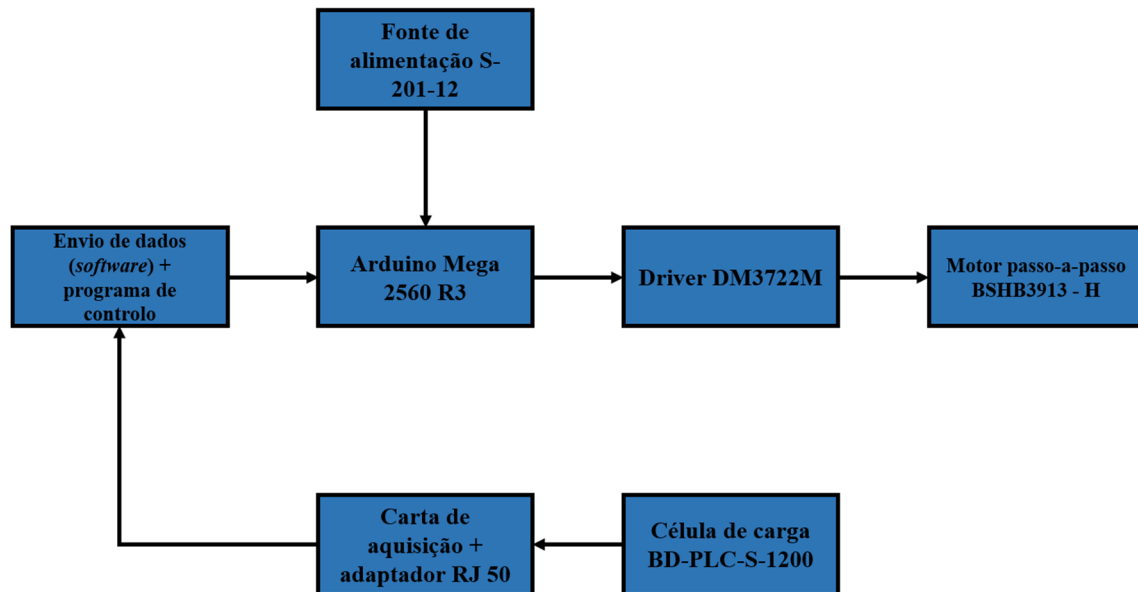


Figura 2.9 - Esquema de ligação dos componentes elétricos.

### 2.2.1.1 *Arduino Mega 2560 R3*

Para controlar o movimento do motor passo-a-passo, com a amplificação do sinal através do driver, foi necessário recorrer a um microcontrolador. Foi então utilizada inicialmente uma plataforma designada Arduino Uno Rev 3, que foi programada através de um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) *open-source* utilizando linguagem C proveniente do *software* de computação.

Devido à baixa memória de armazenamento da plataforma Arduino Uno Rev 3, esta foi depois substituída pela plataforma Arduino Mega 2560 R3. (ver Figura 2.10) Devido aos problemas de comunicação, principalmente na leitura de dados no *software*, adicionou-se um cabo USB 2 serial converter que por sua vez foi ligado a uma plataforma USB Serial Light Adapter (ver Figura 2.11). Esta opção deveu-se ao facto do *software* não disponibilizar mais do que uma porta USB virtual, sendo que uma delas tem como função transferir dados para a plataforma e outra de fazer a leitura dos dados da mesma. Sem a utilização deste componente adicional, quando se pretendia ler a informação presente na plataforma, o *software* assumia que a porta USB já estava ocupada.



Figura 2.10 - Plataforma Arduino Mega 2560 R3 (Arduino, 2015).

O Arduino / Mega Genuino 2560 R3 é uma placa que contém o microcontrolador ATmega2560, possui 54 pinos digitais de entrada / saída (dos quais 14 podem ser usados como saídas PWM – *Pulse With Modulation*), 16 entradas analógicas, 4 portas séries de *hardware*, um cristal oscilador de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP (*In Circuit Serial Programming header*), e um botão de *reset*. Esta plataforma contém tudo o que é necessário para suportar o microcontrolador; basta conectá-lo a um computador com um cabo USB ou ligá-lo com um adaptador AC-DC ou a uma bateria (Arduino, 2015). O Arduino / Mega Genuino 2560 R3 tem as seguintes características:

- Tamanho: 101.52 x 53.3 mm;
- Peso: 37 g;
- Microcontrolador: ATmega2560;
- Tensão de operação: 5V;
- Tensão de entrada (recomendada): 7-12 V;
- Tensão de entrada (limites): 6 – 20 V;
- Pinos de entrada/saída digitais: 54 (15 podem ser usados como saídas PWM)
- Pinos de entrada analógica: 16;
- Corrente DC por pino entrada/saída: 40 mA;
- Corrente DC para o pino de 3.3 V: 50 mA;
- Memória *Flash*: 256 KB;
- SPRAM: 8 KB;
- EEPROM: 4KB;
- Frequência de *clock*: 16 MHz.

A plataforma USB Serial Light Adapter converte uma conexão USB numa série TX e RX de 5 volts que pode ser diretamente ligado a um Arduino Mini, Arduino Ethernet ou outro tipo de microcontroladores, permitindo-lhe comunicar com o computador. Possui um microcontrolador Atmega8U2 programado como um conversor de USB para série. Este microcontrolador é o mesmo que é encontrado no Arduino Uno. Esta plataforma possui um conector mini-USB e 5 pinos, incluindo RX (para receber dados do computador), TX (para transmissão de dados), o pino de 5V, o pino terra e o pino reset (Arduino, 2015).

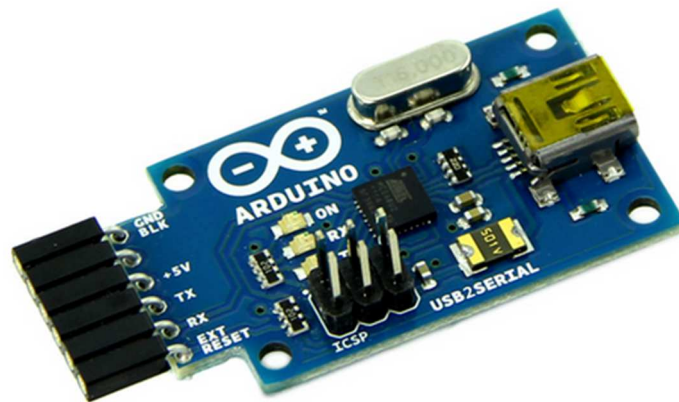


Figura 2.11 - Plataforma USB Serial Light Adapter (Arduino, 2015).

### 2.2.1.2 *Driver*

O driver tem como principal função controlar e alimentar o motor passo-a-passo que está acoplado na MEF, amplificando a corrente que é recebida do microcontrolador presente no arduino. A necessidade do driver deve-se à incapacidade do microcontrolador em controlar um motor passo-a-passo daquela dimensão, pois as suas intensidades de corrente são abaixo das desejadas. O driver utilizado no quadro elétrico foi o DM3722M da empresa Shenzhen Baishan e está representado na Figura 2.12. Este driver tem a particularidade de ser programado através de um painel, no qual se pode identificar várias variáveis, que podem influenciar o sentido e a velocidade de rotação do motor. O manual do driver, assim como as suas especificações técnicas e principais características podem ser consultados no Anexo E.



Figura 2.12 - Driver DM3722M (BSJD, 2015).

### 2.2.1.3 *Fonte de alimentação S-201-12*

A fonte de alimentação apresentada na Figura 2.13 pode ser amplamente utilizada em automação industrial, em controlo numérico por computador (CNC), assim como em motores passo-a-passo e sistemas servo-hidráulicos. Algumas funções, como por exemplo o controlo *PWM – Pulse With Modulation* e alguns projetos profissionais garantem alta eficiência e alta fiabilidade deste dispositivo. O seu baixo custo também torna esta fonte de alimentação mais aceitável para um uso geral (Stepper Online, 2015).

A colocação desta fonte de alimentação no quadro elétrico tem como principal finalidade alimentar o microcontrolador do Arduino Mega 2560 R3, através do pino  $V_{in}$ , produzindo 201 W e 12 V em corrente contínua (CC). Deste modo, é possível garantir o funcionamento do microcontrolador sem existir qualquer conexão da fonte com o

computador. As suas principais características e especificações técnicas podem ser consultadas no Anexo F.



Figura 2.13 - Fonte de Alimentação S – 201 – 12 (Stepper Online, 2015).

#### 2.2.1.4 Carta de aquisição

A alimentação da célula de carga e a aquisição de dados, que são enviados do programa de controlo LabVIEW, é feita através do módulo de ponte NI – 9237 (ver Figura 2.14) que é montado ao chassi NI cDAQ-9178 (ver Figura 2.15 e Figura 2.16), através de uma fonte de tensão que pode ser ajustada no *software* de controlo e por uma série de filtros para aperfeiçoamento de um sinal. Este é posteriormente convertido por um ADC (*Analog to Digital Converter*) numa resolução de 24 *bits* e enviado para o computador. O módulo NI – 9237 possui quatro portas de entradas RJ50. Através de um adaptador é possível fazer a aquisição do sinal da célula de carga com o auxílio do programa de controlo LabVIEW. Os fios são ligados a um adaptador RJ50 (ver Figura 2.17) com uma configuração de uma ponte *wheatstone*. Os fios de ligação de excitação são os de cor vermelha, de cor castanha e de cor verde. O fio de cor vermelha entra no canal 6 do adaptador, e no canal 7 entram dois fios, um de cor castanha e outro de cor verde. Os fios relativos aos sinais de saída são o fio branco e o fio preto, sendo que o primeiro dos quais entra no canal 2 e o segundo entra no canal 3 do adaptador. O manual do módulo NI – 9237 e as suas especificações técnicas encontram-se no Anexo G.



Figura 2.14 – Módulo NI-9237 (National Instruments, 2015).



Figura 2.15 – Chassi NI cDAQ-9178 (National Instruments, 2015).



Figura 2.16 – Módulo NI-9237 acoplado no Chassi NI cDAQ-9178.



Figura 2.17 – Adaptador RJ50.

### 2.2.2 Intervenções na componente mecânica

Durante o trabalho foi necessário implementar várias alterações de índole mecânicas que tinham como finalidade melhorar a construção da MEF. Elaborou-se então um projeto mecânico de um suporte de provetes e de um elemento de fixação de amarras ao travessão onde estava acoplada a célula de carga. Deste modo, tanto o suporte, como o fixador de amaras, foram modelados no *software SolidWorks 2014* versão estudante. Os desenhos técnicos de todos os componentes envolvidos no ensaio de fadiga podem ser consultados no Anexo H.

### 2.2.2.1 *Suporte de provetes*

Tendo em vista avaliar o paralelismo entre a mesa da máquina e o travessão móvel, decidiu-se que o melhor tipo de ensaios de fadiga a realizar seriam os ensaios à flexão. Assim, realizou-se o projeto de um suporte de provete composto, por uma base que é presa à mesa da máquina através de parafusos M14. Posteriormente, é montado um carril, no qual é possível regular a medida de ajuste do comprimento do provete. O comprimento máximo possível de medição é 180 centímetros. O carril foi acoplado à base através de parafusos M8, como se pode visualizar na Figura 2.18.



Figura 2.18 - Carril acoplado à base.

Prosseguindo com a montagem do suporte, o passo seguinte passou pela ligação de dois componentes laterais através de parafusos M10, sendo que no interior do carril foram colocadas porcas para a que montagem fosse bem-sucedida. Ambos os componentes têm exatamente as mesmas medidas (ver Figura 2.19) e têm como principal objetivo permitir o apoio do provete em dois roletes de 6 mm de diâmetro que são presos através de duas molas. Além disso, estes componentes posicionam o provete na direção da sua largura, através de dois grampos montados com parafusos M4, como se pode observar na Figura 2.20.



Figura 2.19 - Componentes de fixação do provete na sua largura acoplados ao carril.



Figura 2.20 - Sistema de posicionamento na direção da largura do provete.

De seguida, foram montados lateralmente mais dois componentes, exatamente do mesmo modo dos anteriores. Nestes componentes laterais, foram montados sistemas de posicionamento do provete na direção do seu comprimento. Por sua vez, são montados dois grampos, um em cada extremidade através de um parafuso M4. (ver Figura 2.21)

Por fim, e como se pode visualizar na Figura 2.22, está o provete posicionado e preparado para um ensaio.



Figura 2.21 - Sistema de posicionamento na direção do comprimento do provete.

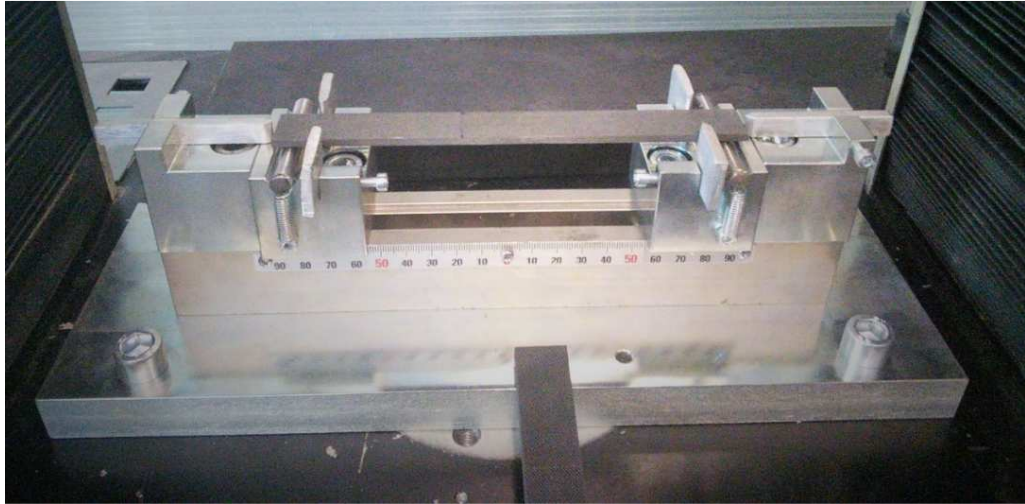


Figura 2.22 - Suporte com o provete preso e apto para a realização do ensaio.

Todos os componentes do suporte foram maquinados no centro de maquinagem *MIKRO VCE 500* na oficina do Departamento de Engenharia Mecânica (ver Figura 2.23) As molas foram fornecidas pela empresa Servimolas, situada em Águeda. Os grampos de posicionamento do provete são em aço inoxidável. Já o material dos restantes componentes é o aço DIN CK 45. Todos os componentes foram sujeitos a um tratamento de eletrozincagem, exceto os grampos. Os furos onde encaixam os parafusos M4 foram roscados, tal como os furos do carril para ligação à base, e os furos da base para ligação à mesa da MEF.



Figura 2.23 - Centro de Maquinagem MIKRON VCE 500 (multipino plataforma B2B, 2015).



### 2.2.2.2 *Fixador de amarras ao travessão da MEF*

Projetou-se um componente que, ligado ao travessão permitisse a fixação de amarras ou de elementos de carregamento do provete. A sua montagem é bastante simples pois, no seu topo, a parte interior é roscada para ligação à célula de carga. Com o auxílio de um parafuso M8 que é colocado perpendicularmente ao travessão móvel, é possível finalizar esta etapa da montagem.

Por fim, é colocado um parafuso M10 perpendicular ao parafuso anterior que serve para a ligação das amarras, e também como um elemento de carregamento no provete. (ver Figura 2.24)



Figura 2.24 - Fixador a ligar ao travessão da MEF.

Este componente é de aço DIN CK 45 e foi maquinado no centro de maquinagem MIKRON VCE 500. A porca superior do componente foi soldada pelo processo de soldadura MIG e a laser. Por fim, o fixador foi sujeito a um tratamento de eletrozincagem.

### 2.2.3 **Intervenções na componente de controlo e aquisição de dados**

Depois de realizadas todas as intervenções a nível elétrico e mecânico, tratou-se do controlo e da aquisição de dados. De facto, tanto a componente elétrica como a componente mecânica estão dependentes das instruções enviadas do programa de controlo que está instalado no computador.

Para a realização desta componente do trabalho criou-se uma interface entre os *softwares* arduino e o LabVIEW 2013 através de uma *drive* da *National Instruments*. Estes dois *softwares* são completamente distintos uma vez que, em LabVIEW o tipo de programação usada são os diagramas de blocos e em arduino é implementado um código em linguagem C.

O LabVIEW 2013 é um programa de controlo sofisticado que permite visualizar as cargas que estão a ser lidas na célula de carga em tempo real. Neste programa é feita a configuração da célula de carga, a escolha da frequência de aquisição e a gravação dos dados registados. Este *software* permite controlar manualmente (modo manual) e automaticamente (modo automático) o movimento do travessão da MEF, sendo que apenas pode estar em funcionamento um desses modos.

Através da função *Al Force Bridge (Table)* é possível definir a ponte de *wheatstone* completa que está implementada no interior da célula de carga, assim como a sua tensão excitação (5 V) e a sua resistência interna (120  $\Omega$ ). Dentro deste diagrama de bloco foi também colocada uma tabela de calibração da célula de carga e o *input* que identifica a porta USB relativa ao canal do módulo NI – 9237.

De seguida, deve ser também definida a frequência de aquisição que permite calibrar a célula de carga, obtendo-se a leitura de valores reais de acordo com a tensão que é aplicada. O botão da calibração automática ativo permite ao programa LabVIEW voltar ao valor de carga de 0 N quando este é reiniciado.

Durante a realização do ensaio é também criado um ficheiro TDMS, no qual é necessário registar um nome e localização. Este ficheiro regista o valor de carga aplicada durante o ensaio e, posteriormente, estes valores são lidos no Excel, onde se cria o gráfico da carga aplicada em função do tempo do ensaio. As cargas aplicadas são também lidas em tempo real num gráfico que está localizado no painel frontal do LabVIEW.

O Arduino é uma plataforma programável em linguagem C que vai receber instruções do LabVIEW 2013, transmitindo depois as ordens de movimento a realizar pela MEF. O código em linguagem C é enviado para a plataforma através da porta USB existente no Arduino Mega. No *software* é obrigatória a identificação dos pinos de entrada digital que são usados na plataforma, sendo que um deles irá fazer com que o travessão da MEF suba, e outro fará com que este desça. Esta comunicação ocorre com um *baudrate* de 9600. Já o USB Serial Light Adapter ocupa dois pinos de entrada analógica, e têm como finalidade visualizar no monitor série os dados relativos às cargas máximas e mínimas aplicadas e à contagem dos impulsos do motor passo-a-passo enquanto o travessão se movimenta para qualquer um dos sentidos.

No Anexo I está representado o programa de LabVIEW que se destina a controlar o movimento da MEF. No Anexo J pode ser consultado o programa completo que foi executado no arduino.

Na Figura 2.25 é apresentado um esquema que indica todos os procedimentos que devem ser seguidos para que a comunicação entre o arduino e o LabVIEW seja bem-sucedida, assim como a sequência correta dos botões no programa de controlo.

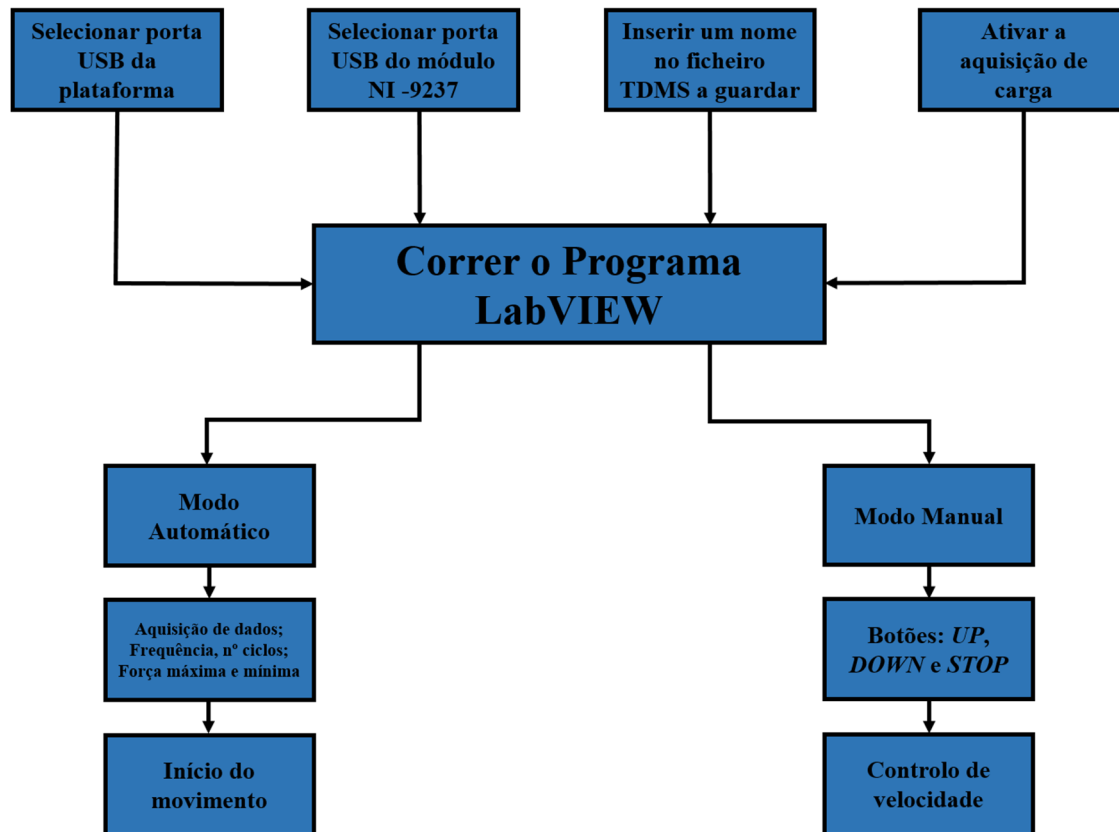


Figura 2.25 - Esquema da sequência do programa de controlo LabVIEW.

### 2.2.3.1 *Controlo Manual*

O controlo manual é uma componente que tem como principal finalidade colocar o travessão na posição “zero”, ou seja, quando o travessão fica em posição de aplicar o carregamento ao provete que irá ser ensaiado. Para atingir esta posição foi criado um modo de controlo de velocidade que faz com que esta seja regulada consoante a distância do travessão até ao provete. Isto é, se o travessão estiver a uma distância elevada do provete, tende-se então a aumentar a velocidade para que a aproximação seja rápida. Quando o travessão está bastante perto da posição “zero”, tende-se a diminuir a velocidade da máquina, de modo a que o fixador de amarras não flexione o provete.

No que diz respeito ao movimento da máquina, este modo de controlo tem também outro objetivo muito importante, pois os seus botões devem ser utilizados em situações urgentes durante um ensaio de fadiga. Um exemplo concreto desta situação é quando, deixa de existir comunicação entre a carta de aquisição e o *software* LabVIEW. Neste caso, o LabVIEW deixa de ler as cargas aplicadas no provete, pelo que o travessão irá descer infinitamente em modo automático sem qualquer sinal para indicar o movimento contrário. Esta situação pode-se tornar bastante delicada, uma vez que se a máquina não for desligada no interruptor, o travessão pode quebrar por completo o provete ficando sem qualquer efeito o ensaio que estava a ser realizado, assim como danificar a célula de carga devido ao seu embate na mesa. Para evitar a paragem do movimento do travessão da célula desse

modo indesejável, ativa-se no LabVIEW o modo manual, clicando então no botão de subir para posteriormente ser possível realizar outro ensaio de fadiga.

No painel frontal do LabVIEW, estão presentes três botões para o modo manual: um botão indica a subida do travessão, outro que indica a descida e por fim temos um botão que pretende parar o movimento da máquina. Na zona dos diagramas de blocos é programada a forma como os botões devem atuar, assim como a interface com o *software* arduino. Dentro de um *loop*, estão expostas as *cases structures* relativamente ao modo automático, assim como ao modo manual. Foi criado um botão designado por *Manual/Automático* que tem como finalidade enviar um valor numérico que pode ser o número 1 ou o número 0. O valor 1 corresponde ao modo manual e o valor 0 ao modo automático. Este valor é enviado para uma outra *case structure*, por intermédio de uma variável local. Em todas as *cases structures* foram colocados temporizadores, de modo a não provocar ruído no motor passo-a-passo, reduzindo drasticamente a frequência máxima de trabalho da máquina, piorando a qualidade e a fiabilidade dos resultados.

É importante referir que todos estes botões funcionam através de um único clique, não sendo necessário manter premido o botão esquerdo do rato do computador. A utilização dos botões do controlo deve seguir uma sequência lógica, de modo a existir concordância quando se pretende mudar o sentido do movimento da MEF, tal como quando se pretende mudar a sua velocidade. A principal particularidade deste tipo de controlo é o facto de só ser possível ativar um botão de cada vez, e nunca dois em simultâneo. Caso aconteça essa situação ilógica, tem sempre prioridade o botão que foi ativado em primeiro lugar. Na Figura 2.26 está representada a sequência lógica da ativação dos botões no controlo manual da MEF.

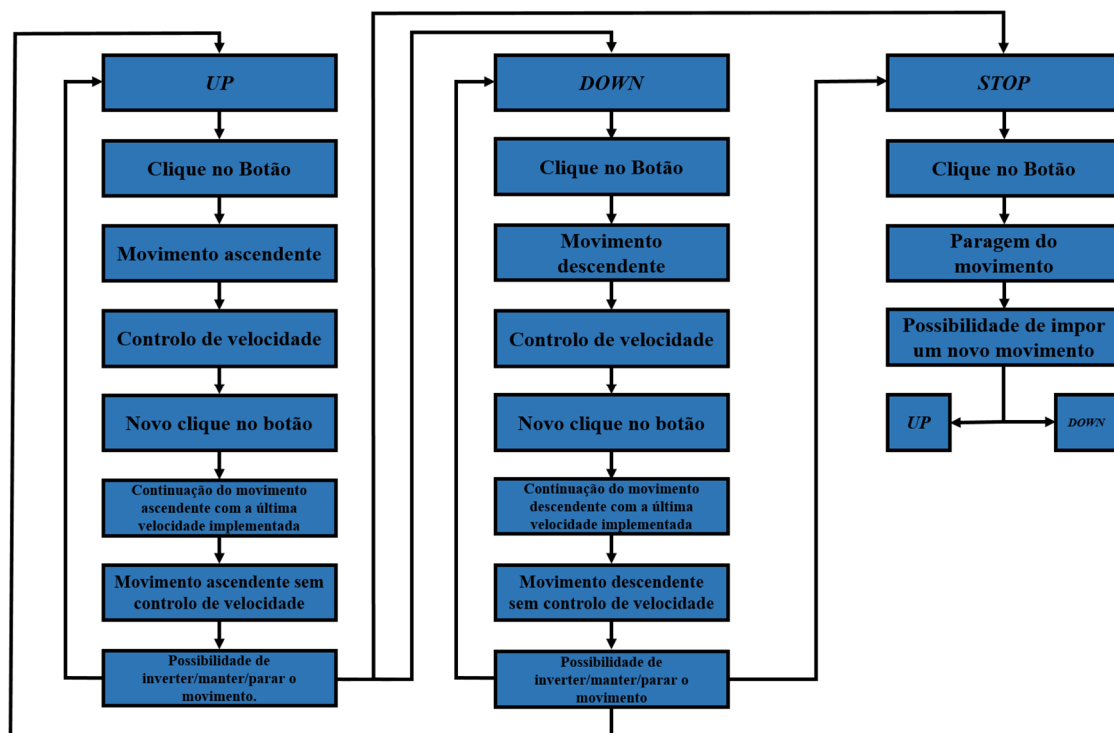


Figura 2.26 - Esquema com a sequência lógica dos botões manuais.

Quando o modo manual é ativado, na zona relativa aos diagramas de bloco estão representadas três *cases structures*, nas quais cada uma delas representa as funções a realizar pelos três botões que já foram referenciados. Em cada *case structure* é feita a interface com o *software* arduino, através do comando *VISA Serial*. No botão *UP* é enviada uma *string* para o arduino com a forma como apresentada na Tabela 2.1. Já no botão *DOWN*, a *string* enviada tem exatamente a mesma forma da do botão *UP*. A única diferença que os distingue é que a letra “s” pertence à *string* do botão *UP* e a letra “d” à do botão *DOWN*.

i	Velocidade do movimento	s/d
---	-------------------------	-----

Tabela 2.1 - *String* enviada para o arduino relativa aos botões *UP* e *DOWN*.

Esta diferença das duas *strings* deve-se ao facto de, no código implementado no arduino, ter-se criado uma *string* com um nome genérico relacionada com o modo manual, na qual permite ao motor passo-a-passo fazer subir a máquina quando recebe a letra “s” do programa de controlo LabVIEW, e fazer descer a máquina quando a última letra recebida é um “d”. Relativamente ao botão *STOP*, é enviada uma *string* com o formato da Tabela 2.2. A letra “u” de acordo com o programa arduino está diretamente relacionada com a paragem do movimento da máquina. É enviado um valor aleatório entre a letra “i” e a letra “u”, para verificar no monitor série do *software* arduino que esse sinal foi mesmo enviado pelo LabVIEW. A letra “i” pode ser a mesma para as *strings* de todos os botões, pois funciona como *input* recebido do programa de controlo, não havendo assim qualquer tipo de confusão na interface com o arduino. Quanto às restantes letras que foram referidas, essas têm obrigatoriamente de ser diferentes, pois comandam os diferentes movimentos executados pela máquina.

i	Valor aleatório	u
---	-----------------	---

Tabela 2.2 - *String* enviada para o arduino relativa ao botão *STOP*.

Depois de realizados todos os diagramas de bloco para os três diferentes tipos de botões, foram realizados vários testes para se validar a fiabilidade deste modo de controlo, pois de outra forma seria impossível adotar os seus procedimentos.

### 2.2.3.2 *Controlo Automático*

O controlo automático tem uma metodologia completamente diferente da do manual. Este movimento é totalmente comandado pelos valores que são lidos na célula de carga, como tal é necessário escolher qual o canal que está a ser ocupado no módulo NI – 9237. Ao contrário do que acontece no modo manual, neste modo de controlo a carta de aquisição tem um papel fulcral no que diz que respeito ao movimento da máquina, que consiste em transmitir ao programa de controlo os dados que são lidos na célula de carga. Este modo de controlo destina-se a ser utilizado para realizar o ensaio de fadiga, e foi programado em LabVIEW na zona de diagramas de blocos, que estabelece a lógica a implementar para garantir a fiabilidade do mesmo.

O funcionamento base deste modo de controlo passa por numa primeira fase, fazer a aquisição de dados no LabVIEW, que posteriormente são enviados para o arduino num formato de uma *string* através do *VISA Serial* no interior de uma *case structure*. Na Tabela 2.3 pode-se observar a *string* completa que é enviada para o arduino, onde estão expressos os dados importantes relativamente à realização de um ensaio de fadiga. A letra “t” está diretamente relacionada com a leitura no *software* arduino dos dados que foram enviados. Quando a *string* genérica no arduino recebe o *input* “t”, significa que a leitura dos dados foi efetuada com sucesso.

i	Frequência (Hz)	Nº de Ciclos	Força Máxima (N)	Força Mínima (N)	t
---	-----------------	--------------	------------------	------------------	---

Tabela 2.3 - *String* enviada para o arduino relativa à aquisição de dados.

De seguida, e para transmitir o movimento ao motor passo-a-passo, o botão *Manual/Automático* é premido de modo a ativar o modo automático. Este processo é implementado desta forma, devido ao simples facto de só ser possível fazer a aquisição dos dados quando o programa está no modo manual. Dentro de uma *case structure* é enviada uma nova *string* para o arduino onde estão implícitos os valores das forças aplicadas que são lidos na célula de carga. É utilizada novamente a função *VISA Serial*, de modo a que este passo seja bem-sucedido. Na Tabela 2.4 está representado o formato da *string* que é enviado para o arduino, e que fará movimentar a máquina. A letra “a” funciona como *input* do *arduino* que faz com que o movimento comece a ser efetuado na máquina.

i	Valor lido na célula de carga	a
---	-------------------------------	---

Tabela 2.4 - *String* enviada para o arduino relativa à carga lida na célula de carga.

Durante um ensaio em modo automático a MEF efetua vários ciclos de:

- Movimento descendente até ser atingida a carga máxima que se pretende aplicada ao provete;
- Movimento ascendente até ser atingida a carga mínima.

A duração do ensaio está dependente do número de ciclos que é selecionado na aquisição de dados, como também da frequência da máquina adotada.

Para testar o controlo automático da MEF, implementou-se um valor de frequência de 2 Hz, um número de apenas 5 ciclos, uma força máxima de 30 N e uma força mínima de 20 N. Note-se que este teste foi realizado sem que a célula de carga tenha sido calibrada, sendo que desse modo os valores lidos na mesma rondavam os 10 N, sem que alguma força estivesse a ser aplicada no travessão. O operador aplicou manualmente uma força que quando chegava aos 30 N de carga lida, levava o travessão móvel da máquina a subir. Quando a força era relaxada, a máquina efetuava logo um movimento descendente, concluindo então um ciclo. Repetido cinco vezes este procedimento, o travessão móvel estabilizou numa posição, permitindo verificar a fiabilidade deste modo de controlo, mesmo não se tendo efetuado a calibração da célula de carga.

---

*Capítulo 3*  
*Trabalho experimental*

### Capítulo 3 Trabalho experimental

Depois de ter sido demonstrada a fiabilidade dos modos de controlo manual e automático, realizou-se um ensaio de fadiga simples para validar a operacionalidade da máquina. Numa primeira fase, começou-se por calibrar a célula de carga e, numa segunda fase é que se efetuou esse ensaio.

#### 3.1 Calibração da célula de carga

Este processo é fundamental para a realização de um ensaio de fadiga. Para efetuar a calibração foi utilizada a máquina de ensaios à tração/compressão Shimadzu<sup>TM</sup> AGS-X STD (ver Figura 3.1) que se encontra no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica.



Figura 3.1 - Máquina de ensaios à tração/compressão Shimadzu<sup>TM</sup> AGS-X STD (Shimadzu, 2015).

No diagrama de blocos do LabVIEW relativo à aquisição de carga, está presente uma tabela que estabelece uma relação diretamente proporcional entre a tensão de saída da célula de carga ( $mV/V$ ) e a força aplicada ( $N$ ). Quando não era aplicada qualquer força na célula de carga, o LabVIEW lia valores a rondar os 10  $N$ . Como as especificações técnicas da célula de carga mereciam alguma reserva, tentou-se fazer inicialmente a calibração de



um modo manual para contornar o erro que era detetado no *software* LabVIEW (Ver Tabela 3.1).

$mV/V$	$N$
-5	-2500
0	0
5	2500

Tabela 3.1 - Tabela de calibração manual.

Posteriormente, a célula de carga teve de ser retirada do travessão da MEF e colocada na Shimadzu<sup>TM</sup> AGS-X STD, entre a mesa e o travessão móvel. No teste de calibração usaram-se dois calços para que a célula de carga não ficasse em contacto com a mesa da máquina de ensaios à tração/compressão (ver Figura 3.2).

Durante estes testes de calibração da célula de carga, foram-se registando valores de forças aplicadas ( $N$ ) que foram lidas na Shimadzu<sup>TM</sup> AGS-X STD e valores de tensão ( $mV/V$ ) lidos no programa de controlo LabVIEW (ver Tabela 3.2). Verificou-se que a regressão linear tinha um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de valor muito próximo de 1 (ver Gráfico 3.1). Há portanto uma proporcionalidade linear entre a tensão de saída e a carga aplicada, como era esperado.

Tensão ( $mV/V$ )	Carga ( $N$ )
0	0
3,53	11,65
6,48	23,89
12,03	47,02
17,75	71,02
23,50	94,95
30,38	123,65
37,25	152,35
44,13	181,08
51,00	209,85

Tabela 3.2 - Registo do tratamento de dados da calibração da célula de carga.

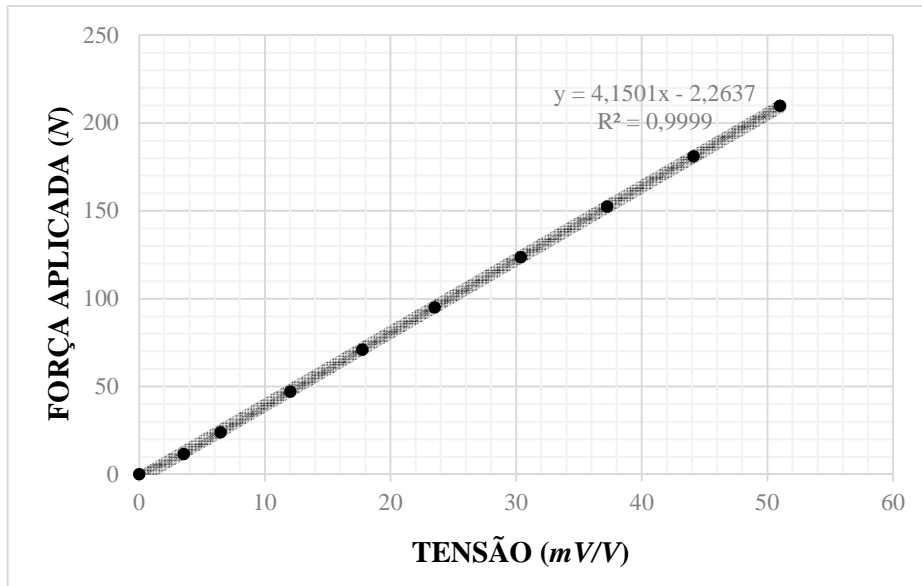


Gráfico 3.1 - Gráfico 2D da calibração da célula de carga.



Figura 3.2 - Calibração da célula de carga na ShimadzuTM AGS-X STD.

Para finalizar esta etapa, alterou-se os valores na tabela de calibração da célula de carga na zona de diagrama de blocos do LabVIEW. Esses foram calculados, pela multiplicação do declive da reta que foi traçada no Gráfico 3.1 por 1000, devido ao facto das unidades na

tabela de calibração estarem em  $mV/V$ . Na Tabela 3.3 estão apresentados os valores corretos relativamente à calibração que foi efetuada na célula de carga.

De seguida, este programa foi testado na Shimadzu<sup>TM</sup>, que já foi referida anteriormente, de modo a verificar se as tensões de saída correspondiam de às cargas aplicadas. Verificou-se que havia um desvio de cerca de 3 N, sendo que os valores reais eram maiores do que os valores lidos. Assumindo que a MEF, não será sujeita a mais de 500 N de força máxima, o erro associado a este desvio é de apenas 0,6 %, o que é aceitável.

Deste modo, o botão de calibração automática no *softawre* LabVIEW coloca a tensão de saída da célula de carga a 0  $mV/V$  no início do ensaio, retomando posteriormente a aquisição de dados.

$mV/V$	$N$
-5	-4150
0	0
5	4150

Tabela 3.3 - Tabela de calibração final.

## 3.2 Ensaio experimental

Após a calibração da célula de carga, realizou-se um ensaio de fadiga para validar os procedimentos anteriores e verificar a operacionalidade da MEF. Deu-se particular atenção a falhas de comunicação entre a célula de carga e o LabVIEW e a falhas no registo dos dados no monitor série do *software* arduino.

### 3.2.1 Provette utilizado

O provete utilizado no ensaio era constituído por camadas unidireccionais de pré-impregnado carbono/epóxico SEAL HS 160 REM (ver Figura 3.3). Foi obtido a partir de placas laminadas unidireccionais [0°] fabricadas no Instituto de Engenharia e Gestão Industrial (INEGI) por prensagem a quente. O provete tinha uma fenda inicial gerada pela inserção de um filme desmoldante de Politetrafluoretileno (PTFE) com 0,015mm de espessura durante a laminagem. O corte dos provetes foi efetuado por jato de água na empresa Descut-Design, ficando os provetes com as seguintes dimensões nominais: comprimento 180 mm, largura  $b=20$  mm e espessura  $2h = 3$  mm. O ensaio de flexão em três pontos foi portanto um ensaio *End-Nothced Flexure* (ENF) onde se adotou a distância entre apoios  $2L = 160$  mm e o comprimento de fenda inicial  $a \approx 40$  mm (ver Figura 3.4)



Figura 3.3 - Provete utilizado no ensaio de verificação.

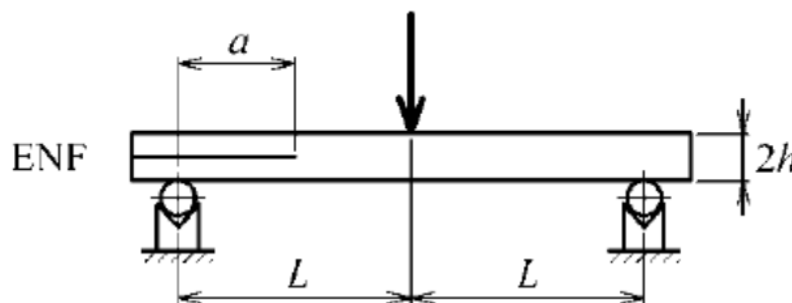


Figura 3.4 - Esquema representativo de um ensaio ENF (Pereira & Morais, 2008).

### 3.2.2 Tratamento de dados

O ensaio de fadiga que foi realizado teve as seguintes especificações: 1000 ciclos, força máxima de 30 N e força mínima de 27 N. O ensaio de fadiga foi iniciado da posição “zero”, ou seja, com o travessão completamente encostado ao provete. Na Figura 3.5 está representada uma fase do ensaio, numa posição ligeiramente inferior à posição inicial.

Durante o ensaio de fadiga à flexão, foram registados no monitor série do arduino, as forças máximas e mínimas aplicadas no provete em cada ciclo do ensaio. Foram também registados os impulsos dados pelo motor passo-a-passo durante o movimento descendente, assim como no movimento ascendente. Deste modo foram então calculados os deslocamentos em ambos os sentidos de movimento, pela equação 3.1. Os 750,5 mm são relativos à distância percorrida pelo travessão móvel, quando são enviados 3000000 impulsos no motor passa-a-passo à velocidade aproximada, à que se realizou o ensaio de fadiga.

Como era previsto, o ensaio teve erros associados. No que diz respeito às forças aplicadas no provete, a carga máxima foi de 31,61 N e a carga mínima foi de 25,09 N, sendo que apenas por cinco vezes é que se verificou os valores de 30 N e 27 N, para cada um dos casos. O valor médio das cargas mínimas foi de 26,42 N e das cargas máximas foi de 30,46 N. Relativamente aos deslocamentos, tanto no movimento descendente, como ascendente, os seus valores médios foram de 0,428 mm e o seus erros médios de 0,1 micrómetro. O deslocamento no movimento ascendente variou ente 0,279 e 0515 mm, sendo que no movimento descendente variou entre 0,271 e 0,597 mm.

$$Deslocamento = Nimp * \frac{750,5}{3000000} \quad (3.1)$$



Figura 3.5 - Ensaio de verificação.

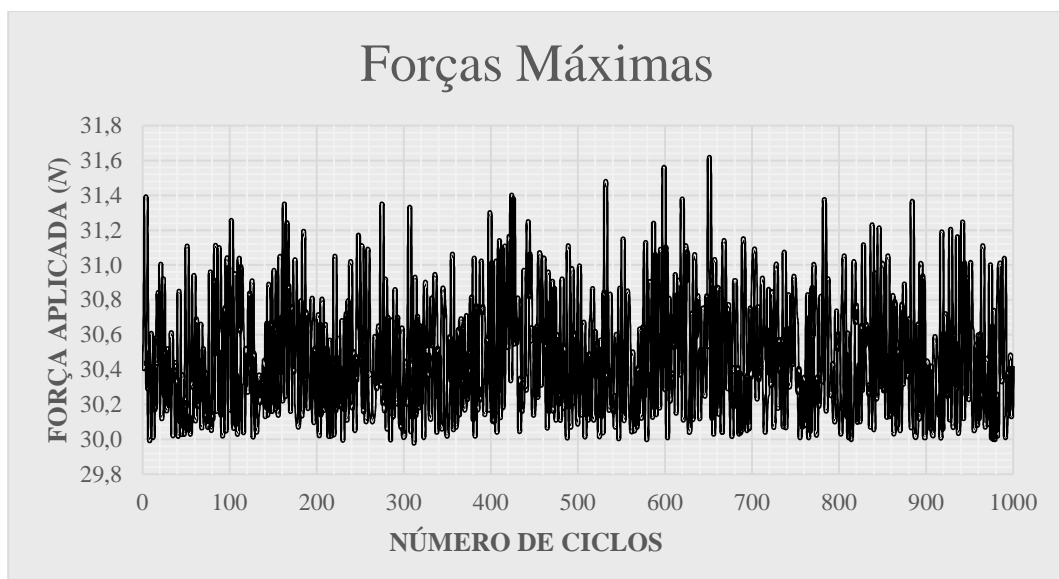


Gráfico 3.2 - Representação das forças máximas aplicadas.

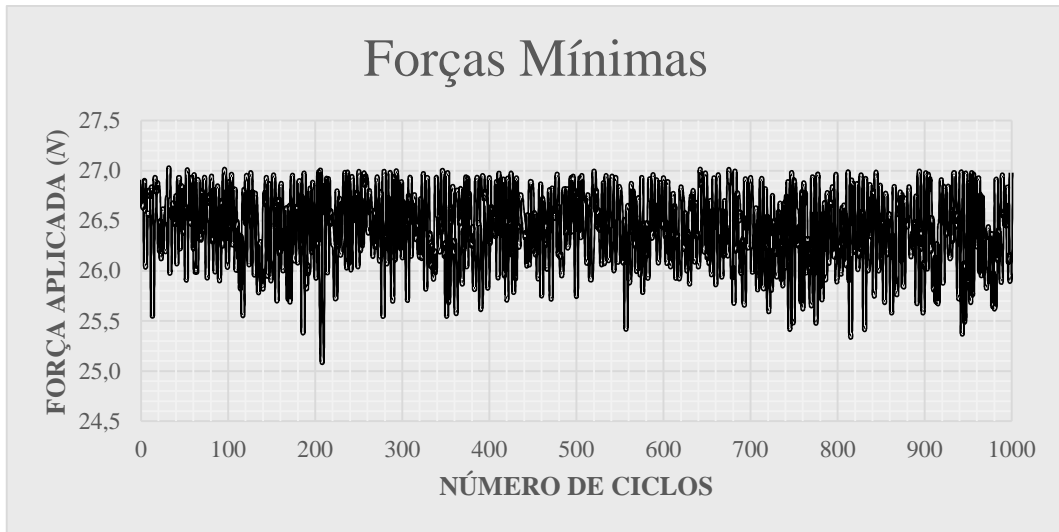


Gráfico 3.3 - Representação das forças mínimas aplicadas.

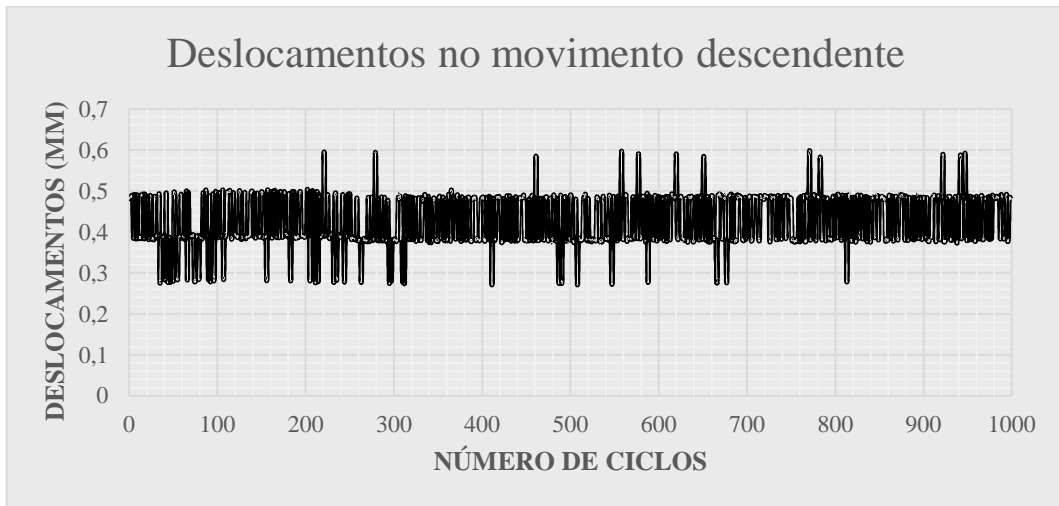


Gráfico 3.4 - Representação dos deslocamentos no movimento descendente.

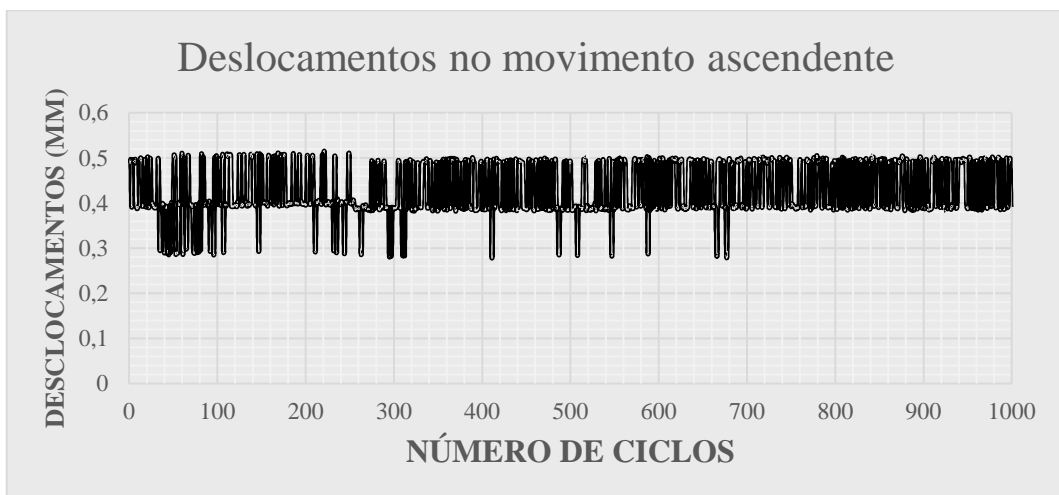


Gráfico 3.5 - Representação dos deslocamentos no movimento ascendente.

Posteriormente a estes resultados, foi então calculada a velocidade do travessão da máquina durante o ensaio de fadiga, usando a equação 3.2.

$$Velocidade = \frac{0,856}{3424 * 0,00005} \left( \frac{mm}{s} \right) \quad (3.2)$$

Na equação 3.2, 0,856 mm foi o deslocamento médio do provete e 3424 o número de impulsos médios do motor passo-a-passo. Ambos os valores são considerados para cada ciclo de um ensaio. O valor de 0,00005 é relativo a 50 microsegundos, dos quais 45 microsegundos são relativos aos comandos *HIGH* e *LOW* que estão implementados no *software* arduino que fazem subir ou descer o travessão móvel, e os restantes 5 microsegundos são relativos ao tempo de atraso da comunicação entre o LabVIEW e o arduino. Deste modo a velocidade média do ensaio foi de 5 mm/s.

Como é sabido que a frequência de um movimento oscilatório é o inverso do seu período, pelo que:

$$Frequência = \frac{1}{3424 * 0,00005} \quad (3.3)$$

Os dados da equação 3.3 no seu denominador são os mesmos da equação da velocidade e foi considerado que o período do movimento do travessão fosse equivalente a um ciclo. O ensaio de fadiga à flexão foi realizado a uma frequência de 5,84 Hz. Tendo em conta este valor, e como o ensaio não foi cronometrado, pode-se calcular que este teve a duração de aproximadamente 171 segundos.





---

*Capítulo 4*  
*Conclusões e desenvolvimentos futuros*

## Capítulo 4 Conclusões e desenvolvimentos futuros

### 4.1 Conclusões

Do trabalho realizado pode tirar-se as seguintes conclusões:

- A relação de transmissão da polia que está acoplada ao motor passo-a-passo, é elevada e faz com que a frequência do movimento da máquina seja bastante baixa para aquilo que é desejado neste tipo de ensaios;
- O modo de funcionamento manual apresenta uma grande valia no que diz respeito ao controlo da máquina, sobretudo em casos de emergência;
- As especificações técnicas, tanto do motor passo-a-passo, como do driver, não se revelaram corretas. O número de impulsos de uma volta do motor passo-a-passo, era de 4000 unidades, sendo que de acordo com as suas especificações técnicas esse número deveria de ser igual a 300. No que diz ao respeito ao driver, este possuía menos parâmetros de alteração, não estando de acordo com as suas especificações técnicas;
- Depois de realizado o envio do programa de arduino para a sua plataforma e da montagem da carta de aquisição, os ensaios podem-se considerar de simples realização, através da introdução dos parâmetros desejados no programa de controlo LabVIEW;
- O ensaio realizado teve um erro médio de descolamento de apenas 0,1 micrómetro, ocorrido num instante temporário de 20 ms. Deste modo, pode-se concluir que a máquina tem um ruído bastante baixo.

### 4.2 Desenvolvimentos futuros

Embora se tenha atingido o objetivo principal estabelecido para este trabalho, tornar a máquina operacional, vislumbra-se a possibilidade de fazer várias melhorias em trabalhos futuros:

- Apesar de no painel frontal do LabVIEW estar implícito qual a frequência que se deseja na realização do ensaio, não foi possível de controlar este parâmetro. Futuramente, deve-se desenvolver e implementar código no programa arduino para controlo deste parâmetro;
- As forças máximas e mínimas raramente alcançam os valores desejados, devido ao *delay* de 50 milisegundos que foi colocado nas *cases structures* dos modos manual e automático. Há que aproximar esses valores aos que estão implementados no LabVIEW, reduzindo para isso esse *delay*.
- Melhorar a comunicação entre o *labview* e a carta de aquisição, pois durante alguns testes o programa de controlo deixava de reconhecer a porta USB do módulo NI – 9237;
- Projeto e construção de suportes de provetes para vários tipos de ensaios.

---

*Referências bibliográficas*

## Referências bibliográficas

- ADMET, Materials Testing System Manufacturer. (2015). *eXpert 9000 Torsion Tester / ADMET*. Obtido em 23 de Julho de 2015, de <http://admet.com/products/torsion-testing-machines/>
- All About Circuits*. (2015). Obtido em 2015 de Setembro de 28, de <http://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-9/strain-gauges/>
- Arduino. (2015). Obtido em 30 de Setembro de 2015, de <https://www.arduino.cc/>
- Beer, F. P., & Johnstone, E. R. (1992). *Mechanics of Materials, 2nd Edition*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Beer, F. P., Johnstone, E. R., & DeWolf, J. T. (2001). *Mechanics of Materials, 3rd Edition*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Boyer, H. E. (1986). *Atlas of Fatigue Curves*. Materials Park, Ohio: ASM International.
- Brites, F. G., & Santos, V. P. (2008). Motor de Passo. Niterói, Rio de Janeiro.
- BSJD. (2015). *Shenzhen Baishan Mechatronics Co., Ltd*. Obtido em 29 de Setembro de 2015, de <http://www.bsjd.com/Uploadfiles/productdown/2012031411410111085.pdf>
- Campbell, F. C. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. Materials Park, Ohio: ASM International. Obtido em 25 de Julho de 2015, de [http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05224G\\_Chapter14.pdf](http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05224G_Chapter14.pdf).
- History of Fatigue - ATZ online*. (2015). Obtido em 29 de Julho de 2015, de <http://www.atzonline.com/Specials/Simulation/38/61/Special+Simulation.html>
- Les Pock. (2007). *Metal Fatigue: What it is, why it matter*. Dordrecht: Springer.
- multipino plataforma B2B*. (2015). Obtido em 10 de Outubro de 2015, de <http://www.multipino.com/>
- National Instruments*. (2015). Obtido em 1 de Outubro de 2015, de <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-168/lang/pt>
- Pereira, A. B., & Morais, A. B. (2008). Mixed mode I + II interlaminar fracture of carbon/epoxy laminates. *Composites Science and Technology*.
- Procter & Chester. (2012). *PCM - The Load Cell and Strain Gauging Specialists*. Obtido em 28 de Setembro de 2015, de <https://www.pcm-uk.com/loadcell-whatisaloadcell.html>
- Rao, J. S. (2011). *History of Rotating Machinery Dynamics*. Bangalore: Springer.
- Reed-Hill, R., & Abbaschian, R. (1994). *Physical Metallurgy Principles*. Boston: PWS Publishing Company.
- Ritchie, R. O., Karihaloo, B. L., & Milne, I. (2003). *Comprehensive Structural Integrity: Cyclic loading and fatigue*. Elsevier.
- Rizzoni, G. (2009). *Fundamentals of Electrical Engineering*. McGraw-Hill Higher Education.
- Shimadzu*. (2015). Obtido de <http://testingmachines.co.uk/>
- Silva, C. W. (2013). *Mechanics of Materials*. Boca Raton: Taylor & Francis/CRC Press.
- Simpson, C. D. (1996). *Industrial Electronics*. Lewiston, New York: Prentice Hall.
- Stepper Online*. (2015). Obtido em 30 de Setembro de 2015, de <http://www.omc-stepperonline.com/switching-power-supply-200w-12v-165a-for-3d-printer-kits-115v230v-s20112-p-194.html>

- Suresh, S. (1998). *Fatigue of Materials*. Nova Iorque: Cambridge University Press.
- Swanson, S. R. (1974). *Handbook of Fatigue Testing*. Baltimore: ASTM International.
- Testresources. (2015). *Polyethylene HDPE MDPE LDPE Plastics | Tensile & Flexural Tests*. Obtido em 24 de Julho de 2015, de <http://www.testresources.net/application/polyethylene-hdpe-mdpe-ldpe-plastics-tensile-flexural-tests>
- University of Cambridge, Department of Materials Science & Metallurgy. (2015). *Gigacycle fatigue testing*. Obtido em 24 de Julho de 2015, de <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2013/giga/index.html>
- Wataru Tsutsui. (Junho de 2008). Prediction of fatigue crack growth retardation due to a tensile overload using two parameters approach. Kalamazoo, Michigan.

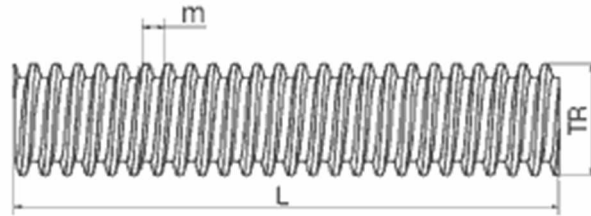


---

*Anexos*

**Anexos**

**Anexo A. Catálogo para fusos trapezoidais**



L = Comprimento  
 TR = Diâmetro exterior da rosca  
 m = passo

Rosca	Direcção de rosca	material	TR	passo m	Comprimento máx. L [mm]
TR8x1,5	Direita	C15	8	1,5	1000
TR10x2	Direita	C15	10	2	3000
TR10x3	Direita	C15	10	3	3000
TR12x3	Direita	C15	12	3	3000
TR14x3	Direita	C15	14	3	3000
TR14x4	Direita	C15	14	4	3000
TR16x2	Direita	C15	16	2	3000
TR16x4	Direita	C15	16	4	3000
TR18x4	Direita	C15	18	4	3000
TR20x4	Direita	C15	20	4	3000
TR24x5	Direita	C15	24	5	3000
TR26x5	Direita	C15	26	5	3000
TR28x5	Direita	C15	28	5	3000
TR30x8	Direita	C15	30	8	3000
TR36x8	Direita	C15	36	8	3000
TR40x7	Direita	C15	40	7	3000
TR50x8	Direita	C15	50	8	3000
TR8x1,5	Esquerda	C15	8	1,5	1500
TR10x2	Esquerda	C15	10	2	3000
TR10x3	Esquerda	C15	10	3	3000
TR12x3	Esquerda	C15	12	3	3000
TR14x3	Esquerda	C15	14	3	3000
TR14x4	Esquerda	C15	14	4	3000
TR16x2	Esquerda	C15	16	4	3000
TR16x4	Esquerda	C15	16	4	3000
TR18x4	Esquerda	C15	18	4	3000
TR20x4	Esquerda	C15	20	4	3000

Figura A.1 – Dimensões normalizadas de fusos trapezoidais.



**Anexo B. Especificações técnicas do motor passo-a-passo**



**General specifications**

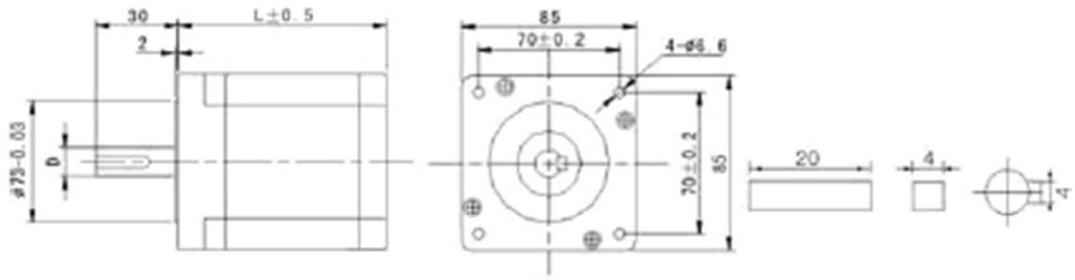
Stepping Accuracy.....within 5%  
 Temperature.....80°CMax  
 Ambient Temperature.....-20°C~+50°C  
 Insulation Resistance.....100MΩMin 500VDC  
 Dielectric Strength.....500V AC 1minute  
 Allowable Radial Load.....0.08mm Max (450g load)  
 Allowable Thrust Load.....0.08mm Max (450g load)

**Specifications**

Model	Step Angle (°)	Length L(mm)	Holding Torque (N.m)	Phase Current (A)	Power Supply	Rotor Inertia (g.cm <sup>2</sup> )	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

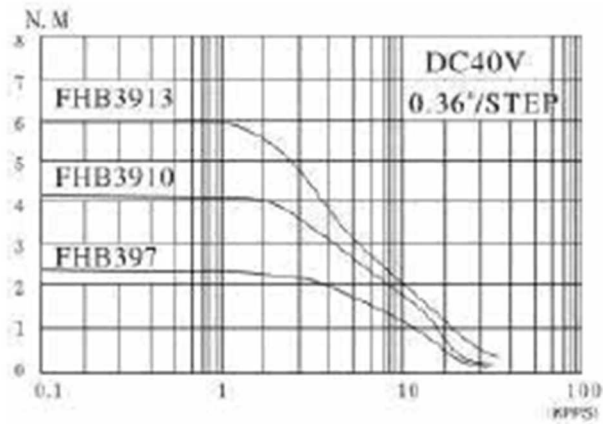
Figura B.1 - Especificações técnicas do motor passo-a-passo - página 1/2.

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

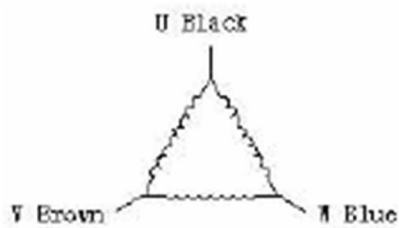


Figura B.2 - Especificações técnicas do motor passo-a-passo - página 2/2.

Anexo C. Especificações técnicas da célula de carga

MODEL: BD-PLC-S-1200



**Pancake Load Cell—Standard**



**FEATURES**

- Capacities 1.5—450kN
- Sealed to IP65.
- Tension & Compression use.
- Single or dual bridge option.

**APPLICATIONS**

- Test Machines
- Mis-aligned loading applications.
- Restricted height constraints
- Virtually all industries.

**DESCRIPTION**

The BD-PLC-S provides a simple measuring device for tension and compression measurement. The design is based on a shear-web principle which allows for mis-aligned loading having minimal effect on the load cell's output.

The load cell has been designed for test rig applications where static and dynamic measurement is required. Additional information regarding weights and natural frequency data is available upon request.

(Pereira & Morais, 2008)

**TYPICAL SPECIFICATION**

PARAMETER	VALUE	UNITS
Capacities Range	0.. 1.5, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 250 & 450	kN
Rated Output	Range 1.5-10kN = 2.0 nom. Range 25-450kN = 4.0 nom.	mV/V
Linearity & non repeatability	0.05	±% of Rated Output
Zero Return after 30 minutes	0.025	±% of Applied Load
Zero Balance	1.0	±% of Rated Output
Temperature Range: Operating	-55 to +90	°C
Temperature Range: Compensated	-10 to +45	
Temperature Effect: On Output	0.0015	±% of Rated Output/°C
Temperature Effect: On zero	0.0015	±% of Rated Load/°C
Safe Overload	150	% of Rated Capacity
Ultimate Overload	300	% of Rated Capacity
Excitation: Recommended	10	Volts AC or DC
Excitation: Maximum	20	
Input Impedance	350 nominal	ohm
Output Impedance	350 nominal	ohm
Insulation Resistance	>2	GΩ at 50VDC
Deflection at Rated Capacity	NA	mm
Weight (approximate) :	NA	kg
Construction	Painted Tool Steel	
Environmental Protection	IP65	
Cable	10FT 4 core screened	

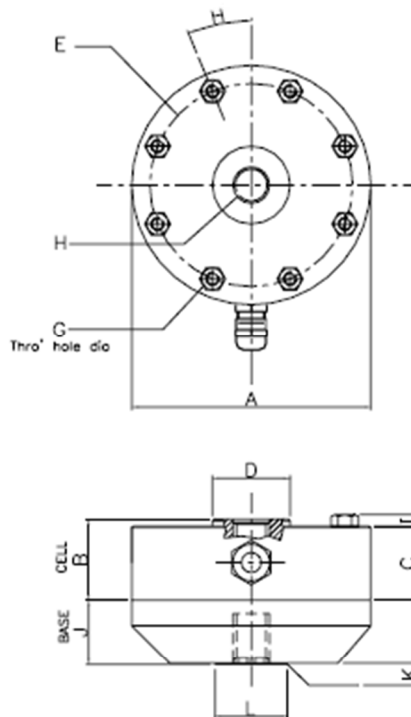
Figura C.1 - Especificações técnicas da célula de carga. – página 1/2.

MODEL: BD-PLC-S-1200



## Pancake Load Cell—Standard

OUTLINE DIMENSIONS in millimeters



MODEL	CAP	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1210	1.5, 2.5, 5, 10, 25, 50 kN	104.8	34.9	31.7	34	88.9	22.5*	7.1 8 Places	M16x2-4H, 28.4 dp	5.1	28.6	0.8	31.8	M16x2-4H, 22.1 dp
1220	100, 250 kN	153.9	44.5	41.4	67.3	130.3	15*	10.4 12 Places	M33x2-4H, 35.6 dp	7.6	44.5	0.8	57.2	M33x2-4H, 35.6 dp
1232	450 kN	203.2	63.5	57.2	95.2	165.1	11.25*	13.5 16 Places	M42x2-4H, 54.6 dp	10.2	50.8	0.8	76.2	M42x2-4H, 44.5 dp

NOTE: If the dimensions or specification do not suit, PCM have an in-house design and build service that should satisfy your requirements.

### WIRING DETAIL



### LOADING MODE

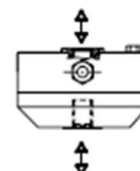


Figura C.2 - Especificações técnicas da célula de carga. – página 2/2.

Anexo D. Esquema Elétrico

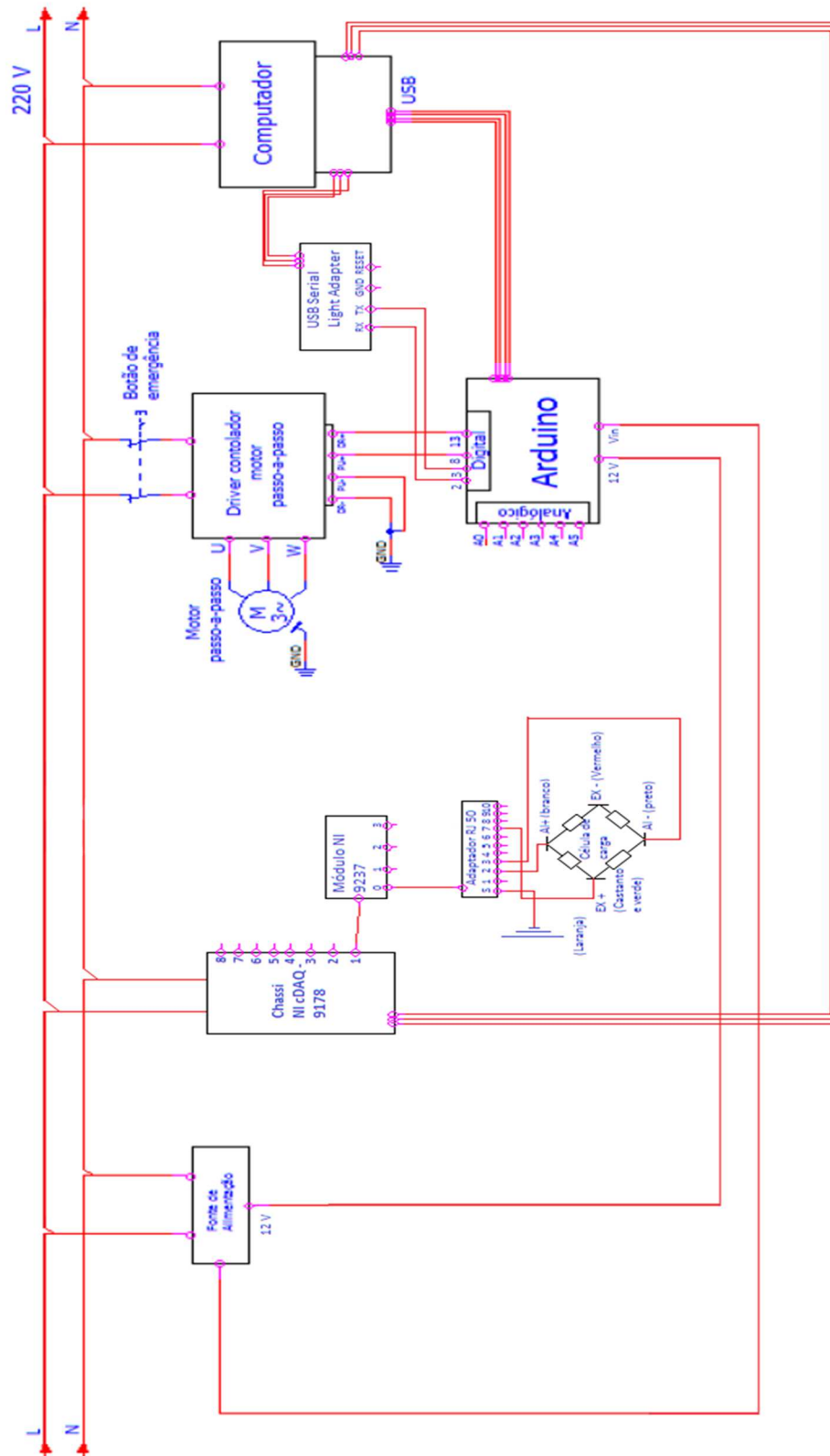


Figura D.1 - Esquema Elétrico.

**Anexo E. Manual do Driver DM3722M**

DM3722M is internationally applicable 3-phase high voltage stepper motor driver, which is controlled by DSP chip. The combination of software algorithm and 3-phase driving modules is even more advanced than AC servo driver. The users can set parameters like current, micro steps, pulse input mode and etc through four buttons. The LED screen can display and memorize the value automatically. DM3722M has already been widely applied in engraving machine, CNC, computerized embroidery machine, plasma/flame cutting machine, sunglasses production, fireworks making, packaging machine and etc. It is becoming recognized and well reputed among users by relying on the specifications of wide application, high reliability/stability and low price.



**Specifications**

- ★ 5V-24V signal voltage compatible, no need to connect resistance to limit current if signal voltage is 24V.
- ★ MAX response frequency up to 250Kpps.
- ★ 42-Switch micro steps, MAX resolution up to 60,000.
- ★ Output current 1.2-7.0A RMS adjustable.
- ★ Locking current adjustable (5%-100% of running current)
- ★ Single power input: AC90V-AC250V, 50/60Hz
- ★ With LED display and four buttons to set working current, locking current, micro steps, filter constant and etc.
- ★ Matching value selectable for motor inductance to make sure the driver matches motors from different suppliers.
- ★ Users can select to show pulse number or motor running speed in LED screen.
- ★ Low noise, high stability and reliability, competitive price.

**NOTE:** If users need to take place of Q or DQ series, just advise four basic parameters: 1. running current; 2. locking current; 3. micro steps; 4. motor inductance Then we can set the above parameters in advance in DM driver for you.

**Function Table**

Function	Content
Self-test function	No need to input pulse signal but directly through buttons to control motor to check if driver and motor is normal.
Micro steps change	High/low subdivision can be changed freely. (Refer to parameter BS02, BS03 Setting)
Pulse input modes choosing	Two pulse input modes for optional. (single/double pulse input)
Rising/falling edge choosing	Two pulse valid input for option. Rising edge or falling edge (the default is pulse valid at falling edge)
Phase memory function	Automatically memorized motor phase if pulse stops 3 seconds.
Protection function	Protection of over-current, over-voltage, over-heat, phase short circuit and overload.

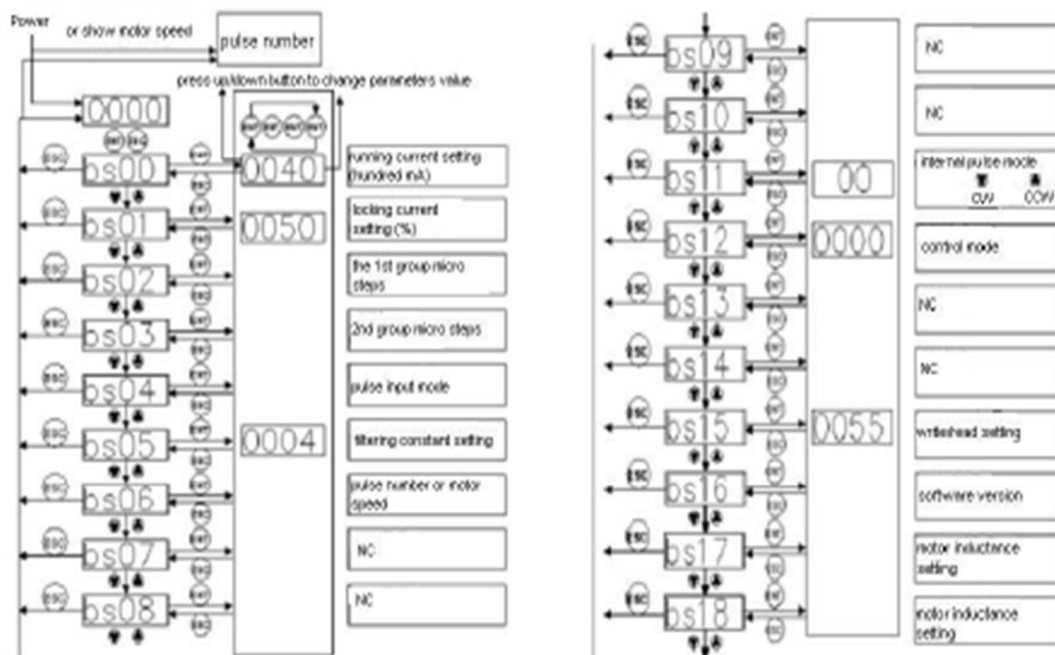
Figura E.1 - Manual do driver – página 1/7.

Status display	To show pulse number or motor running speed.
42-switch micro steps	200,300,400,500,600,800,900,1000,1200,1500,1600,1800,2000,2400,2500,3000,3200,3500,3600,4000,4200,4500,4800,5000,6000,6400,7200,8000,9000,9600,10000,12000,12800,14400,20000,24000,25600,30000,40000,50000,51200,60000

**Parameters Diagram**

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

After the driver is powered up, please long press “ENT” for 3 seconds first, and then press ⏴/⏵ to display the next. Details as below:



**Parameters Table**

Item	No.	Name & Function	Initial Value	Unit	Setting Range
0	BS00	To set running current of motor	0040	Hundred MA	0012-0070
1	BS01	To set locking current of motor.	50% of the working current	%	5%-100%
2	BS02	The 1st group micro steps. Please choose this group when SM signal input is in high level.. 200E means 200*100= 20000 pulse/R.	1000	Pulse/R.	200-600E

Figura E.2 - Manual do driver – página 2/7.

3	BS03	The 2nd group micro steps. Please choose this group when SM signal input is in low level.. 4000 means 4000 pulse/R.	2000	Pulse/R	200-600E
4	BS04	To choose pulse input mode. 0000: CW/CCW pulse control mode, pulse valid at rising edge. 0001: pulse+direction control mode, pulse valid at rising edge. 0002: CW/CCW pulse control mode, pulse valid at falling edge. 0003: pulse+direction control mode, pulse valid at falling edge.	0003		0000-0003
5	BS05	<b>Driver pulse filter constant.</b> The smoothing effect upon external pulse is stronger if the value is set bigger. And the high-speed function is also better. However, 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.	0004		0000-0006
6	BS06	0000: LED displays pulse number 0001: LED displays motor running speed.	0000		0000-0001
7	BS07	NC			
8	BS08	NC			
9	BS09	NC			
10	BS10	NC			
11	BS11	Self-test mode. Using up and down button to CW/CCW rotate and press "ENT" to stop.	00		
12	BS12	0000: external pulse input mode 0001: internal self-test control mode	0000		0000-0001
13	BS13	NC			
14	BS14	NC			
15	BS15	read/write setting 0055: BS00-BS18 parameters readable and changeable; Other value: BS00-BS18 only readable, BS15 changeable	55		0-9999
16	BS16	Software version 2b10			
17	BS17	Motor inductance setting (1)	22		1-200
18	BS18	Motor inductance setting (2)	100		1-9999

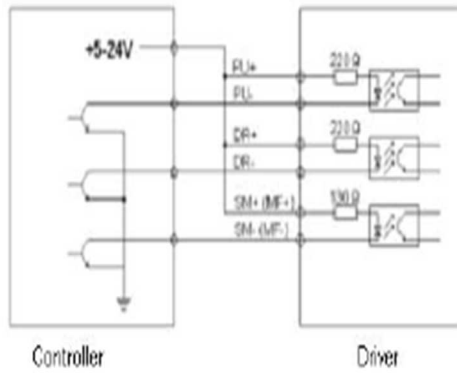
### I/O Signals

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. The driver is compatible with 5V/24V signal voltage, no need to connect R to limit current.

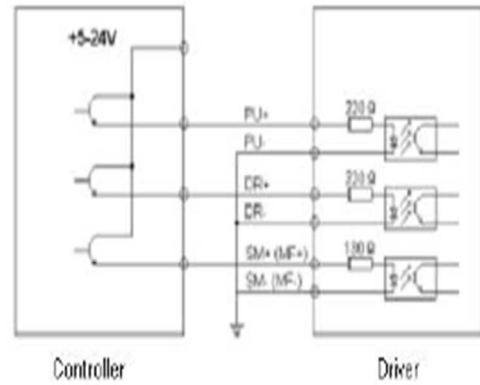
Figura E.3 - Manual do driver - página 3/7.



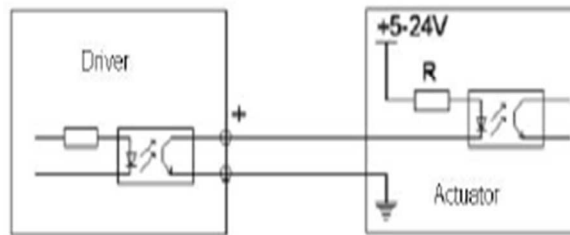
Common Anode Connection for Signal Input



Common Cathode Connection for Signal Input



Signal Output



The driver outputs the signals through optocoupler. The max driving current can be 50mA. RDY, ALM signal output.

Figura E.4 - Manual do driver – página 4/7.

Installing Dimension & Ports Description (unit: mm)

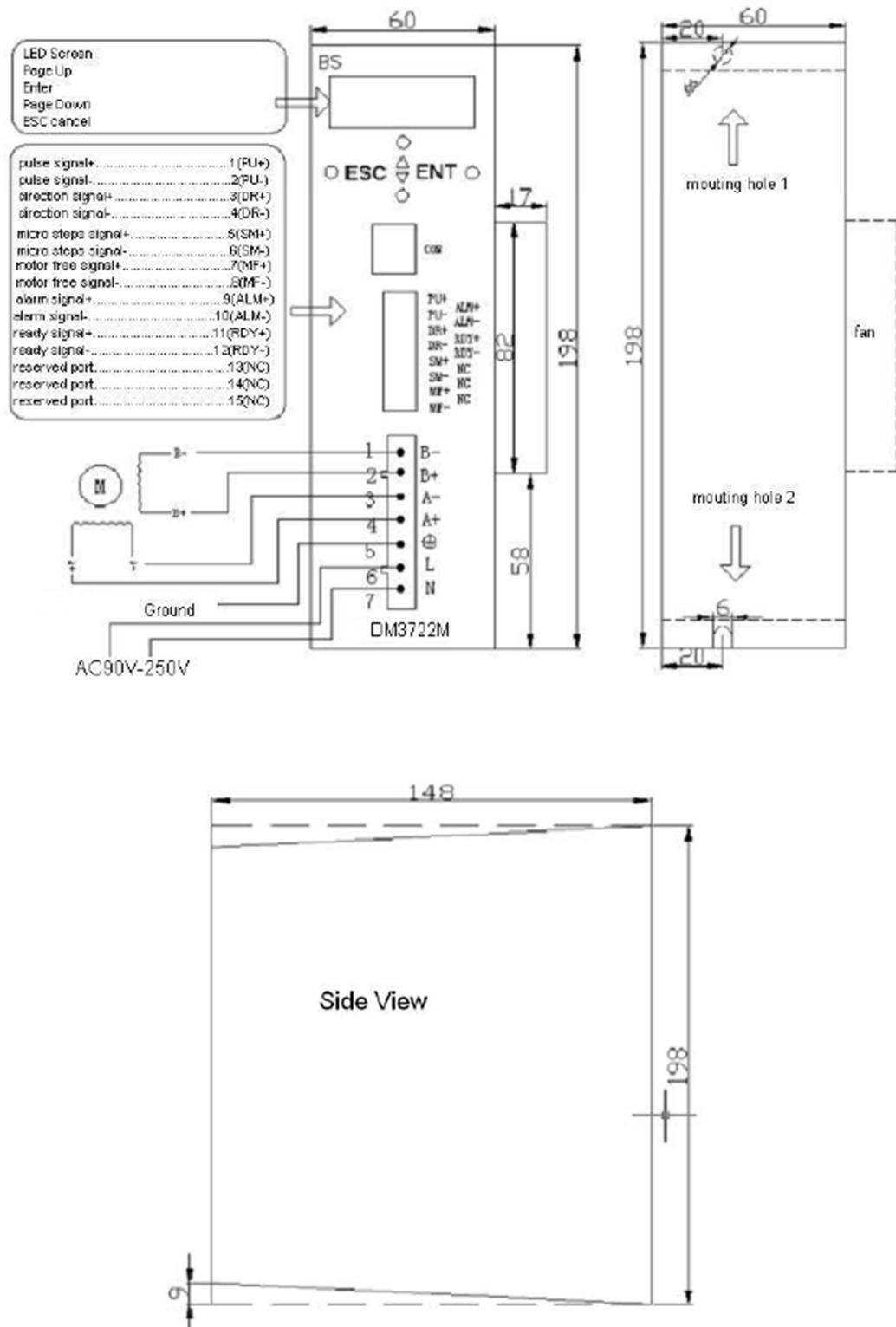


Figura E.5 - Manual do driver – página 5/7.

Lead Pin Function Table

Terminal	Pin	Symbol	Function	Note
DB15	1	PU+	Stepper pulse signal +	5V-24V signal voltage compatible, no need to connect R to limit current if 24V.
	2	PU-	BS04=1, 3, PU is stepper pulse signal	Each time pulse level changes, the motor moves one step. The input resistance is 220 Ω. Both 5V and 24V signal voltage can drive, no need to connect R to limit current if 24V. Pulse width >2.5 μ S
			BS04=0, 2, PU is CW stepper pulse signal	
	3	DR+	Direction signal +	5V-24V compatible, no need to connect R to limit current if 24V.
	4	DR-	BS04=1, 3, DR is Direction signal	Applied to change motor rotating direction. Input resistance is 220 Ω. Both 5V and 24V signal voltage can drive, no need to connect R to limit current if 24V. Pulse width >2.5 μ S
			BS04=0, 2, DR: CCW stepper pulse signal	
	5	SM+	Setting micro steps signal+	Both 5V and 24V signal voltage can drive, no need to connect R to limit current if 24V.
	6	SM-	Setting micro steps signal-	Low level: BS03 micro steps High level: BS02 micro steps
	7	MF+	Motor free signal+	5V-24V compatible
	8	MF-	Motor free signal-	Low level is valid, the current will be cut off and the driver stops working and in free state.
	9	ALM+	Alarm signal+	The driver outputs fault signal if over-current or over-heat. The signal is valid. (low level)
	10	ALM-	Alarm signal -	
	11	RDY+	Ready output signal +	The driver works normally and is ready to receive control signal. The signal is valid. (low level)
	12	RDY-	Ready output signal -	
13, 14, 15	NC	NC	NC	
Power Terminal & Motor Wiring	1	B-	Motor Wiring	
	2	B+		
	3	A-		
	4	A+		
	5	PE	Ground	Ground
	6,7	L, N	Power Supply	Power Input: AC90~250V

Figura E.6 - Manual do driver. - página 6/7.

**Alarm Mode**

The fault signal is sent via LED screen. 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.	Cut off the power 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.

**Possible Problems & Solutions Table**

Problems	Possible Cause	Solution
Motor stopped	LED indicator does not light	Check power supply
	LED indicates alarm information.	Refer to "Alarm Mode" at Chapter Four.
	Driver control mode does not match.	Choose matching control mode.
	Motor spindle is locked and motor does not work.	Check external control signal.
Motor Screechy	LED displays normally, motor spindle is not locked.	Check if MF signal is valid.
	Running current of the driver does not match motor rated current.	Set running current to be rated current.
	Accelerating time is too short.	Lengthen the accelerating time or increase the constant value of pulse wave filtering.
Inaccurate Position	The max speed is over-set.	Reduce Max speed.
	The Micro steps set incorrectly.	Choose correct micro steps.
Invalid Button	The motor load is too heavy.	Change the motor or appropriately increase driver running current.
	Button does not give response when driver is running.	Cut off external pulse signal and press the button again.
Electric Leakage	Not reliably grounded.	Make the driver/motor reliably grounded.
Driver/Motor Over-heat	Heavy running current or terrible external heat sinking condition	Appropriately reduce running current or improve the ventilation and heat dissipation.

Figura E.7 - Manual de driver. - página 7/7.

Anexo F. Especificações técnicas da fonte de alimentação S-201-12

**201W Power Supply S-201-12**

Features:

- 12V DC 16.5A output
- AC input voltage range: 90~132V/180~264VAC
- 115V/230V AC selected by switch
- High efficiency low cost
- Free air cooling convection
- Low output ripple and yawp
- Over current, over voltage, short circuit and overheat protections
- 215\*115\*50mm (L\*W\*H)



General Specification:

Model	S-201-12
DC Output	12V 16.5A
Wave and Noise	120mVp-p
Inlet Stability	±0.5%
Load Stability	±0.5%
Efficiency	81%
Adjustable range for DC Voltage	10%
AC Input Voltage	90~132V/180~264VAC Slected by Switch
AC Input Current	3.8A/115VAC 2.0A/230VAC
Working Temperature	-10~50°C
Safety Standards	GB4943, UL60950, EN60950
EMC Standards	GB9254, 55022, ClassB
Weight	0.9kg

Dimensions:

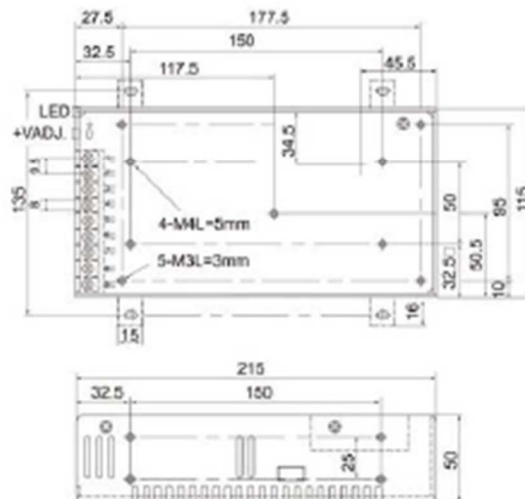


Figura F.1 - Especificações técnicas da fonte de alimentação.

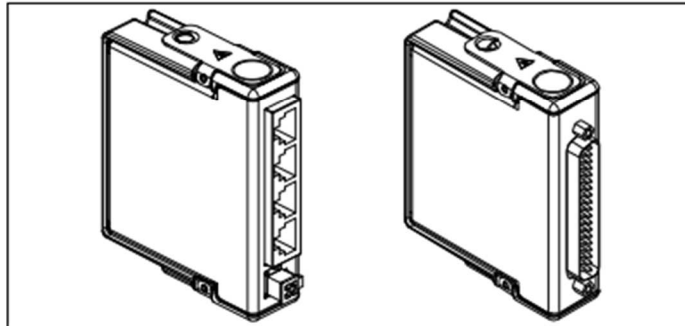
Anexo G. Especificações técnicas do módulo NI – 9237

OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS

NI 9237

4-Channel, 24-Bit Half/Full-Bridge Analog Input Module

Français Deutsch 日本語 한국어 简体中文  
ni.com/manuals



This document describes how to use the National Instruments 9237 and includes specifications and pin assignments for the NI 9237. In this document, the NI 9237 with RJ-50 connectors and the NI 9237 with DSUB are referred to inclusively as the NI 9237. Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter `rdsoftwareversion` to determine which software you need for the modules you are using. For information about installing, configuring, and programming the system, refer to the system documentation. Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter `cseriesdoc` for information about C Series documentation.



**Note** The safety guidelines and specifications in this document are specific to the NI 9237. The other components in the system might not meet the same safety ratings and specifications. Refer to the documentation for each component in the system to determine the safety ratings and specifications for the entire system. Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter `cseriesdoc` for information about C Series documentation.

Figura G.1 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – páginas 1-2/40.

## Safety Guidelines

Operate the NI 9237 only as described in these operating instructions.



**Hot Surface** This icon denotes that the component may be hot. Touching this component may result in bodily injury.

### Safety Guidelines for Hazardous Locations

The NI 9237 is suitable for use in Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4 hazardous locations; Class I, Zone 2, AEx nA IIC T4, and Ex nA IIC T4 hazardous locations; and nonhazardous locations only. Follow these guidelines if you are installing the NI 9237 in a potentially explosive environment. Not following these guidelines may result in serious injury or death.



**Caution** Do *not* disconnect I/O-side wires or connectors unless power has been switched off or the area is known to be nonhazardous.



**Caution** Do *not* remove modules unless power has been switched off or the area is known to be nonhazardous.

© National Instruments Corp.

3 NI 9237 Operating Instructions and Specifications



**Caution** Substitution of components may impair suitability for Class I, Division 2.



**Caution** For Zone 2 applications, install the system in an enclosure rated to at least IP 54 as defined by IEC 60529 and EN 60529.



**Caution** For Zone 2 applications, connected signals must be within the following limits:

Capacitance ..... 0.2  $\mu$ F max  
Inductance ..... 80 mH max

### Special Conditions for Hazardous Locations Use in Europe

This equipment has been evaluated as Ex nA IIC T4 equipment under DEMKO Certificate No. 07 ATEX 0626664X. Each module is marked  $\text{Ex}$  II 3G and is suitable for use in Zone 2 hazardous locations, in ambient temperatures of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_a \leq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . If you are using the NI 9237 in Gas Group IIC hazardous locations, you must use the device in an NI chassis that has been evaluated as Ex nC IIC T4, EEx nC IIC T4, Ex nA IIC T4, or Ex nL IIC T4 equipment.

NI 9237 Operating Instructions and Specifications 4

ni.com

Figura G.2 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 3-4/40.

### Special Conditions for Marine Applications

Some modules are Lloyd's Register (LR) Type Approved for marine applications. To verify Lloyd's Register certification, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification) and search for the LR certificate, or look for the Lloyd's Register mark on the module.



**Caution** To meet radio frequency emission requirements for marine applications, use shielded cables and install the system in a metal enclosure. Suppression ferrites must be installed on power supply inputs near power entries to modules and controllers. Power supply and module cables must be separated on opposite sides of the enclosure and must enter and exit through opposing enclosure walls.

© National Instruments Corp.

5 NI 9237 Operating Instructions and Specifications

### Connecting the NI 9237

The NI 9237 has four RJ-50 receptacles or a 37-pin DSUB connector that provide connections for four half or full bridges, and an external excitation voltage source.

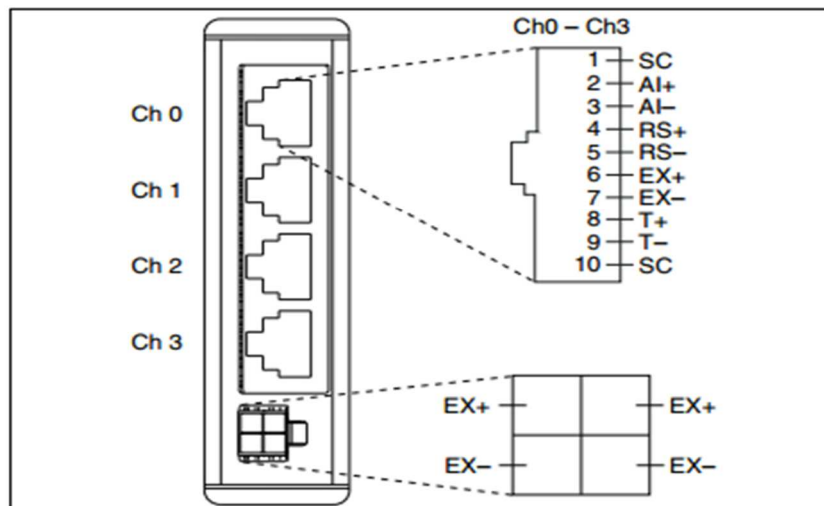


Figure 1. NI 9237 with RJ-50 Pin Assignments

NI 9237 Operating Instructions and Specifications 6

ni.com

Figura G.3 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 5-6/40.



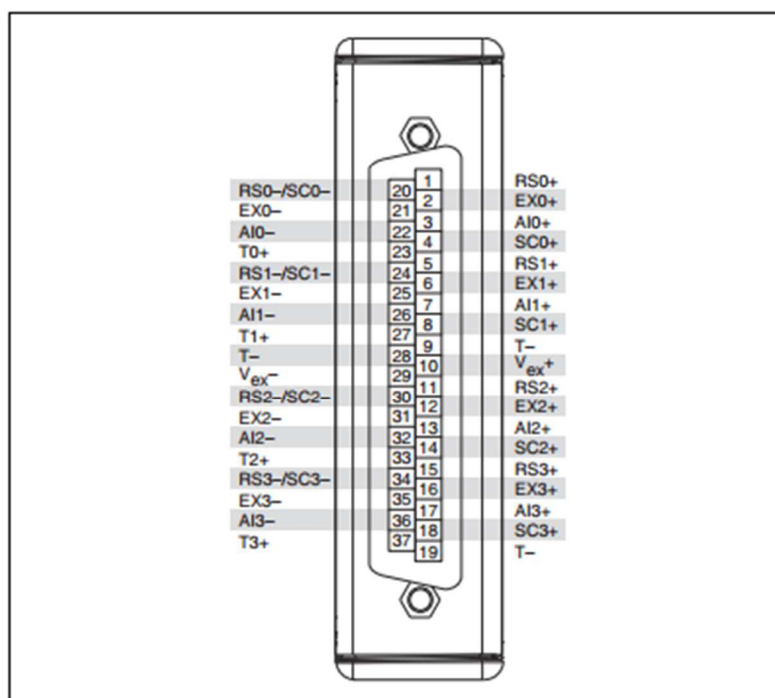


Figure 2. NI 9237 with DSUB Pin Assignments

When you connect a half bridge to the NI 9237, you must connect the AI+, EX+ and EX-, and RS+ and RS- signals, but you do not need to connect the AI- signal because it is connected internally. When you connect a full bridge, you must connect the AI+ and AI-, EX+ and EX-, and RS+ and RS- signals. Refer to Figure 3 for an illustration of how to connect half and full bridges to the NI 9237.



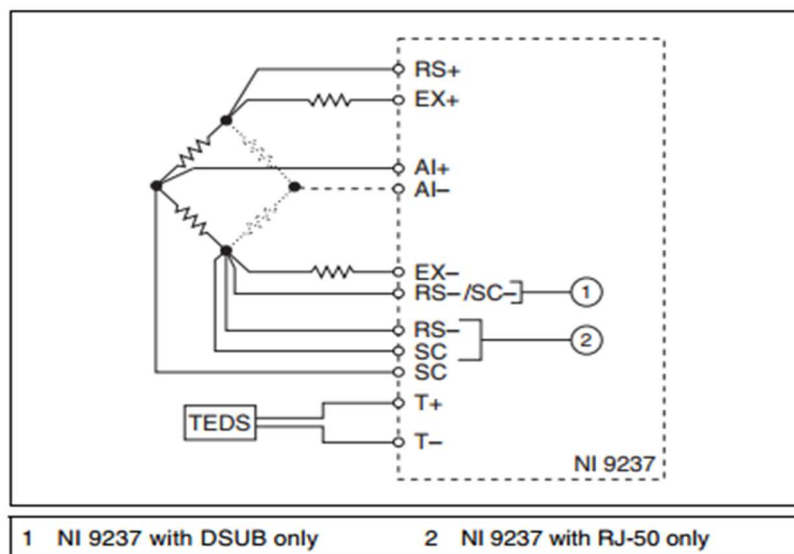
**Note** You can use a quarter bridge with the NI 9237 if you add a resistor externally to create a half bridge. You also can use a quarter bridge with the NI 9237 with RJ-50 if you use the NI 9944 or NI 9945 Quarter Bridge Completion Accessory. Visit [ni.com](http://ni.com) and search for the NI 9944 and NI 9945 Quarter Bridge Completion Accessories for more information about these accessories and how to purchase them.



**Note** National Instruments does not recommend using an RJ-45 cable with the NI 9237 with RJ-50 because it can physically damage pins 1 and 10 on the device, and thus permanently disable shunt calibration no matter what connector you use.



**Note** When you insert or remove a new sensor from the NI 9237, slight changes in the excitation voltages can cause a mismatch between the internal half-bridge completion resistors and the half-bridge sensors, which results in a change in the measurement offsets. National Instruments recommends performing bridge calibrations of quarter- or half-bridge sensors after connecting all sensors to the NI 9237 and after removing or attaching any additional sensor. Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter the info code `rdw9237` for more information about changes in voltage offsets in the NI 9237.



**Figure 3.** Connecting a Half or Full Bridge to the NI 9237

Each channel on the NI 9237 has an independent 24-bit ADC and an input amplifier that enable you to sample signals from all four channels simultaneously.

The NI 9237 is isolated from earth ground. However, the individual channels are not isolated from each other. The EX+, EX-, and T- signals are common among all channels. You can connect the NI 9237 to a device that is biased at any voltage within the NI 9237 rejection range of earth ground. Refer to the *Specifications* section for more information about the common-mode rejection ratio (CMRR).

You also can connect floating signals to the NI 9237. If you connect floating signals to the NI 9237, National Instruments recommends connecting the EX- signal to the earth ground or shield for better noise rejection.

The NI 9237 also includes filters to prevent aliasing. The filters on the NI 9237 filter according to the data rate. Refer to the *Understanding NI 9237 Filtering* section for more information about filtering.

## Wiring TEDS Channels

Ensure that neither the TEDS data (T+) nor the TEDS return (T-) signal is tied in common to any AI signals on the NI 9237. The NI 9237 connects all the T- signals together internally. The NI 9237 with DSUB has only three T- pins. To connect four TEDS sensors to the NI 9237 with DSUB, wire the TEDS return signals of two of the sensors to one of the T- pins. Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter the info code `rdteds` for more information about TEDS sensors.

## Connection Options to Correct for Resistance Errors

Wiring resistance can create errors in bridge circuits. The NI 9237 provides two mechanisms to correct for these errors: remote sensing and shunt calibration.

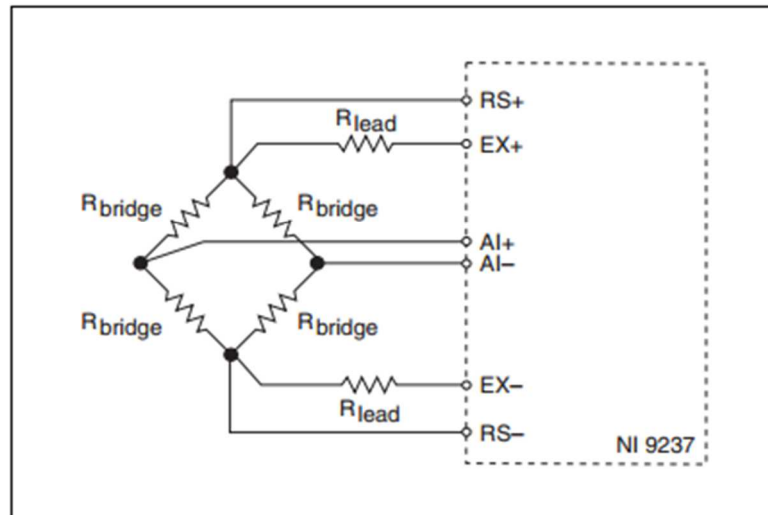
### Remote Sensing

Remote sensing continuously and automatically corrects for errors in excitation leads, and generally is most appropriate for half- and full-bridge sensors.

Long wire and small gauge wire have greater resistance, which can result in gain error. The resistance in the wires that connect the excitation voltage to the bridge causes a voltage drop, which is a

Figura G.6 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 11-12/40.

source of gain error. The NI 9237 includes remote sensing to compensate for this gain error. Connect remote sense wires to the points where the excitation voltage wires connect to the bridge circuit. Refer to Figure 4 for an illustration of how to connect remote sense wires to the NI 9237.



**Figure 4.** Connecting Remote Sense Wires to the NI 9237

© National Instruments Corp.

13 NI 9237 Operating Instructions and Specifications

The actual bridge excitation voltage is smaller than the voltage at the EX+ and EX– leads. If you do not use remote sensing of the actual bridge voltage, the resulting gain error is:

$$\frac{R_{lead}}{R_{bridge}} \text{ for half-bridge sensors and}$$

$$\frac{2 \cdot R_{lead}}{R_{bridge}} \text{ for full-bridge sensors.}$$

If you connect the remote sense signals directly to the bridge resistors, the NI 9237 senses the actual bridge voltage and eliminates the gain errors caused by the resistance of the EX+ and EX– leads.

### Shunt Calibration

Shunt calibration can correct for errors from the resistance of both the excitation wiring and wiring in the individual resistors of the bridge. Remote sensing corrects for resistances from the EX pins on the NI 9237 to the sensor, and shunt calibration corrects for these errors and for errors caused by wire resistance within an arm of the bridge. Shunt calibration is most useful with quarter-bridge

NI 9237 Operating Instructions and Specifications 14

ni.com

Figura G.7 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 13-14/40.

sensors because there may be significant resistance in the wiring to the active resistor in the bridge.

The NI 9237 shunt calibration circuitry consists of a precision resistor and a software-controlled switch. Refer to the software help for information about enabling the shunt calibration switch for the NI 9237. Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter `cseriesdoc` for information about C Series documentation.

Shunt calibration involves simulating the input of strain by changing the resistance of an arm in the bridge by some known amount. This is accomplished by shunting, or connecting, a large resistor of known value across one arm of the bridge, creating a known strain-induced change in resistance. You can then measure the output of the bridge and compare it to the expected voltage value. You can use the results to correct gain errors in the entire measurement path, or to simply verify general operation to gain confidence in the setup.

Use a stable signal, which is typically the unloaded state of the sensor, first with the shunt calibration switch off and then again with the switch on. The difference in these two measurements provides an indication of the gain errors from wiring resistances. You can design the software application to correct subsequent readings for this gain error.

© National Instruments Corp.

15 NI 9237 Operating Instructions and Specifications

## Excitation Voltages

Although the sensor industry does not recognize a single standard excitation voltage level, excitation voltage levels of between 2.5 V and 10 V are common. You can program the NI 9237 to supply 2.5 V, 3.3 V, 5 V, or 10 V of excitation voltage, and the module can provide up to 150 mW of excitation power. Unless you supply external excitation voltage, National Instruments recommends that you set the excitation voltage to a value that keeps the total power below 150 mW. The NI 9237 automatically reduces internal excitation voltages as needed to stay below 150 mW total power.

The power consumed by a single bridge is  $\frac{V_{ex}^2}{R}$  where  $R$  is the total resistance of the bridge.

For a quarter or half bridge,  $R$  is equal to two times the resistance of each element. For a full bridge,  $R$  is equal to the resistance of each element.

NI 9237 Operating Instructions and Specifications 16

[ni.com](http://ni.com)

Figura G.8 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 15-16/40.

The 150 mW limit allows you to power half and full bridges as follows:

- Four 350  $\Omega$  half bridges at 5.0 V
- Four 350  $\Omega$  full bridges at 3.3 V
- Four 120  $\Omega$  half bridges at 2.5 V

If you need an excitation voltage that causes more than 150 mW to dissipate across all the bridges, connect an external excitation voltage source to the NI 9237. For the NI 9237 with DSUB, use the two  $V_{ex}$  pins to connect the external excitation source. For the NI 9237 with RJ-50, use the two EX+ and EX– terminals on the four-terminal external excitation voltage connector to connect one external excitation source. You can use the additional EX+ and EX– terminals on the connector to wire multiple NI 9237 modules together in a daisy chain.

## Understanding NI 9237 Filtering

---

The NI 9237 uses a combination of analog and digital filtering to provide an accurate representation of in-band signals while rejecting out-of-band signals. The filters discriminate between

© National Instruments Corp.

17 NI 9237 Operating Instructions and Specifications

signals based on the frequency range, or bandwidth, of the signal. The three important bandwidths to consider are the passband, the stopband, and the alias-free bandwidth.

The NI 9237 represents signals within the passband, as quantified primarily by passband flatness and phase nonlinearity. All signals that appear in the alias-free bandwidth are either unaliased signals or signals that have been filtered by at least the amount of the stopband rejection.

### Passband

The signals within the passband have frequency-dependent gain or attenuation. The small amount of variation in gain with respect to frequency is called the passband flatness. The digital filters of the NI 9237 adjust the frequency range of the passband to match the data rate. Therefore, the amount of gain or attenuation at a given frequency depends on the data rate. Figure 5 shows typical passband flatness for the NI 9237.

NI 9237 Operating Instructions and Specifications 18

ni.com

Figura G.9 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 17-18/40.

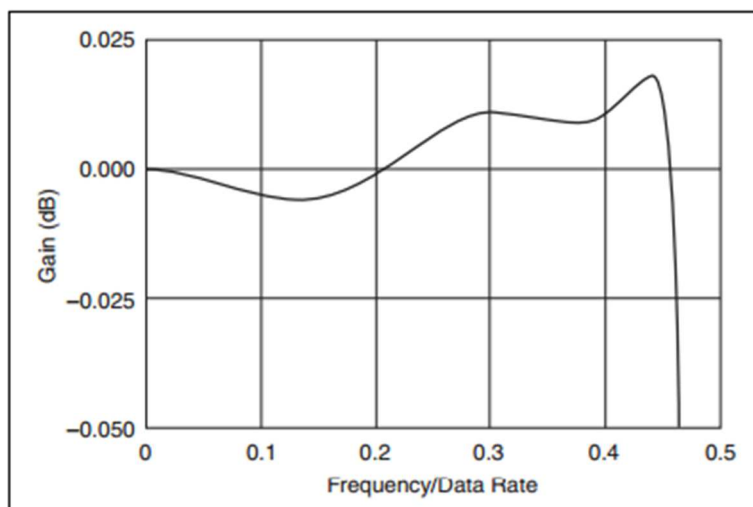


Figure 5. Typical Passband Flatness for the NI 9237

### Stopband

The filter significantly attenuates all signals above the stopband frequency. The primary goal of the filter is to prevent aliasing. Therefore, the stopband frequency scales precisely with the data rate. The stopband rejection is the minimum amount of attenuation

© National Instruments Corp.

19 NI 9237 Operating Instructions and Specifications

applied by the filter to all signals with frequencies within the stopband.

### Alias-Free Bandwidth

Any signal that appears in the alias-free bandwidth of the NI 9237 is not an aliased artifact of signals at a higher frequency. The alias-free bandwidth is defined by the ability of the filter to reject frequencies above the stopband frequency, and it is equal to the data rate minus the stopband frequency.

### Understanding NI 9237 Data Rates

The frequency of a master timebase ( $f_M$ ) controls the data rate ( $f_s$ ) of the NI 9237. The NI 9237 includes an internal master timebase with a frequency of 12.8 MHz, but the module also can accept an external master timebase or export its own master timebase. To synchronize the data rate of an NI 9237 with other modules that use master timebases to control sampling, all of the modules must share a single master timebase source. Refer to the software help for information about configuring the master timebase source for the NI 9237. Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter `cseriesdoc` for information about C Series documentation.

NI 9237 Operating Instructions and Specifications 20

[ni.com](http://ni.com)

Figura G.10 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 19-20/40.

The following equation provides the available data rates of the NI 9237:

$$f_s = \frac{f_M + 256}{n}$$

where  $n$  is any integer from 1 to 31.

However, the data rate must remain within the appropriate data rate range. Refer to the *Specifications* section for more information about the data rate range. When using the internal master timebase of 12.8 MHz, the result is data rates of 50 kS/s, 25 kS/s, 16.67 kS/s, and so on down to 1.613 kS/s, depending on the value of  $n$ . When using an external timebase with a frequency other than 12.8 MHz, the NI 9237 has a different set of data rates.



**Note** The NI cRIO-9151 R Series Expansion chassis does not support sharing timebases between modules.

## Sleep Mode

This module supports a low-power sleep mode. Support for sleep mode at the system level depends on the chassis that the module is plugged into. Refer to the chassis manual for information about

support for sleep mode. If the chassis supports sleep mode, refer to the software help for information about enabling sleep mode. Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter `cseriesdoc` for information about C Series documentation.

Typically, when a system is in sleep mode, you cannot communicate with the modules. In sleep mode, the system consumes minimal power and may dissipate less heat than it does in normal mode. Refer to the *Specifications* section for more information about power consumption and thermal dissipation.

## Specifications

The following specifications are typical for the range  $-40$  to  $70$  °C unless otherwise noted.

### Input Characteristics

Number of channels.....	4 analog input channels
Bridge completion	
Half and Full.....	Internal
Quarter.....	External

Figura G.11 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 21-22/40.



ADC resolution.....	24 bits
Type of ADC.....	Delta-Sigma (with analog prefiltering)
Sampling mode .....	Simultaneous
Internal master timebase ( $f_M$ )	
Frequency .....	12.8 MHz
Accuracy.....	$\pm 100$ ppm max
Data rate range ( $f_s$ ) using internal master timebase	
Minimum.....	1.613 kS/s
Maximum .....	50 kS/s
Data rate range ( $f_s$ ) using external master timebase	
Minimum.....	391 S/s
Maximum .....	51.36 kS/s
Data rates <sup>1</sup> ( $f_s$ ).....	$\frac{f_M + 256}{n}$ , $n = 1, 2, \dots, 31$
Typical input range .....	$\pm 25$ mV/V

<sup>1</sup> The data rate must remain within the appropriate data rate range. Refer to the [Understanding NI 9237 Data Rates](#) section for more information.

Scaling coefficient .....	2.9802 nV/V per LSB
Overvoltage protection between any two pins.....	$\pm 30$ V
Accuracy	

Measurement Conditions*	Percent of Reading <sup>†</sup> (Gain Error)	Percent of Range <sup>‡</sup> (Offset Error)
Calibrated typ (25 °C, $\pm 5$ °C)	0.05%	0.05%
Calibrated max (-40 to 70 °C)	0.20%	0.25%
Uncalibrated typ (25 °C, $\pm 5$ °C)	0.20%	0.10%
Uncalibrated max (-40 to 70 °C)	0.55%	0.35%
* Before offset null or shunt calibration. † Applies at a data rate of 50 kS/s. Lower data rates can have up to 0.20% of reading additional gain error. ‡ Range equals 25 mV/V.		

Gain drift.....	10 ppm/°C max
-----------------	---------------

Figura G.12 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 23-24/40.

Offset drift

2.5 V excitation ..... 0.6  $\mu\text{V/V}$  per  $^{\circ}\text{C}$   
 3.3 V excitation ..... 0.5  $\mu\text{V/V}$  per  $^{\circ}\text{C}$   
 5 V excitation ..... 0.3  $\mu\text{V/V}$  per  $^{\circ}\text{C}$   
 10 V excitation ..... 0.2  $\mu\text{V/V}$  per  $^{\circ}\text{C}$

Half-bridge completion

Tolerance .....  $\pm 1200 \mu\text{V/V}$  max  
 Drift ..... 1.5  $\mu\text{V/V}$  per  $^{\circ}\text{C}$

Channel-to-channel matching (calibrated)

Input Signal Frequency ( $f_{in}$ )	Gain		Phase
	Typical	Maximum	Maximum
0 to 1 kHz	0.15%	0.3%	0.125 $^{\circ}$ /kHz $\cdot f_{in}$
1 to 20 kHz	0.4%	1.1%	

Phase nonlinearity

$f_{in} = 0$  to 1 kHz ..... <0.001 $^{\circ}$   
 $f_{in} = 0$  to 20 kHz .....  $\pm 0.1^{\circ}$

Input delay ..... 38.4/ $f_s$  + 4.8  $\mu\text{s}$

Passband

Frequency ..... 0.45  $\cdot f_s$   
 Flatness ..... 0.1 dB max

Stopband

Frequency ..... 0.55  $\cdot f_s$   
 Rejection ..... 100 dB

Alias-free bandwidth ..... 0.45  $\cdot f_s$

Oversample rate ..... 64  $\cdot f_s$

Rejection at oversample rate<sup>1</sup>

$f_s = 10$  kS/s ..... 60 dB @ 640 kHz  
 $f_s = 50$  kS/s ..... 90 dB @ 3.2 MHz

Common-mode voltage,

all signals to earth ground .....  $\pm 60$  VDC

<sup>1</sup> Rejection by analog prefilter of signal frequencies at oversample rate.

Figura G.13 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 25-26/40.

**CMRR**

- Relative to earth ground<sup>1</sup>
  - ( $f_{in} = 0$  to 60 Hz)..... 140 dB
- Relative to EX–
  - ( $f_{in} = 0$  to 1 kHz)..... 85 dB
- SFDR (1 kHz, –60 dBFS)..... 115 dB
- Total Harmonic Distortion (THD)
  - 1 kHz, –20 dBFS .....–95 dB
  - 8 kHz, –20 dBFS .....–95 dB

<sup>1</sup> Measured with a balanced cable on the NI 9237 with RJ-50 and with no cable on the NI 9237 with DSUB. Shielded cables that are not twisted-pair may be significantly unbalanced, which can impact CMRR performance. To improve the balance of shielded cables, NI recommends twisting together the AI+/AI– pair, the RS+/RS– pair, and the EX+/EX– pair.

**Input noise**

Excitation Voltage	Density (nV/V <sub>rms</sub> per $\sqrt{1\text{Hz}}$ )	Total, $f_{in} = 0$ to 1 kHz (nV/V <sub>rms</sub> )	Total, $f_{in} = 0$ to 25 kHz ( $\mu\text{V}/V_{\text{rms}}$ )	
	Full Bridge	Full Bridge	Full Bridge	Half Bridge
2.5 V	8	250	1.3	1.6
3.3 V	6	190	1.0	1.2
5 V	4	130	0.6	0.8
10 V	2	65	0.3	0.5

Excitation noise ..... 100  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$

Crosstalk (not including cable effects)

$f_{in} = 1$  kHz..... 110 dB

$f_{in} = 10$  kHz..... 100 dB

Figura G.14 - Especificações técnicas do modulo NI – 9237 – página 27-28/40.

<b>Excitation</b>	
Internal voltage.....	2.5 V, 3.3 V, 5.0 V, 10.0 V
Internal power.....	150 mW max
External voltage.....	2 V to 10 V
<b>Shunt calibration</b>	
Resistance.....	100 k $\Omega$
Resistor accuracy	
25 °C .....	$\pm 110 \Omega$
-40 to 70 °C.....	$\pm 200 \Omega$
<b>MTBF</b>	
NI 9237 with RJ-50 .....	603,359 hours at 25 °C; Bellcore Issue 2, Method 1, Case 3, Limited Part Stress Method
NI 9237 with DSUB.....	704,148 hours at 25 °C; Bellcore Issue 2, Method 1, Case 3, Limited Part Stress Method



**Note** Contact NI for Bellcore MTBF specifications at other temperatures or for MIL-HDBK-217F specifications.

## Power Requirements

Power consumption from chassis

Active mode ..... 740 mW max

Sleep mode ..... 25  $\mu$ W max

Thermal dissipation (at 70 °C)

Active mode ..... 740 mW max

Sleep mode ..... 25  $\mu$ W max

## Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.



**Note** For two-dimensional drawings and three-dimensional models of the C Series module and connectors, visit [ni.com/dimensions](http://ni.com/dimensions) and search by module number.

Figura G.15 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 29-30/40.

**Weight**

NI 9237 with RJ-50 .....	152 g (5.4 oz)
NI 9237 with DSUB .....	149 g (5.25 oz)

**Safety**

**Safety Voltages**

Connect only voltages that are within the following limits.

Between any two pins .....  $\pm 30$  V max

**Isolation**

Channel-to-channel .....	None
Channel-to-earth ground	
Continuous .....	60 VDC, Measurement Category I
Withstand .....	1,000 V <sub>rms</sub> , verified by a 5 s dielectric withstand test

Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as *MAINS* voltage. *MAINS* is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary

circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.



**Caution** Do *not* connect the NI 9237 to signals or use for measurements within Measurement Categories II, III, or IV.

**Hazardous Locations**

U.S. (UL) .....	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, AEx nA IIC T4
Canada (C-UL) .....	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, Ex nA IIC T4
Europe (DEMKO).....	Ex nA IIC T4

Figura G.16 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 31-32/40.

### Safety Standards

This product meets the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



**Note** For UL and other safety certifications, refer to the product label or the *Online Product Certification* section.

### Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 (IEC 61326): Class A emissions; Industrial immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



**Note** For the standards applied to assess the EMC of this product, refer to the *Online Product Certification* section.



**Note** For EMC compliance, operate this device with shielded cables.

### CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

### Online Product Certification

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification), search by module number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Figura G.17 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 33-34/40.

### Shock and Vibration

To meet these specifications, you must panel mount the system.

#### Operating vibration

Random (IEC 60068-2-64)..... 5 g<sub>rms</sub>, 10 to 500 Hz

Sinusoidal (IEC 60068-2-6) ..... 5 g, 10 to 500 Hz

Operating shock(IEC 60068-2-27) ... 30 g, 11 ms half sine,  
50 g, 3 ms half sine,  
18 shocks at 6 orientations

### Environmental

National Instruments C Series modules are intended for indoor use only but may be used outdoors if installed in a suitable enclosure. Refer to the manual for the chassis you are using for more information about meeting these specifications.

#### Operating temperature

(IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2) ..... -40 to 70 °C

#### Storage temperature

(IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2) ..... -40 to 85 °C

#### Ingress protection

NI 9237 with RJ-50 ..... IP 30

NI 9237 with DSUB ..... IP 40

© National Instruments Corp.

35 NI 9237 Operating Instructions and Specifications

#### Operating humidity

(IEC 60068-2-56)..... 10 to 90% RH,  
noncondensing

#### Storage humidity

(IEC 60068-2-56)..... 5 to 95% RH,  
noncondensing

Maximum altitude..... 2,000 m

Pollution Degree ..... 2

### Environmental Management

National Instruments is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial to the environment and to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *NI and the Environment* Web page at [ni.com/environment](http://ni.com/environment). This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

NI 9237 Operating Instructions and Specifications 36

[ni.com](http://ni.com)

Figura G.18 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 35-36/40.

### Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



**EU Customers** At the end of the life cycle, all products *must* be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit [ni.com/environment/weee](http://ni.com/environment/weee).

### 电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



**中国客户** National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息, 请登录 [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china)。(For information about China RoHS compliance, go to [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china).)

### Calibration

You can obtain the calibration certificate and information about calibration services for the NI 9237 at [ni.com/calibration](http://ni.com/calibration).

Calibration interval ..... 1 year

## Where to Go for Support

---

The National Instruments Web site is your complete resource for technical support. At [ni.com/support](http://ni.com/support) you have access to everything from troubleshooting and application development self-help resources to email and phone assistance from NI Application Engineers.

National Instruments corporate headquarters is located at 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas, 78759-3504. National Instruments also has offices located around the world to help address your support needs. For telephone support in the United States, create your service request at [ni.com/support](http://ni.com/support) and follow the calling instructions or dial 512 795 8248. For telephone support outside the United States, contact your local branch office:

Australia 1800 300 800, Austria 43 662 457990-0,  
Belgium 32 (0) 2 757 0020, Brazil 55 11 3262 3599,  
Canada 800 433 3488, China 86 21 5050 9800,  
Czech Republic 420 224 235 774, Denmark 45 45 76 26 00,  
Finland 358 (0) 9 725 72511, France 01 57 66 24 24,  
Germany 49 89 7413130, India 91 80 41190000,  
Israel 972 3 6393737, Italy 39 02 41309277, Japan 0120-527196,

Figura G.19 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 37-38/40.



Korea 82 02 3451 3400, Lebanon 961 (0) 1 33 28 28,  
Malaysia 1800 887710, Mexico 01 800 010 0793,  
Netherlands 31 (0) 348 433 466, New Zealand 0800 553 322,  
Norway 47 (0) 66 90 76 60, Poland 48 22 328 90 10,  
Portugal 351 210 311 210, Russia 7 495 783 6851,  
Singapore 1800 226 5886, Slovenia 386 3 425 42 00,  
South Africa 27 0 11 805 8197, Spain 34 91 640 0085,  
Sweden 46 (0) 8 587 895 00, Switzerland 41 56 2005151,  
Taiwan 886 02 2377 2222, Thailand 662 278 6777,  
Turkey 90 212 279 3031, United Kingdom 44 (0) 1635 523545

National Instruments, NI, ni.com, and LabVIEW are trademarks of National Instruments Corporation. Refer to the *Terms of Use* section on [ni.com/legal](http://ni.com/legal) for more information about National Instruments trademarks. Other product and company names mentioned herein are trademarks or trade names of their respective companies. For patents covering National Instruments products/technology, refer to the appropriate location: **Help-Patents** in your software, the `patents.txt` file on your media, or the *National Instruments Patent Notice* at [ni.com/patents](http://ni.com/patents).

© 2006–2009 National Instruments Corp. All rights reserved.

374186E-01

Jun09

Figura G.20 - Especificações técnicas do módulo NI – 9237 – página 39-40/40.

Anexo H. Desenhos técnicos de todos os componentes

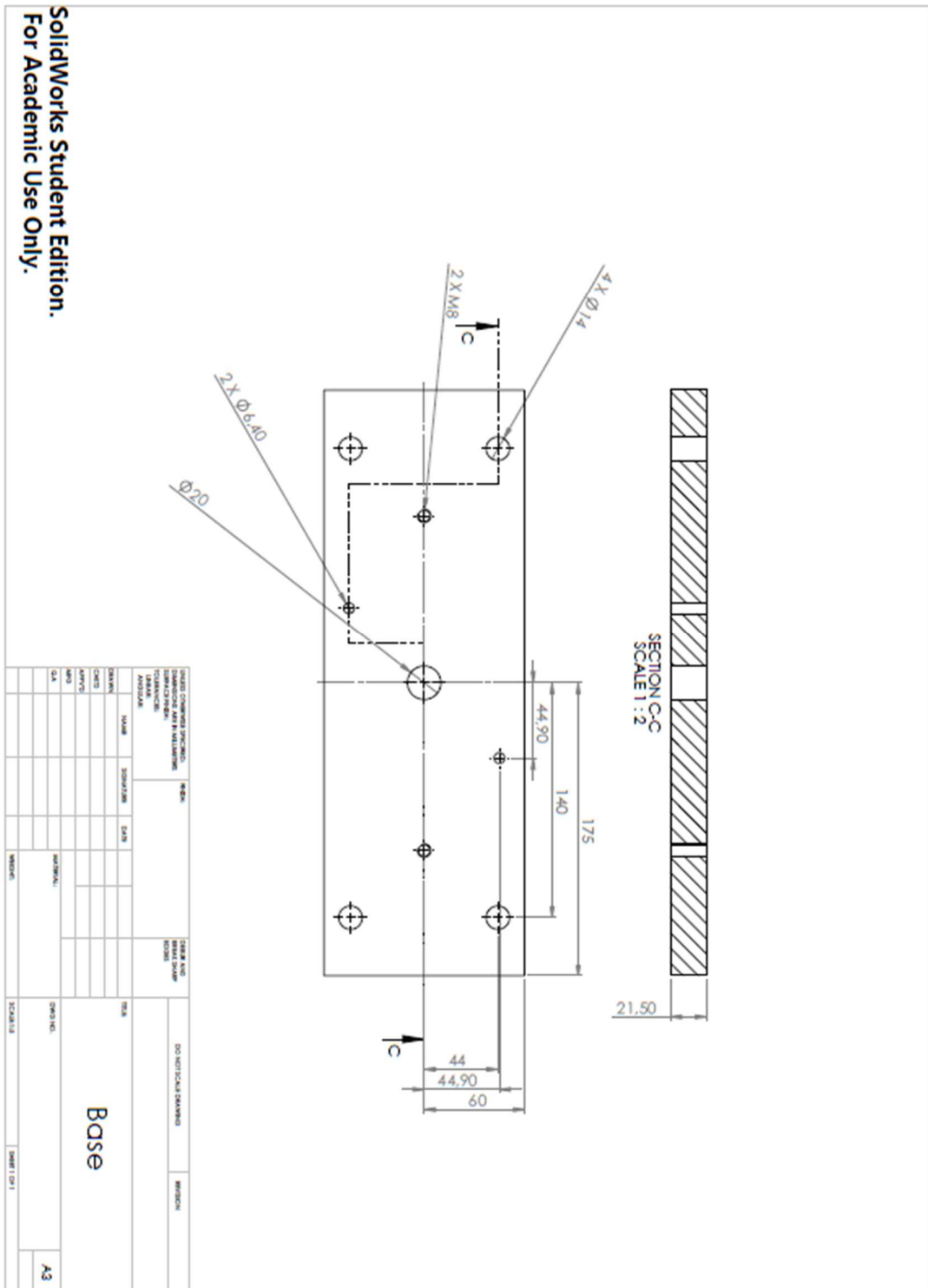


Figura H.1 - Desenho técnico da base.

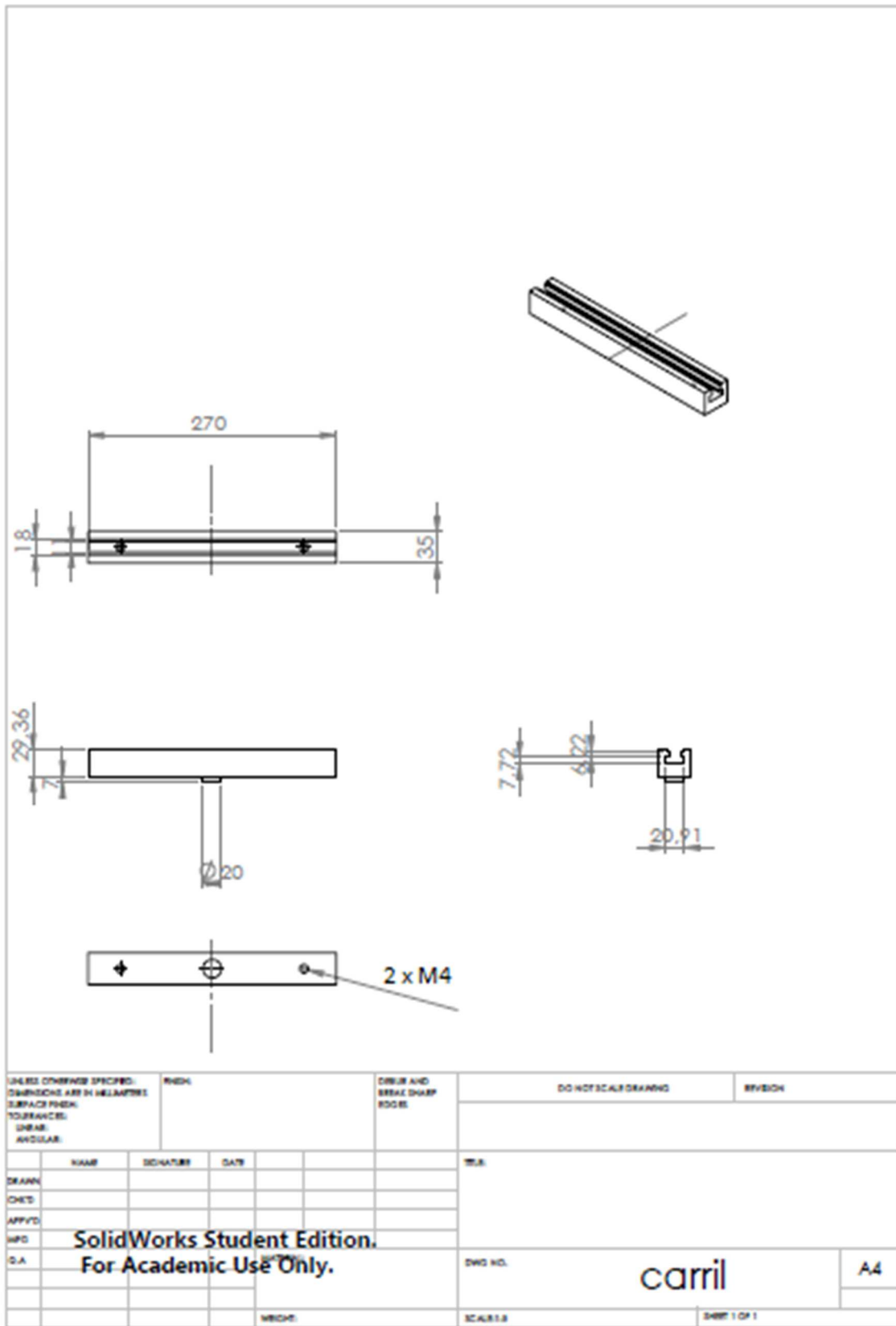


Figura H.2 - Desenho técnico do carril.

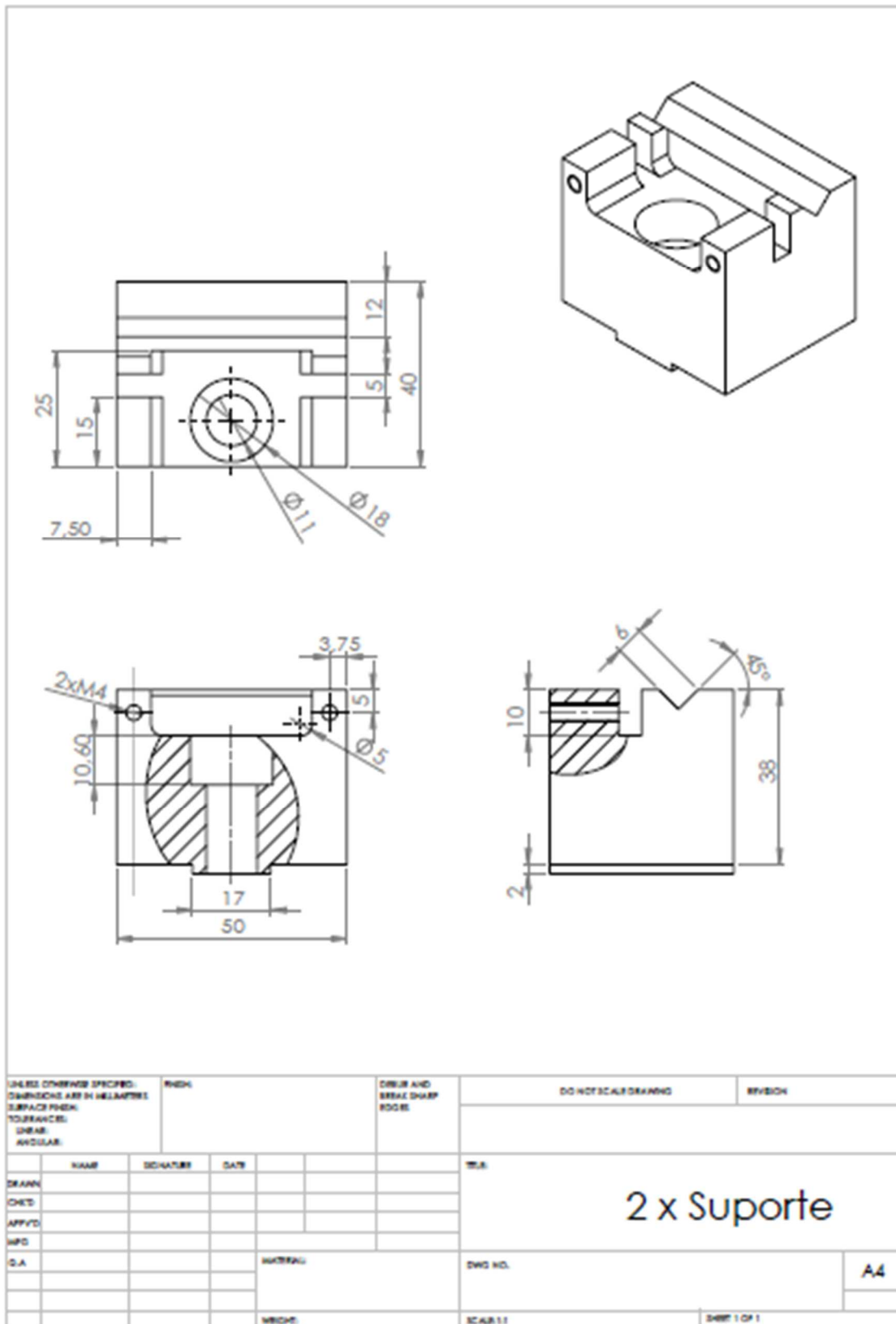


Figura H.3 - Desenho técnico do sistema de fixação lateral.

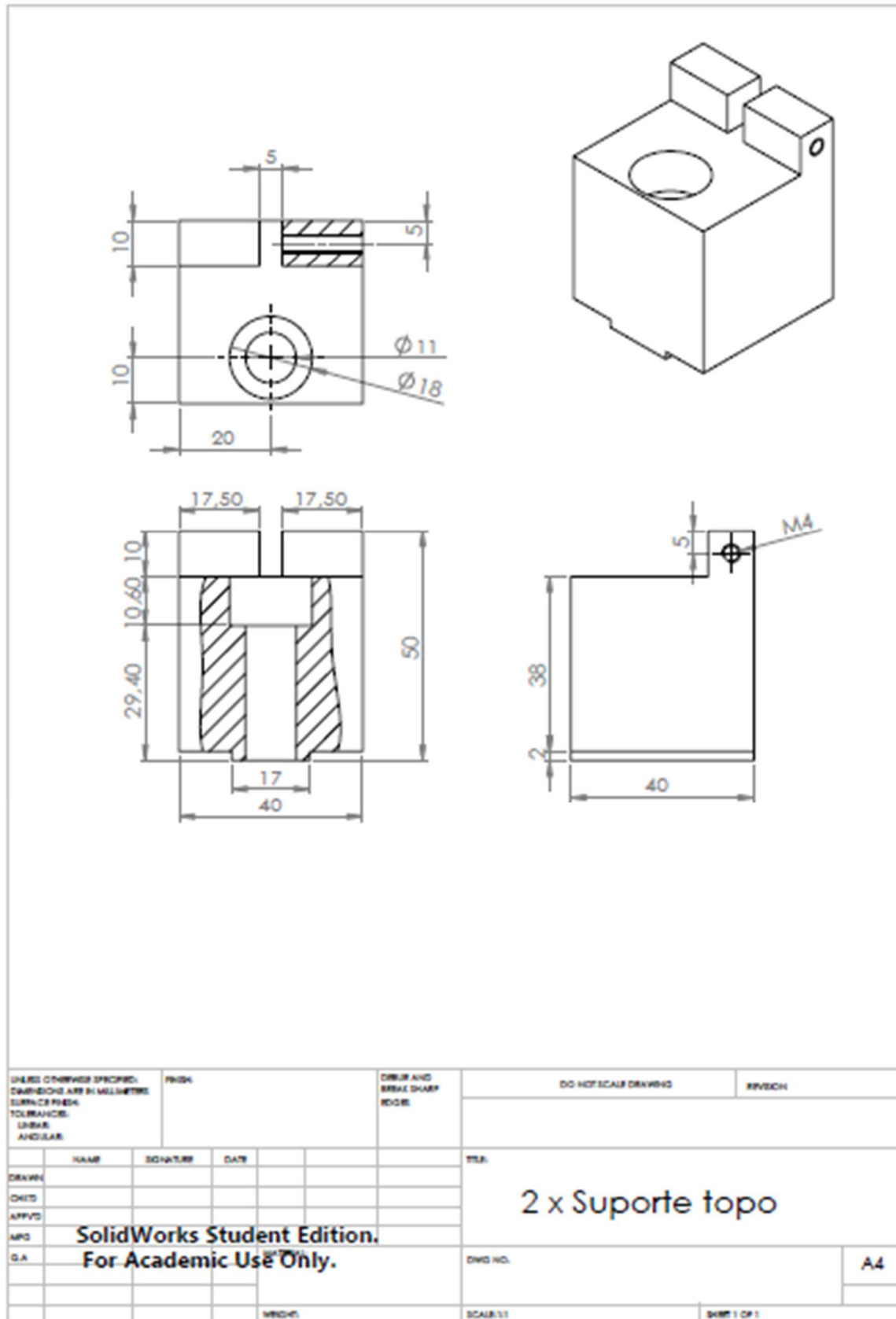


Figura H.4 - Desenho técnico do sistema de fixação longitudinal.

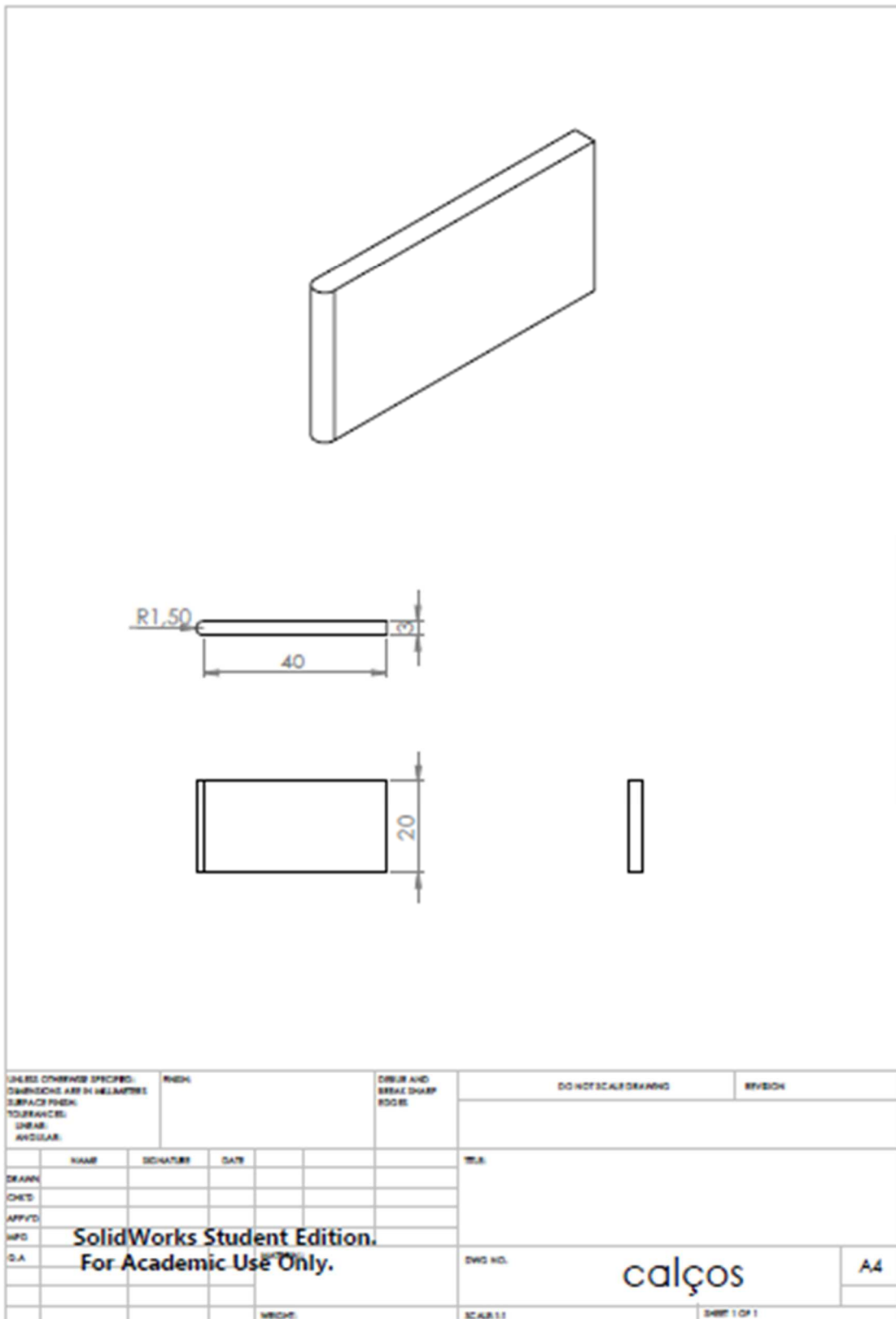


Figura H.5 - Calço de fixação lateral.

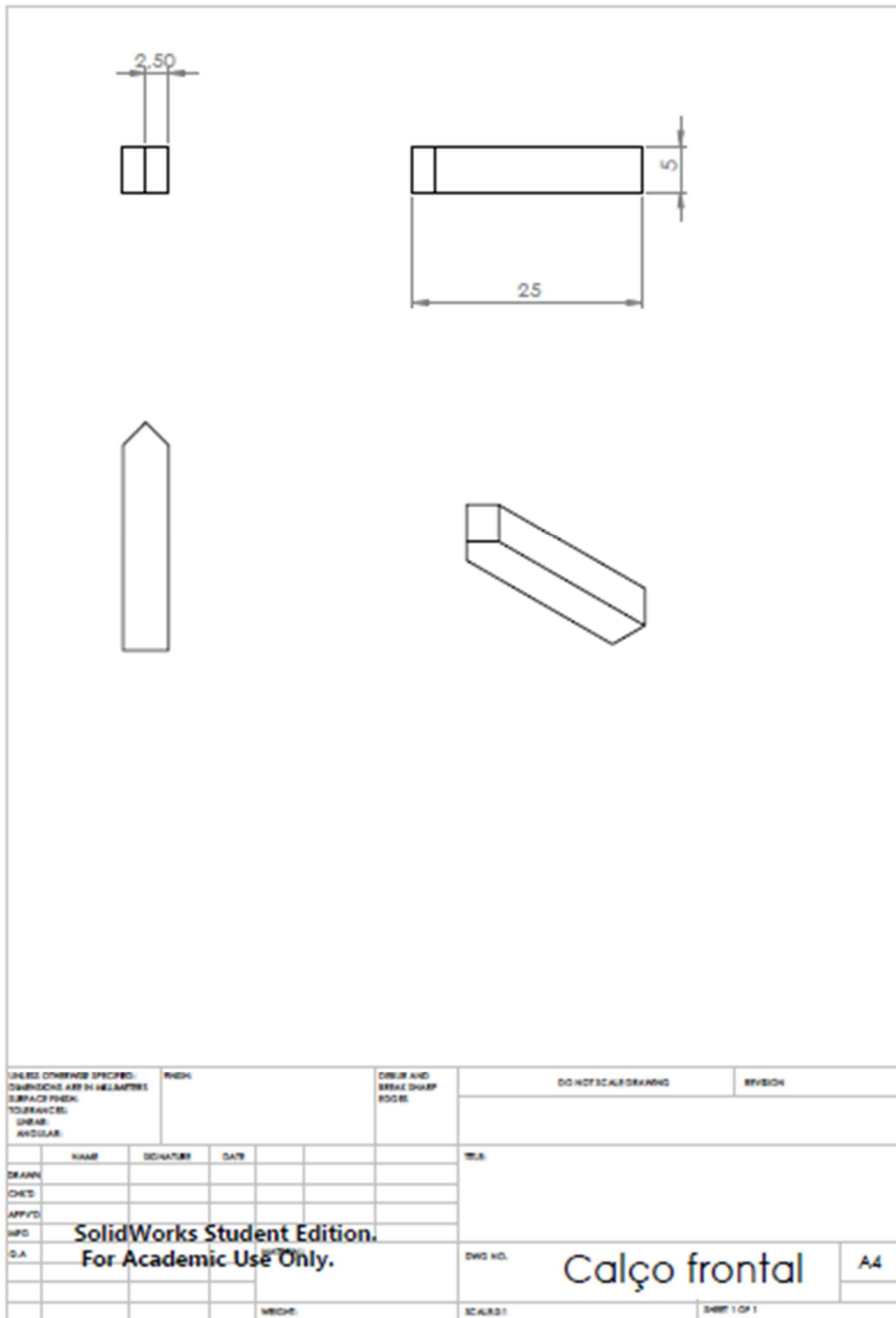


Figura H.6 - Calço de fixação frontal.

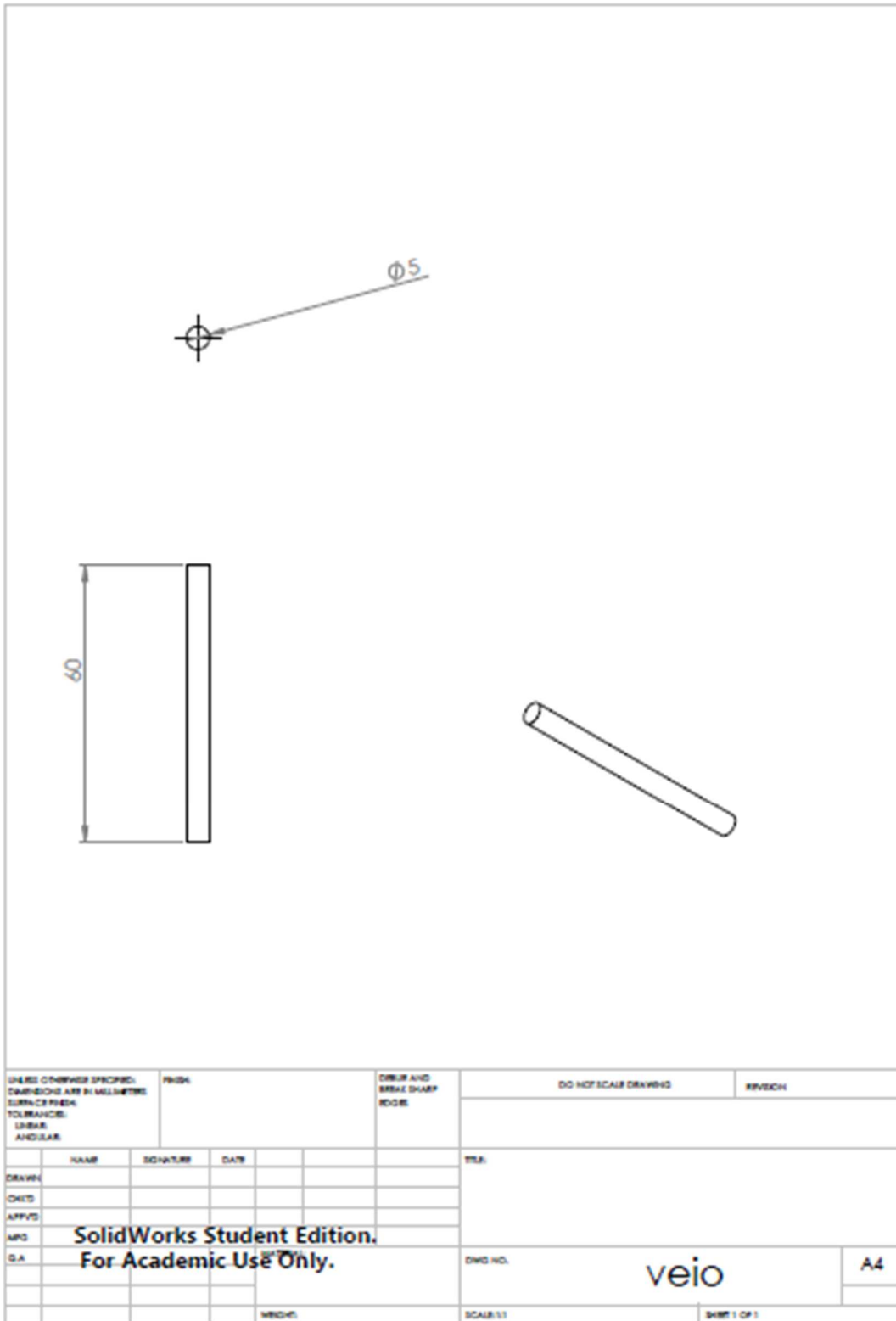


Figura H.7 - Desenho técnico do rolete de fixação.



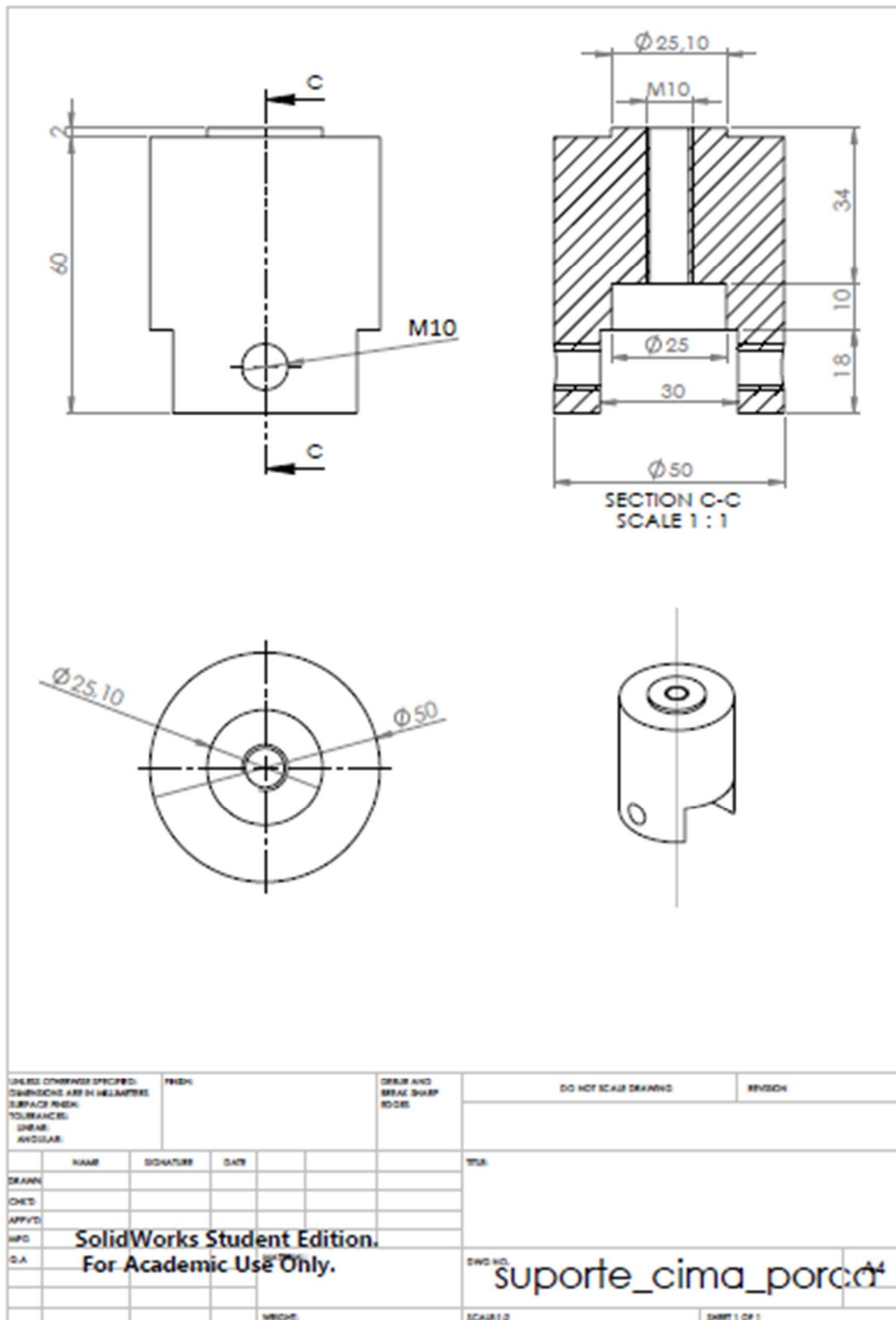


Figura H.8 - Desenho técnico do fixador ao travessão.

Anexo I. Programa de controlo – Labview

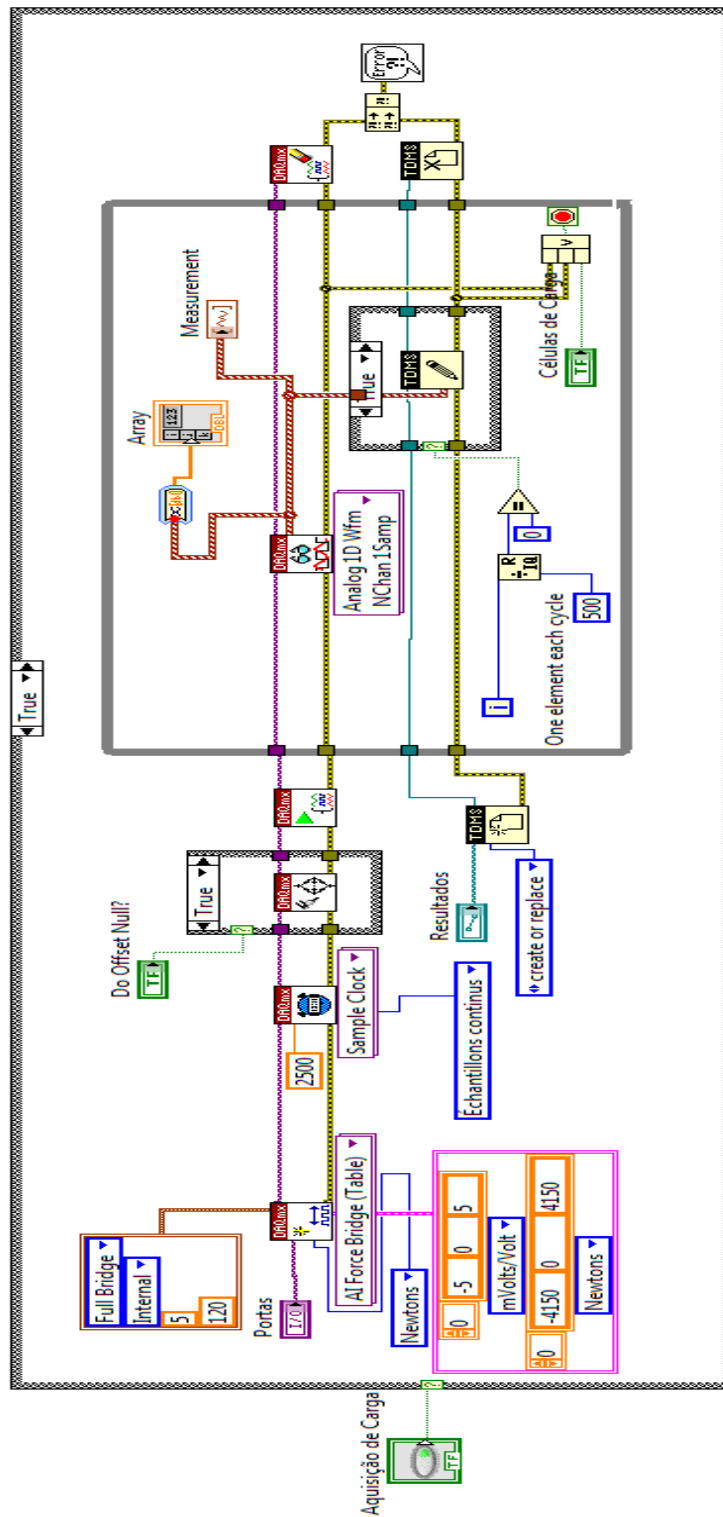


Figura I.1 - Diagrama de bloco da aquisição de sinal da célula de carga.

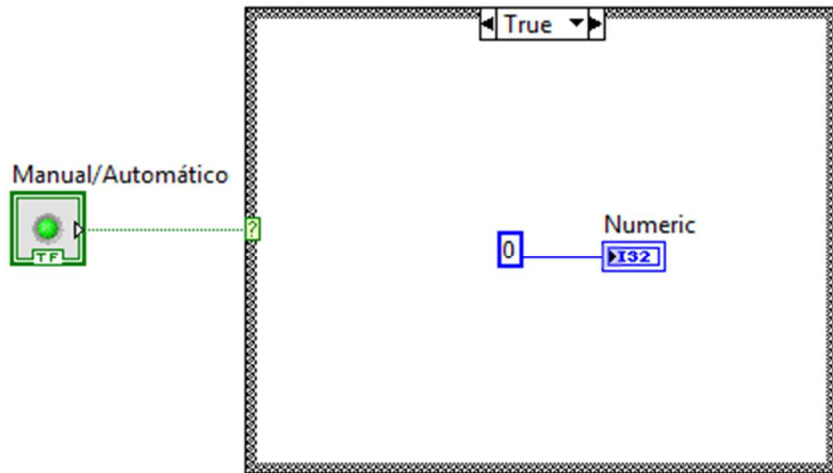


Figura I.2 - Diagrama de bloco da escolha do modo de controlo.

<<

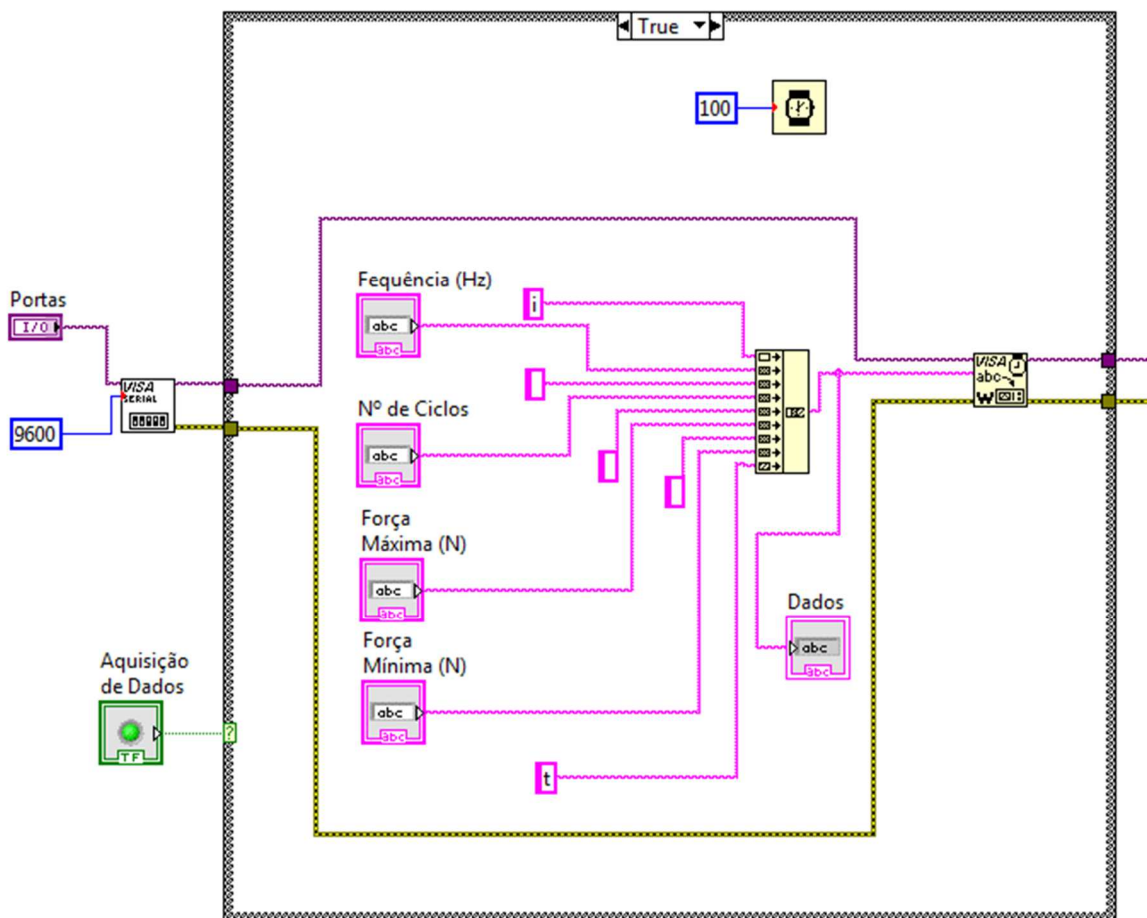


Figura I.3 - Diagrama de Bloco da aquisição de dados para o modo automático.

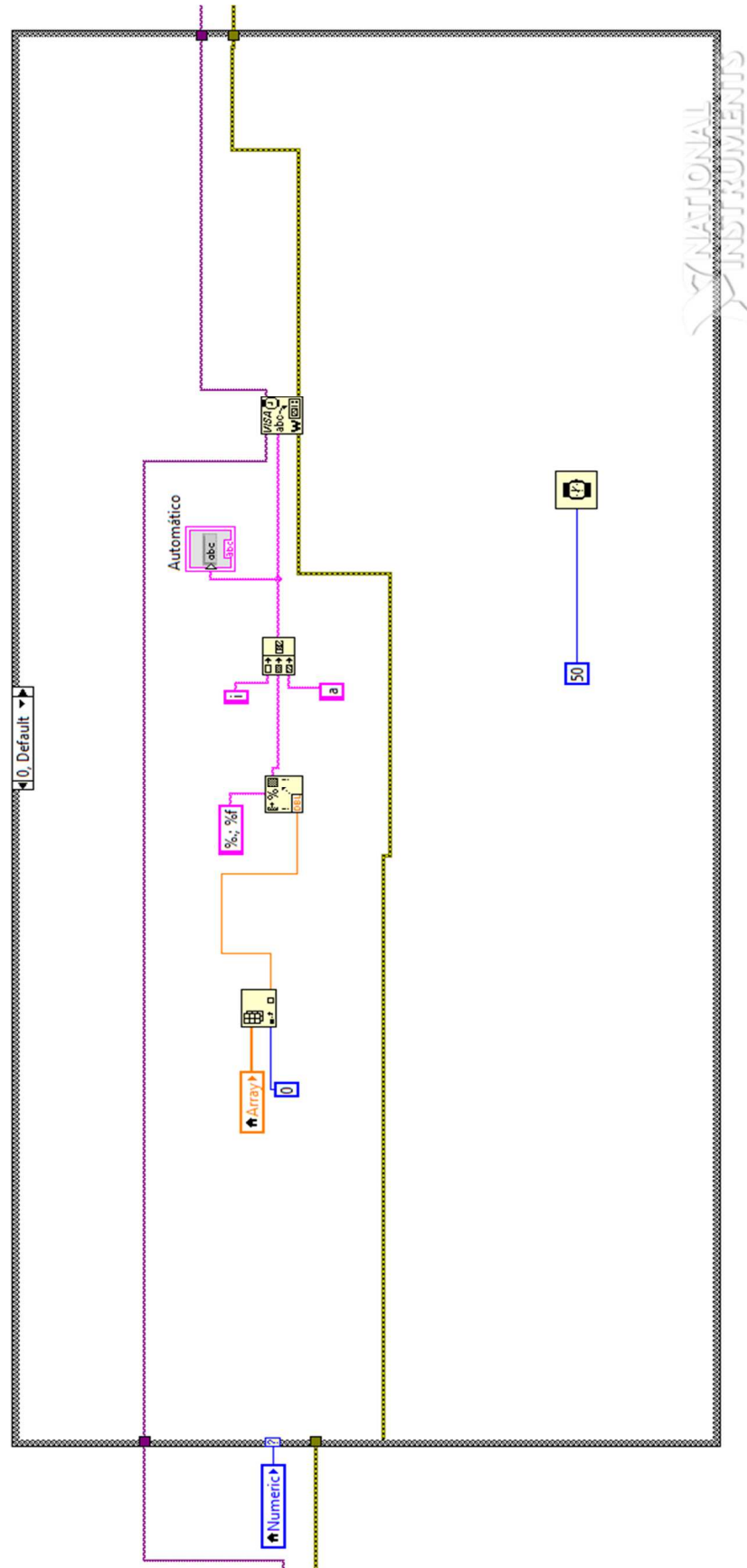


Figura I.4 - Diagrama de bloco relativo ao funcionamento do modo automático.

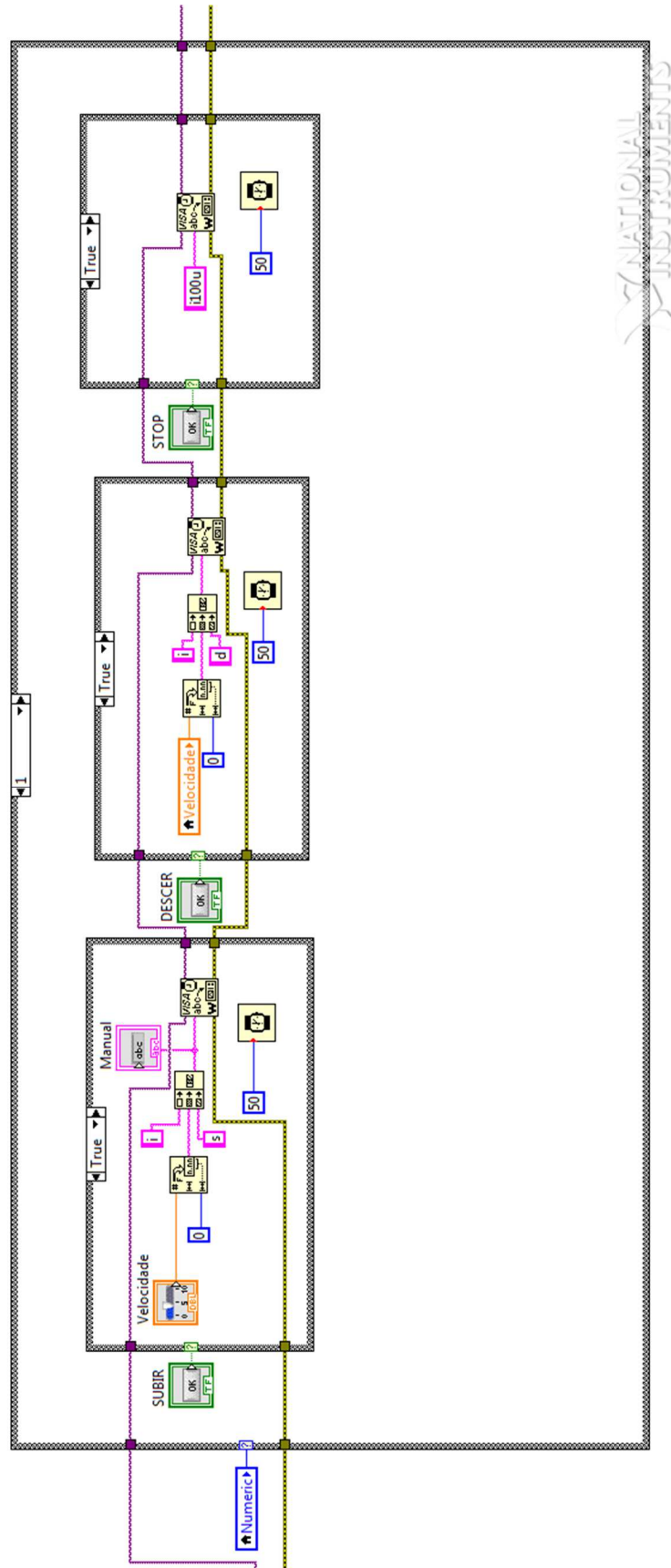


Figura I.5 - Diagrama de bloco relativo ao funcionamento do modo manual.

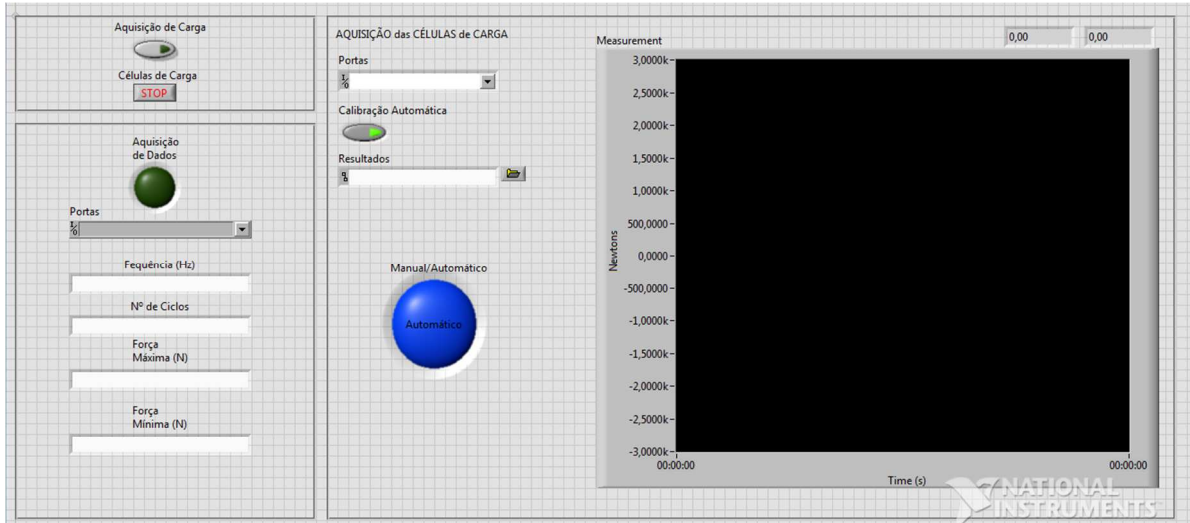


Figura I.6 - Painel Frontal do programa LabVIEW - parte 1.

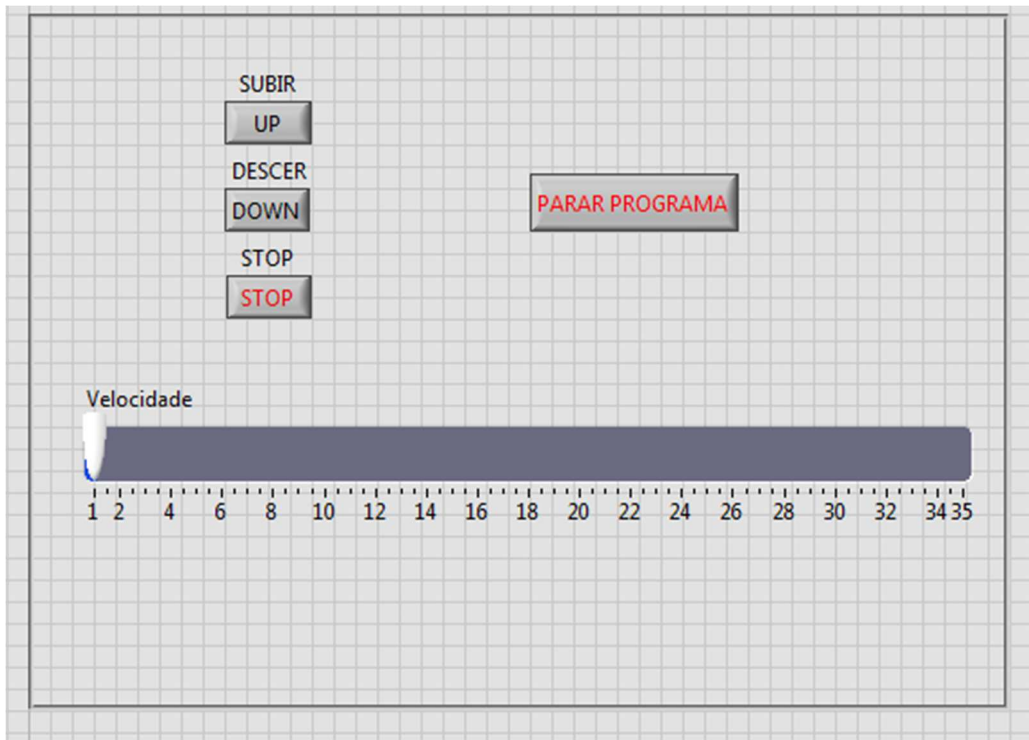


Figura I.7 - Painel Frontal do programa LabVIEW - parte 2.

## Anexo J. Código do Arduino

```

#include <SoftwareSerial.h>
char command;
char command0;
char inChar0;
boolean s = false;
boolean flag=true;
boolean flag1=true;
const int RX1 = 2;
const int TX1 = 3;
SoftwareSerial SoftSerialOne(RX1, TX1);
float carga = 0;
int teste = 0;
float v = 1;
int t = 1000;
String sd = "";
String inputString="";
int a = 0;
int nimp=0;
String subir;
boolean parametros = false;
int nc=0;
float nciclos=0;
float pmax=0;
float pmin=0;
float freq=0;
String ciclos="";
String pma="";
String pmi="";
String fre="";
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(RX1, INPUT);
  pinMode(TX1, OUTPUT);
  SoftSerialOne.begin(9600);
}

void loop() {
  if (parametros) {
    if (sd == "t") { //dados para o modo automático =>descodificar nciclos, etc
      SoftSerialOne.println (inputString);
      if(flag1){
        flag1 = false;
        nc=0;
        // SoftSerialOne.println (inputString);
        int n=0;
        while(inputString[n]!=' '){
          fre +=inputString[n];
          n++;
        }
        n++;
        while (inputString[n]!=' '){
          ciclos +=inputString[n];
          n++;
        }
      }
    }
  }
}

```

Figura J.1 - Código arduino – página 1/4.

```

n++;
while(inputString[n]!=' '){
    pma +=inputString[n];
    n++;
}
n++;
while(inputString[n]!=' '){
    pmi +=inputString[n];
    n++;
}
nciclos=ciclos.toFloat();
pmax=pma.toFloat();
pmin=pmi.toFloat();
freq=fre.toFloat();
SoftSerialOne.println (freq);
SoftSerialOne.println (nciclos);
SoftSerialOne.println (pmax);
SoftSerialOne.println (pmin);
fre="";
ciclos="";
pma="";
pmi="";
}
}

else{
    flag1 = true;
    v = inputString.toFloat(); //v, velocidade que vem do labview
    //    SoftSerialOne.println (v);
    //    SoftSerialOne.println (v);
    //    SoftSerialOne.println (t);
    //    SoftSerialOne.println (sd);
}
}

if (sd == "s") { //manual-subir
    t = 40 + 10000 / (v*v); // v, velocidade que vem do labview; 40 e 10000 são valores a calibrar.
    UP();
}

if (sd == "d") { //manual-descer
    t = 40 + 10000 / (v*v); // v, velocidade que vem do labview; 40 e 10000 são valores a calibrar.
    DOWN();
}

if (sd == "a" && nc < nciclos) { //modo automático
    t=40; //usar fórmula para calcular t em função da frequência ou velocidade
    if (flag){ //flag=true é a ordem para descer
        if (v <= pmax){ //v, valor da carga que vem do labview
            DOWN();
            nimp=nimp+1;
        }
    }
}

```

Figura J.2 - Código arduino – página 2/4.



```

    else{
        SoftSerialOne.print (v); //escrever valores de carga máxima
        SoftSerialOne.print (" ");
        SoftSerialOne.print (nimp); //escreve nº impulsos na descida
        nimp=0;
        flag=false;
    }
}
else{ //flag=false é a ordem para subir
    if (v >= pmin) { //v, valor da carga que vem do labview
        UP();
        nimp=nimp+1;
    }
    else{
        nc++; //mais um ciclo terminado
        SoftSerialOne.print (" ");
        SoftSerialOne.print (v); //escrever valores de carga mínima
        SoftSerialOne.print (" ");
        SoftSerialOne.println (nimp); //escreve nº impulsos na descida
        nimp=0;
        flag=true;
    }
}
}
inputString = "";
parametros = false;
}

void UP() {
    digitalWrite(8, HIGH);
    delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(8, LOW);
    delayMicroseconds(τ);
}

void DOWN() {
    digitalWrite(13, HIGH);
    delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(13, LOW);
    delayMicroseconds(τ);
}
void STOP() {
}

```

Figura J.3 - Código arduino – página 3/4.

```
void serialEvent() {
  if (Serial.available() && inputString == "") {
    char inChar0 = (char)Serial.read();
    while (inChar0 == 'i') {
      char inChar = (char)Serial.read();
      if (inChar == 'u' || inChar == 's' || inChar == 'd' || inChar == 't' || inChar == 'a') {
        parametros = true;
        sd = String(inChar);
        inChar0 = 'f';
      }
      else {
        if (inChar=='.' || inChar==' ' || (inChar>='0' && inChar<='9')){
          inputString += inChar;
        }
      }
    }
  }
}
```

Figura J.4 - Código arduino – página 4/4.