



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Departamento de Engenharia Electromecânica

**Aperfeiçoamento de uma máquina para ensaio de
amortecedores**

Francisco João Anastácio Duarte

Covilhã, Agosto de 2008



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR



Departamento de Engenharia Electromecânica

Aperfeiçoamento de uma máquina para ensaio de amortecedores

Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electromecânica

Francisco João Anastácio Duarte

Licenciado em Engenharia Electromecânica pela Universidade da Beira Interior

Realizado sob a orientação científica de:

Engenheiro António Eduardo Vitória do Espírito Santo

(Assistente – Dept.º de Eng.ª Electromecânica - Universidade da Beira Interior)

Professor Doutor Paulo Manuel Oliveira Fael

(Professor Auxiliar – Dept.º de Eng.ª Electromecânica - Universidade da Beira Interior)

Resumo

O objectivo central deste trabalho é desenvolver e aperfeiçoar uma máquina para ensaio de amortecedores e suspensões, que permita estudar estes equipamentos através das curvas características obtidas.

O funcionamento dos amortecedores e suspensões é abordado no início do trabalho, permitindo esta análise caracterizar o seu comportamento. Em paralelo são identificadas as grandezas a medir com a máquina a desenvolver.

O aperfeiçoamento da máquina começa com uma abordagem às forças envolvidas, e com os aspectos a melhorar no projecto mecânico, redimensionando-se os componentes necessários.

É feito um estudo do ruído e perturbações electromagnéticas em sistemas electromecânicos, identificando-se as técnicas e modos de tratamento destes, de modo a filtrá-los da electrónica e dos sinais adquiridos pelos componentes da máquina de ensaio de amortecedores. Seguem-se as alterações ao projecto electrónico, introduzindo-se filtros, novos sensores e novos circuitos de instrumentação.

É criado um programa de interface utilizador-máquina, que permita ao utilizador realizar os ensaios de forma simples, seleccionando os dados que pretende ensaiar, e obter os gráficos finais, de forma automática. É também desenvolvido um novo programa para o microcontrolador. Estuda-se depois o processo de certificação da máquina, abordando-se todos os aspectos a respeitar, inclusive a realização de um manual do utilizador, que é apresentado neste trabalho.

São feitos ensaios de amortecedores e suspensões com a máquina desenvolvida, permitindo tirar conclusões do trabalho realizado, as quais são apresentadas de seguida para terminar o trabalho, identificando-se os pontos fortes alcançados, e dando-se indicações acerca dos trabalhos futuros.

Palavras-chave: Máquina de ensaio de amortecedores, amortecedor, ruído electrónico, perturbações electromagnéticas, programa de interface homem máquina, MSP430, certificação.

Abstract

The main goal of this work is to develop and improve a machine for rehearsal of shock absorbers and suspensions, in way to obtain their characteristic curves.

To start the work, it begins by analyzing the operation of the shock absorbers and suspensions, in way to know the behavior of these, to know what to measure, and how to measure with the machine to project.

The improve of the machine starts with an approach to the forces evolved, and with the details that can be improved in the mechanic project, dimensioning all the necessary components.

It's done a study of the noise and electromagnetic disturbances in electromechanic systems, in order to identify the techniques to treat those. Then, it's done the improvements in electronic project, filtering the systems, applying new sensors, and new instrumentation circuits.

It's created a human-machine interface program that allows the user to do the tests with the machine in a simple way, by selecting the values that want to test, and obtain the final results and graphs automatically. It's also developed a new program to the microcontroller. Then, it's studied the process of certification of the machine, presenting all the aspects to respect, and doing a user guide, also presented in this work.

Tests with shock absorbers and suspensions are done and presented in the end of the work, in way to take the final conclusions, that are explained in the final chapter, identifying the strong points of this work, and given the indications to future work.

Keywords: *Shock Dynamometer, shock absorber, electronic noise, electromagnetic disturbances, human machine interface program, MSP430, certification.*

Agradecimentos

A realização com êxito do presente trabalho apenas foi possível graças ao empenho e apoio demonstrado por diversos professores, colegas e amigos, aos quais me gratifica testemunhar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Engenheiro António Espírito Santo, por todos os conhecimentos transmitidos ao longo do trabalho, fundamentais para a realização deste com sucesso, e agradeço sobretudo pelo apoio, encorajamento, e amizade mostrada ao longo do tempo, sem os quais teria sido bastante difícil concluir todo o trabalho realizado da forma como concluí.

Ao Professor Paulo Fael agradeço bastante a motivação inicial para realizar este trabalho, ainda como projecto final de curso da minha licenciatura, o interesse pelo mesmo, as ideias e conselhos transmitidos no seu decorrer, e claro, o auxílio no dimensionamento de todo o projecto mecânico. Apesar de neste trabalho já não ter tido uma intervenção tão grande, continua a ser uma pessoa a quem agradeço bastante por toda a contribuição dada.

Ao Professor Francisco Brójo, presidente do Departamento de Engenharia Electromecânica (DEM-UBI), deixo também um agradecimento pela disponibilização do laboratório de Energética e Máquinas Térmicas, onde tive a máquina de ensaio de amortecedores durante todo o mestrado, e ainda pelo interesse demonstrado na realização deste projecto.

Ao meu colega Tiago Godinho agradeço todo o apoio dado na realização do programa de interface homem máquina, feito numa linguagem de programação totalmente nova para mim, que sem o seu apoio teria tido bastantes dificuldades em ultrapassar alguns obstáculos em tempo útil. Do mesmo modo agradeço ao Nuno Ferreira, da empresa OmniSys, que também me ajudou bastante na realização do referido programa, mostrando um grande espírito de ajuda e cooperação.

À empresa Solar Earth, onde trabalhei durante o decorrer do mestrado, e a todos os seus gerentes, agradeço por me terem dado dispensa no horário das aulas e reuniões de mestrado, fundamental para conseguir o acompanhamento que tive por parte do meu orientador.

Apesar de neste trabalho de aperfeiçoamento já não terem contribuído com o seu trabalho da mesma forma como contribuíram na fase de montagem da máquina, não posso deixar de

agradecer ao senhor Carlos Rocha e ao senhor João Correia, por toda a ajuda, disponibilidade, conselhos e amizade demonstrada na construção da máquina, fundamentais para a realização dessa etapa com o sucesso que foi obtido.

Aos meus pais fica o agradecimento por todo o apoio demonstrado ao longo do trabalho, apoio esse fundamental para nas horas de maior tensão conseguir ter a calma e seriedade necessárias para ultrapassar os problemas que surgiam. Ao meu pai agradeço ainda toda a ajuda dada nos ensaios dos amortecedores e suspensões, conseguindo assim realizar estes de forma simples e eficaz.

Ao amigo Rui Assunção agradeço a ideia do projecto, conhecimentos transmitidos acerca do funcionamento dos amortecedores e suspensões, fornecimento de material técnico para estudar o funcionamento dos referidos equipamentos e, principalmente, o financiamento do projecto, sem o qual dificilmente teria sido realizada a montagem da máquina.

Resta agradecer a todas as pessoas do DEM-UBI que contribuíram para a realização deste projecto, com a disponibilização da sua ajuda, conselhos, ou de laboratórios para realizar alguns ensaios e construção da máquina.

Aproveito também para homenagear os Engenheiros Humberto Santos e Peixoto Duarte, que infelizmente faleceram no decorrer deste ano, com os quais falava regularmente e que deixam saudade. O Eng. Peixoto Duarte deu uma grande contribuição para este trabalho, na fase de projecto e selecção do motor, redutor e variador de velocidade, tendo inclusivamente usado os seus vários conhecimentos para facilitar a comunicação com fabricantes, sem os quais a selecção e compra do motor teria sido bastante mais dificultada e dispendiosa. Foi também uma pessoa que me ajudou bastante no ensaio do motor eléctrico e sua caracterização, realizada fora do tempo de aulas, mostrando ser uma pessoa sempre disponível e pronta a ajudar naquilo que podia. A eles o meu bem-haja, e que descansem em paz.

Um agradecimento final aos meus familiares e amigos que, de forma directa ou indirecta, me apoiaram ao longo deste projecto, tanto na construção e instalação da máquina, como na motivação para levar este trabalho até ao fim.

Índice

<i>Resumo</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Agradecimentos</i>	<i>v</i>
<i>Índice</i>	<i>vii</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>xi</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>xii</i>
<i>Lista de Símbolos</i>	<i>xix</i>

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	2
1.1.1. Princípio de funcionamento do amortecedor	3
1.1.2. Importância de testar o amortecedor	6
1.2. Constituição e Funcionamento da Máquina	7
1.2.1. Introdução à máquina	7
1.2.2. Princípio de funcionamento da máquina de ensaio de amortecedores	9
1.2.3. Apresentação da máquina de ensaio de amortecedores desenvolvida	11
1.2.4. Identificação de limitações na máquina existente	14
1.3. Objectivos do Trabalho	15
1.4. Visão Geral da Organização do Trabalho	16
2. Alterações ao Projecto Mecânico	21
2.1. Revisão do Projecto Mecânico	22
2.2. Análise de Forças	30
2.2.1. Forças a desenvolver pela máquina	33
2.2.2. Forças realizadas sobre a estrutura	35
2.2.3. Forças nos apoios	38
2.3. Alteração da Posição do Redutor	45
2.4. Novos Apoios para Amortecedor	47

2.5. Nota Conclusiva	51
3. Análise de Perturbações e Ruído em Sistemas Electromecânicos	53
3.1. As Perturbações Electrónicas	54
3.1.1. Fontes de perturbações	54
3.1.2. Modos de transferência	55
3.1.3. Espectro de frequências	55
3.1.3.1. Tipos de espectros	56
3.1.3.2. Espectro de perturbações, banda passante e não linearidade do circuito	57
3.1.4. Modo comum e modo série	58
3.2. Perturbações por Ligação Galvânica	59
3.2.1. Perturbações conduzidas – filtragem das linhas	60
3.2.1.1. Tipos de filtros	60
3.2.1.2. Escolha dos componentes	62
3.2.1.3. Montagem dos filtros	63
3.2.2. Sobretensões perturbadoras – limitadores de amplitude	64
3.2.3. Massa dos sinais – problemas e soluções	66
3.2.3.1. Influência da diferença de potencial da massa	66
3.2.3.2. Organização das ligações à massa	67
3.3. Perturbações por Ligação Electromagnética	68
3.3.1. Onda electromagnética – campo próximo – campo distante	68
3.3.2. Influência de uma onda electromagnética num circuito	70
3.3.3. Blindagem electromagnética	71
3.3.3.1. Interação onda electromagnética – blindagem	71
3.3.3.2. Impedância de onda	73
3.3.3.3. Atenuação por reflexão	74
3.4. Ruído de Fundo	77
3.4.1. Tipos de ruído	77
3.4.1.1. Ruído térmico ou de <i>Johnson</i>	77
3.4.1.2. Ruído de constituição (<i>excess noise</i>)	78
3.4.1.3. Ruído de descarga ou de <i>Schottky</i> (<i>shot noise</i>)	78
3.4.1.4. Ruído de cintilação (<i>flicker noise</i>)	78
3.4.2. Cálculo das tensões e correntes de ruído	79
3.4.3. Esquemas equivalentes para o ruído	80
3.4.3.1. Esquema de ruído de um circuito resistivo	81
3.4.3.2. Esquema de ruído de um transístor	82
3.4.3.3. Esquema do ruído do amplificador operacional	83
3.4.3.4. Esquema do ruído do amplificador de instrumentação	85
3.5. Nota conclusiva	86

4. Tratamento das Perturbações e Ruído Electrónico	89
4.1. Protecção dos Circuitos de Entrada Contra Perturbações	90
4.1.1. Perturbações na instrumentação e possíveis soluções tecnológicas	90
4.1.2. Fonte isolada da massa local – instrumentação ligada à rede equipotencial da terra	91
4.1.2.1. Amplificador de entrada do tipo assimétrico	91
4.1.2.2. Amplificador de entrada do tipo simétrica (diferencial)	93
4.1.3. Fonte ligada à sua massa local – Instrumentação isolada da ligação equipotencial à terra	94
4.1.3.1. Circuito de protecção	95
4.1.3.2. Blindagem	96
4.1.4. Fonte e instrumentação ligadas a duas massas distintas	97
4.1.4.1. Utilização de um amplificador diferencial	97
4.1.4.2. Isolamento galvânico entre a fonte de sinal e a instrumentação	99
4.2. Filtros	100
4.2.1. Tipos de filtros	100
4.2.1.1. Famílias de filtros	101
4.2.1.2. Métodos de realização	103
4.2.2. Condições impostas e parâmetros do filtro	106
4.2.2.1. Condição relativa à banda passante	107
4.2.2.2. Condição relativa à banda atenuada	107
4.2.2.3. Síntese. Caso do filtro de Butterworth	108
4.2.3. Relação entre a ordem do filtro, precisão e frequência de amostragem	109
4.3. Nota Conclusiva	110
5. Alterações ao Projecto Electrónico	111
5.1. Revisão do Projecto Electrónico	112
5.2. Tratamento do Ruído do VEV	118
5.3. Tratamento do Ruído da Fonte de Alimentação	120
5.4. Tratamento do Ruído – Aplicação de Filtros	125
5.5. Alterações na Instrumentação	128
5.6. Nova Placa de Circuito Impresso	133
5.7. Ligação do MSP com o PC	136
5.8. Nota Conclusiva	138
6. Programa de Interface Utilizador-Máquina	141
6.1. Introdução ao Programa de Interface	142
6.2. Descrição do Programa de Interface	144
6.2.1. Selecção de dados	145
6.2.2. Envio de dados	149

6.2.3. Definição do <i>form</i> gráficos. Recepção e tratamento de dados	150
6.2.4. Apresentação de resultados	157
6.2.5. Opções da barra de ferramentas	159
6.3. Alteração do Programa de Controlo	162
6.3.1. Introdução ao programa de controlo do MSP430	162
6.3.2. Fluxograma do programa de controlo	165
6.3.3. Descrição do programa desenvolvido	167
6.4. Nota Conclusiva	173
7. Certificação da Máquina	175
7.1. Introdução à Certificação da Máquina	176
7.2. Normas de Segurança	178
7.2.1. Directiva Máquinas	178
7.2.2. Directiva EMC	186
7.2.3. Análise de risco	187
7.2.4. Alterações a realizar	189
7.3. Calibração	194
7.3.1. Calibração existente	195
7.3.2. Calibração a realizar	197
7.4. Processo de Certificação do Equipamento	198
7.5. Nota Conclusiva	202
8. Ensaio e Verificação do Equipamento	203
8.1. Ensaio de um Amortecedor	204
8.2. Ensaio de uma Suspensão	213
9. Conclusões	219
9.1. Contribuições Originais	220
9.2. Sugestões para Trabalho Futuro	221
9.3. Conclusão Final	222
Anexo A – Manual do Utilizador	223
Anexo B – Desenhos de Conjunto	253
Anexo C – Desenhos de Pormenor	267

Lista de Tabelas

3.1 – Exemplo de valores para filtros passa-baixo de Butterworth.	80
4.1 – Razão f_e/f_h em função da ordem k do filtro e da precisão ε necessária ($\varepsilon=\varepsilon_1=\varepsilon_2$).	110
6.1 – Constituição do <i>pacotePC</i> .	149
6.2 – Significado do primeiro byte do <i>pacotePC</i> .	149
6.3 – Parâmetros das colunas da matriz <i>resultadoFinal</i> .	150
6.4 – Significado do primeiro byte do <i>pacoteMSP</i> .	152
6.5 – Constituição do <i>pacoteMSP</i> .	153
6.6 – Variáveis associadas aos dados do <i>pacoteMSP</i> .	154
6.7 – Relação entre a velocidade de rotação e o tempo esperado para uma volta do excêntrico.	165
7.1 – Calibração inicial da célula de carga, à compressão.	195
7.2 – Calibração inicial da célula de carga, à tracção.	196
I – Relação dos cursos de ensaio com os furos do excêntrico.	233

Lista de Figuras

1.1 – Amortecedor de acção directa.	2
1.2 – Sistema de amortecedores de moto: (a) amortecedor traseiro; (b) suspensão dianteira.	3
1.3 – Detalhes do interior de um amortecedor [4].	4
1.4 – Furos na sede da válvula, no pistão do amortecedor [4].	5
1.5 – Movimento de extensão de um amortecedor: deflexão das anilhas [4].	5
1.6 - Movimento de compressão de um amortecedor: deflexão das anilhas [4].	6
1.7 – Exemplos de máquinas para ensaio de amortecedores (a) esquema com elementos principais [5]; (b) imagem de máquina completa.	8
1.8 – Representação do funcionamento da máquina [5].	9
1.9 – Gráfico <i>Força-Velocidade</i> de um ensaio realizado a um amortecedor [5].	11
1.10 – Imagem da máquina de ensaio de amortecedores, após concluído o projecto e a sua construção.	13
2.1 – Esquema de uma suspensão dianteira de uma mota de todo-o-terreno.	23
2.2 – Esquemas das hipóteses da estrutura a projectar (a) apoio do redutor na base; (b) apoio do redutor ligado ao bloco central.	24
2.3 – Esquema da estrutura a projectar seleccionado.	24
2.4 – Formato dos apoios da suspensão (e amortecedor): (a) apoio superior; (b) apoio inferior.	25
2.5 – Apoios da suspensão e amortecedor projectados: (a) apoio superior; (b) apoio inferior	26
2.6 – Representação do cilindro.	27
2.7 – Representação da biela superior.	27
2.8 – Representação da biela inferior.	28
2.9 – Representação do excêntrico.	29
2.10 – Representação da máquina projectada.	30
2.11 – Gráfico <i>Força-Velocidade</i> de um ensaio de um amortecedor.	31
2.12 – Esquema do funcionamento da biela-manivela da máquina.	33

2.13 – Decomposição do vector R.	34
2.14 – Base da estrutura, com local de aplicação do redutor.	35
2.15 – Forças realizadas na base da estrutura: (a) caso 1, vista de frente; (b) caso 2, vista de frente; (c) caso 1, vista de lado; (d) caso 2, vista de lado.	36
2.16 – Forças realizadas nos apoios do redutor: (a) caso 1; (b) caso 2.	37
2.17 – Apoio Superior e Inferior do amortecedor/suspensão: vista frontal.	38
2.18 – Apoio do amortecedor: representação de forças.	39
2.19 – Veio (parafuso) de união do amortecedor ao apoio: caso simplesmente apoiado.	40
2.20a – Veio (parafuso) de união do amortecedor ao apoio: diagrama de corpo livre.	40
2.20b – Veio (parafuso) de união do amortecedor ao apoio: diagrama de corpo livre de <i>AD</i> e <i>DB</i> .	41
2.20c – Veio (parafuso) de união do amortecedor ao apoio: diagrama de corpo livre de <i>AE</i> e <i>EB</i> .	41
2.20d – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: diagrama do esforço transverso.	42
2.20e – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: diagrama do momento flector (análise para caso simplesmente apoiado).	42
2.21a – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: caso biencastado.	43
2.21b – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: diagrama de corpo livre de <i>AC</i> a <i>CB</i> .	43
2.21c – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: diagrama do momento flector (análise para barra biencastada).	44
2.22 – Veio de ligação do amortecedor ao apoio: obtenção do diagrama final do momento flector.	44
2.23 – Veio de ligação do amortecedor ao apoio: apresentação do diagrama final do momento flector.	45
2.24 – Nova posição do redutor mecânico e ligações deste na base da estrutura (parafusos).	46
2.25 – Vista lateral da máquina (a) antes da alteração da posição do redutor, e (b) após removido o encoder e alterada a posição do redutor.	46
2.26 – Representação de um amortecedor, identificando as zonas de ligação deste com os apoios.	47
2.27 – Representação do novo apoio superior, específico para ensaiar amortecedores.	48
2.28 – Representação do novo apoio inferior, específico para ensaiar amortecedores.	49
3.1 – Tipos de perturbações: a) perturbação de modo comum; b) perturbação de modo série.	58
3.2 – Estruturas de filtros passa baixo passivos: a) em L; b) em T, c) em Π .	61

3.3 – Filtros de rejeição: a) célula de rejeição; b) célula de rejeição de banda regulável; c) resposta em frequência [1]	61
3.4 – Filtragem na entrada de um amplificador de instrumentação: a) filtragem de modo comum; b) filtragem de modo diferencial [1].	63
3.5 – Filtragem da tensão do sector: a) filtro de modo comum; b) filtro de modo diferencial; c) filtro combinado de modo comum e de modo diferencial utilizando uma bobine de fluxo.	64
3.6 – Limitador de amplitude: principio de utilização.	65
3.7 – Influência sobre os sinais da diferença de potencial da massa, quando os componentes são ligados em série sobre o condutor de referência.	66
3.8 – Ligações à massa: a) montagem em paralelo ou em estrela; b) montagem série-paralelo.	67
3.9 – Circuito somado a uma onda electromagnética plana.	70
3.10 – Reflexões e transmissões de uma onda electromagnética por uma blindagem.	72
3.11 – Ruído de fundo: a) andamento da variação do ruído de uma tensão ou de uma corrente com o tempo; b) ruído sobreposto a um sinal.	77
3.12 – Associação de resistências: a) esquema de Thévenin; b) esquema de Norton; c) resistências em série; d) resistências em paralelo [1].	81
3.13 – Esquema de ruído do amplificador operacional [1].	83
3.14 – Esquema do ruído do amplificador inversor ou não inversor [1].	84
3.15 – Esquema equivalente do ruído de uma montagem com amplificador de instrumentação [1].	86
4.1 – Ligação às massas: a) fonte e instrumentação ligadas às suas próprias massas, a entrada da instrumentação sendo do tipo assimétrica; b) fonte isolada da massa local e ligada à massa da instrumentação; c) instrumentação isolada e ligada à massa local da fonte.	91
4.2 – Fonte isolada da sua massa local e instrumentação à entrada assimétrica: a) esquema eléctrico real; b) esquema eléctrico equivalente.	92
4.3 – Fonte isolada da sua massa local e instrumentação à entrada simétrica: montagem geral com blindagem na massa de instrumentação.	93
4.4 – Ponte de Wheatstone: montagem com 4 extensómetros activos.	94
4.5 – Fonte ligada à sua massa local à qual está ligada uma instrumentação flutuante: a) esquema eléctrico; b) esquema equivalente.	95
4.6 – Circuito de protecção: a) esquema eléctrico; b) Ligação das blindagens.	96
4.7 – Amplificador de instrumentação: a) montagem de base; b) blindagem ligada à massa M_s da fonte de sinal; c) utilização da protecção do amplificador no caso de uma tensão de modo comum de instrumentação.	97
4.8 – Amplificador diferencial com modo comum elevado: a) esquema; b) equilíbrio das vias [1].	98
4.9 – Amplificador de isolamento: Ligação das blindagens.	99

4.10 – Respostas normalizadas dos principais tipos de filtros passa-baixo em função da frequência (sinal sinusoidal) e em função do tempo (sinal escalar de amplitude E). a) Butterworth; b) Chebychev (ondulação 0,5 db); c) Bessel.	102
4.11 – Estruturas de filtros activos passa-baixo: a) de contra-reacção simples; b) de contra-reacção múltipla; c) de amplificador de ganho controlado (Sallen Key); d) de estado variável; e) de comando numérico.	104
4.12 – Filtro de condensadores comutados: a) princípio de simulação de uma resistência por condensador comutado; b) integrador clássico e seu equivalente de condensador comutado.	106
5.1 – Microcontrolador MSP430F449 STK2, da <i>Texas Instruments</i> .	113
5.2 – Célula de carga VISHAY, modelo 616.	114
5.3 – <i>Encoder</i> incremental de 5000 impulsos.	115
5.4 – Placa de circuito impresso, vista de cima.	117
5.5 – Ligação dos filtros de EMC ao VEV – condição geral.	119
5.6 – a) Esquema de um transformador; b) Evolução da tensão no tempo.	120
5.7 – a) Esquema de um transformador com ponte rectificadora; b) Evolução da tensão no tempo.	121
5.8 – a) Condensador Electrolítico; b) Evolução da tensão no tempo	121
5.9 – a) Esquema de um transformador com ponte rectificadora e filtro; b) Evolução da tensão no tempo.	122
5.10 – a) Esquema de uma fonte de alimentação completa; b) Evolução da tensão no tempo.	123
5.11 – Técnica para estabilização da fonte.	123
5.12 – Esquema de uma fonte de alimentação regulada e estabilizada.	124
5.13 – Representação da fonte de alimentação seleccionada.	125
5.14 – Condensadores que ligam os pinos do OP07 a <i>ground</i> , minimizando o ruído.	125
5.15 – Representação interna do TLP521 da Toshiba.	126
5.16 – Representação da aplicação de um condensador entre a alimentação e <i>ground</i> .	127
5.17 – <i>Buffer</i> de ligação do encoder com o MSP430.	129
5.18 – Ligação da célula de carga com o MSP, através do INA 114.	130
5.19 – Ligação da célula de carga com o MSP, através do AD7705.	131
5.20 – Ligação dos sensores de posição com o MSP, através do TLP521.	131
5.21 – Ligação dos sensores de presença com o MSP, através do TLP521.	132
5.22 – Ligação do MSP com outros componentes, através do TLP521.	133
5.23 – <i>Header</i> para definição do estado dos portos P6.2 e P6.3 do MSP.	134
5.24 – Componentes e ligações da placa de circuito impresso número 1, vista de cima.	135
5.25 – Componentes e ligações da placa de circuito impresso número 2, vista de	136

cima.	
5.26 – EVAL232, da FTDI Chip.	137
5.27 – Ligação do MSP com o EVAL232, e deste com um cabo USB.	138
6.1 – Fluxograma do programa de interface utilizador-máquina.	144
6.2 – Janela inicial do programa, para selecção e envio dos dados do ensaio.	145
6.3 – Selecção do curso de ensaio.	147
6.4 – Mensagem de erro caso o utilizador pretenda iniciar o ensaio sem preencher todos os campos.	148
6.5 – Janela de gráficos (antes de preenchida).	151
6.6 – Mensagem de erro caso as portas de segurança estejam (ou sejam) abertas.	153
6.7 – Janela de gráficos durante um ensaio, após ensaiadas quatro velocidades.	158
6.8 – Barra de menus.	159
6.9 – Mensagem para abrir o manual do utilizador.	159
6.10 – Janela para calibração da célula de carga.	160
6.11 – Janela com informações sobre o <i>software</i> e o fabricante.	162
6.12 – Fluxograma do programa de controlo de dados.	168
6.13 – Fluxograma da rotina <i>ensaio</i> .	169
7.1 – Imagem da marcação CE.	184
7.2 – Máquina com protecções inferiores e superiores, (a) vista de trás, (b) vista de frente.	190
7.3 – Ligações das protecções superiores na máquina.	191
7.4 – Local de aplicação do botão de paragem de emergência.	192
7.5 – Esquema eléctrico, prevendo todos os dispositivos de protecção.	193
7.6 – Sensor magnético, para detectar quando as portas de protecção estão abertas ou fechadas.	193
7.7 – Mensagem de erro, para o caso da porta de protecção superior ter sido aberta.	194
7.8 – Fluxograma com a descrição do processo de certificação, realizado pela CERTIF.	200
8.1 – Dados do primeiro ensaio com uma suspensão.	204
8.2 – Resultados do primeiro ensaio com uma suspensão (curso 70 [mm], sem mola).	205
8.3 – Resultados do segundo ensaio com uma suspensão (curso 70 [mm], com mola).	206
8.4 – Dados do terceiro e quarto ensaios com uma suspensão.	206
8.5 – Resultados do terceiro ensaio com uma suspensão (curso 70 [mm], com <i>encoder</i>).	207

8.6 – Resultados do quarto ensaio com uma suspensão (curso 70 [mm], sem <i>encoder</i>).	208
8.7 – Dados do quinto e sexto ensaios com uma suspensão.	209
8.8 – Resultados do quinto ensaio com uma suspensão (curso 170 [mm], sem <i>encoder</i>).	209
8.9 – Resultados do sexto ensaio com uma suspensão (curso 170 [mm], com <i>encoder</i>).	210
8.10 – Dados do sétimo e oitavo ensaios com uma suspensão.	211
8.11 – Resultados do sétimo ensaio com uma suspensão (curso 170 [mm], sem mola).	211
8.12 – Resultados do oitavo ensaio com uma suspensão (curso 170 [mm], com mola).	212
8.13 – Dados do primeiro e segundo ensaios com um amortecedor.	213
8.14 – Resultados do primeiro ensaio com um amortecedor (curso 50 [mm], com <i>encoder</i>).	214
8.15 – Resultados do segundo ensaio com um amortecedor (curso 50 [mm], sem <i>encoder</i>).	214
8.16 – Dados do terceiro ensaio com um amortecedor.	215
8.17 – Resultados do terceiro ensaio com um amortecedor (curso 50 [mm], sem <i>encoder</i>).	216
8.18 – Dados do quarto ensaio com um amortecedor.	216
8.19 – Resultados do quarto ensaio com um amortecedor (curso 70 [mm], sem <i>encoder</i>).	217
8.20 – Resultados do quinto ensaio com um amortecedor (curso 70 [mm], sem <i>encoder</i>).	218
I – Chapa de características da máquina de ensaio de amortecedores.	225
II – Esquema do circuito de potência e do circuito de comando da máquina de ensaio de amortecedores.	228
III – Representação do disco excêntrico, visto de frente.	232
IV – Representação dos apoios para ensaiar um amortecedor: (a) superior, (b) inferior.	234
V – Representação dos apoios para ensaiar uma suspensão: (a) superior, (b) inferior.	234
VI – Apoio inferior, montado na posição adequada.	235
VII – Apoio superior, montado na posição adequada.	235
VIII – Posição da barra superior: (a) 1, para ensaio de suspensão, (b) 2, para ensaio de amortecedor.	236
IX – Posição do excêntrico e da biela, para colocação do equipamento.	237
X – Colocação de uma suspensão: (a) aperto no apoio inferior, (b) aperto no apoio superior.	237
XI – Indicação do posto de trabalho do operador, durante os ensaios.	238

XII – Janela inicial do programa, para selecção e envio dos dados do ensaio.	239
XIII – Exemplo da janela inicial do programa preenchida.	240
XIV – Exemplo da janela com os gráficos finais de um ensaio preenchida.	242
XV – Botão para paragem de emergência da máquina de ensaio de amortecedores.	245
XVI – Representação de um amortecedor.	247
XVII – Representação de uma suspensão dianteira de uma moto.	247
XVIII – Janela de calibração do programa, para calibrar a célula de carga.	250
XIX – Projecção do disco excêntrico.	254
XX – Projecção da biela inferior.	255
XXI – Projecção da biela superior (veio).	256
XXII – Projecção da peça de ligação do excêntrico com a biela inferior.	257
XXIII – Projecção da peça de ligação das bielas inferior e superior.	258
XXIV – Projecção da peça de ligação da biela superior (veio) com o apoio inferior.	259
XXV – Projecção do apoio inferior da suspensão.	260
XXVI – Projecção do apoio inferior do amortecedor.	261
XXVII – Projecção do apoio superior da suspensão.	262
XXVIII – Projecção do apoio superior do amortecedor.	263
XXIX – Projecção do cilindro.	264
XXX – Projecção da barra superior.	265
XXXI – Desenho de pormenor do sistema biela-manivela.	268
XXXII – Desenho de pormenor da estrutura da máquina.	269
XXXIII – Desenho de pormenor da máquina, com todos os componentes montados na estrutura.	270
XXXIV – Desenho de pormenor da máquina completa, com as protecções.	271

Lista de Símbolos

Geral

a	Distância	[mm]
A	Área	[mm ²]
b	Distância	[mm]
b	Ponto inicial de uma recta	
B	Densidade superficial do fluxo magnético	[T]
B_e	Indução magnética induzida no estator	
B_r	Indução magnética induzida no rotor	
C	Capacitância	[F]
d	Distância	[mm]
d	Diâmetro	[mm]
E	Módulo de Elasticidade	[GPa]
E	Intensidade do campo eléctrico	[V/m]
f	Frequência	[Hz]
F	Força	[N]
F_x	Força realizada no eixo x	[N]
F_y	Força realizada no eixo y	[N]
$F_{y,max}$	Força máxima, realizada no eixo y	[N]
G	Ganho do filtro	
h	Altura	[mm]
H	Intensidade do campo magnético	[A/m]
i	Relação de transmissão do redutor mecânico	
i_z	Raio de giração	[mm]
I	Momento de inércia	[N.mm ⁴]
I	Intensidade de corrente	[A]
k	Constante do amortecedor	[N.s/mm]
l	Comprimento	[mm]
L	Coefficiente de auto-indução	[H]
L_e	Comprimento efectivo	[mm]
L_{10}	Vida nominal de um rolamento	[x10 ⁶ rot]
m	Declive de uma recta	

M	Momento	[N.m]
M	Binário	[N.m]
M	Massa da instrumentação	
M_1	Momento da biela superior, provocado na base do cilindro	[N.m]
N	Velocidade de rotação	[rpm]
p	Número de pares de pólos de um motor eléctrico	
P	Potência	[W]
P_{cr}	Força crítica	[N]
Q	Carga do condensador	[F.V]
r	Raio	[mm]
R	Resistência	[Ω]
R	Força num apoio	[N]
R_1	Distância entre o centro de excêntrico e o centro da cabeça da biela inferior	[mm]
R_2	Distância entre o centro de excêntrico e o centro do pé da biela inferior	[mm]
R_3	Distância entre os eixos da biela inferior	[mm]
s	Escorregamento	
t	Espessura	[mm]
T	Tempo	[s]
v	Velocidade linear do amortecedor	[mm/s]
V	Tensão	[V]
x	Eixo x	
y	Eixo y	
Z	Impedância	[Ω]

Índices Inferiores

ap	Apoio
arr	Arranque
AI	Apoio Inferior da suspensão
AS	Apoio Superior da suspensão
BB	Biela Inferior
BC	Biela Superior
BS	Barra Superior
BV	Barra Vertical
cil	Cilindro
$CCarga$	Célula de carga
esm	Esmagamento
Exc	Excêntrico
ext	Externo
in	Entrada
int	Interno

<i>max</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>mot</i>	Motor
<i>nom</i>	Nominal
<i>out</i>	Saída
<i>Susp</i>	Suspensão
<i>red</i>	Redutor

Simbologia Grega

α	Ângulo	[°]
ε	Força Electromotriz Induzida	
φ	Fluxo magnético	
λ	Comprimento de onda	
η	Rendimento	
θ	Ângulo	[°]
θ_2	Ângulo da biela inferior, em relação ao excêntrico	[°]
θ_3	Ângulo da biela inferior, em relação à biela superior	[°]
σ	Tensão normal	[MPa]
τ	Tensão de corte	[MPa]
ω	Velocidade angular	[rad/s]

Siglas e Abreviaturas

AC	Corrente Alternada
ADC	Conversor Analógico Digital
BDC	Ponto Morto Inferior
CC	Corrente Contínua
DC	Corrente Contínua
EMC	Compatibilidade Electromagnética
GVC	Gráfico de Velocidade Contínua
LED	Díodo Emissor de Luz
MSP	Microcontrolador MSP430F449 da <i>Texas Instruments</i>
OOP	Programação Orientada a Objectos
PC	Computador Pessoal
PCB	Placa de Circuito Impresso
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
RMS	Raiz Quadrada
TDC	Ponto Morto Superior
VEV	Variador Electrónico de Velocidade

Capítulo

1

Introdução

O amortecedor é um dos principais elementos para o controlo da estabilidade de um veículo. Como tal, torna-se imperativo conhecer o seu funcionamento, de modo a poder melhorar o seu comportamento. Surge assim a necessidade de conceber uma máquina que permita traçar as curvas características do funcionamento destes equipamentos.

1.1. Enquadramento

Inicialmente, quanto a indústria automobilística dava os primeiros passos, os eixos eram fixados directamente à estrutura do veículo, fazendo com que o carro não fosse muito confortável pelas condições das estradas, que na época não eram as melhores. A introdução de molas separando o eixo da carroçaria permitiu que o movimento das rodas fosse independente, melhorando o conforto ao conduzir.

Com o desenvolvimento de carros mais rápidos e potentes, as molas começaram a causar problemas, pois ao passar por um buraco, a mola era comprimida e a energia acumulada produzia vários movimentos de extensão e compressão fazendo o veículo oscilar, comprometendo a estabilidade e tornando a condução bastante difícil e perigosa. Para resolver este problema foi criado o amortecedor.

O amortecedor de fricção foi o primeiro tipo produzido que controlava o movimento da mola com a acção mecânica de um cinto. Com o passar do tempo foram criados amortecedores baseados em princípios hidráulicos, que controlavam as molas somente no movimento de extensão. Neste processo evolutivo foi criado o amortecedor tubular de acção directa, apresentado na figura 1.1 [1], que passou a ser o mais utilizado, mantendo esse estatuto até hoje.

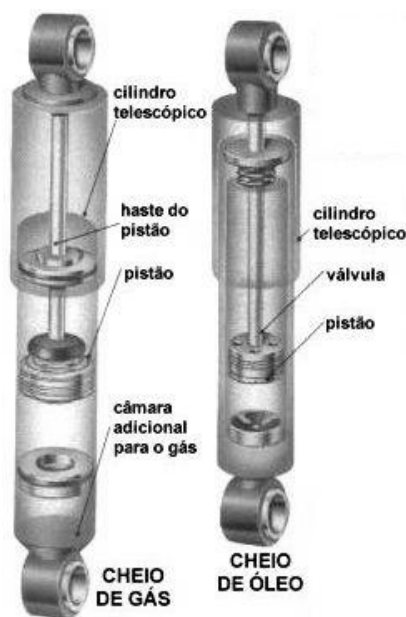


Figura 1.1 – Amortecedor de acção directa.

Os amortecedores têm como função controlar as oscilações da suspensão, mantendo as rodas do veículo em contacto permanente com o solo, estabilizando a carroçaria do veículo, proporcionando conforto, segurança, estabilidade e prevenindo o desgaste excessivo dos componentes da suspensão e pneus.

Actualmente, nos veículos de quatro rodas, os amortecedores são elementos fundamentais das suspensões, proporcionando conforto e segurança tanto nas suspensões tradicionais, como nas suspensões estruturais.

Por sua vez, em veículos de duas rodas, usa-se geralmente um amortecedor para ligar o quadro do veículo ao braço oscilante, onde está fixa a roda traseira, e um sistema de suspensões à frente, ligando directamente a roda da frente ao chassis do veículo, como se pode verificar na figura 1.2 [2].



Figura 1.2 – Sistema de amortecedores de moto: (a) amortecedor traseiro; (b) suspensão dianteira.

A suspensão dianteira de uma moto é constituída por um par de amortecedores, bastante diferentes dos amortecedores normalmente usados nos carros, devido em parte às suas dimensões serem maiores, e ao facto de serem ligados directamente à roda dianteira, sendo aplicado outro tipo de montagem, elementos constituintes e apresentação, mas mantendo o mesmo princípio de funcionamento.

1.1.1. Princípio de funcionamento do amortecedor

O amortecedor funciona por princípios hidráulicos. Tanto o tubo de pressão como o tubo reservatório contêm óleo, restando apenas uma pequena parte sem óleo, que é preenchida com ar ou com gás nitrogénio, no caso do amortecedor ser pressurizado. O que gera o amortecimento é a dificuldade de passagem do óleo através dos furos do pistão, onde se encontram válvulas responsáveis por controlar o movimento, e pela própria válvula da base que controla a passagem de óleo do tubo de pressão para o tubo reservatório.

O efeito de amortecimento está directamente associado ao diâmetro e espessura das anilhas por onde passa o óleo, as quais têm a função de oferecer resistência à passagem do óleo. Estas anilhas actuam como uma série de molas muito pequenas, que flectem para aumentar a área de passagem do óleo. Quanto maior for esta área, maior será o escoamento de óleo, e menor será o efeito de amortecimento. As primeiras anilhas por onde o óleo passa são aquelas que controlam o amortecimento a baixa velocidade; estas têm diâmetros maiores, mas espessuras mais reduzidas. O óleo flecte estas anilhas facilmente devido à sua área superficial ser maior, com uma espessura relativamente reduzida que oferece uma baixa tensão de amortecimento. A pilha de anilhas (ou válvula) tem uma forma cónica, em que as anilhas de maior diâmetro para as baixas velocidades são posicionadas mais perto do pistão, enquanto que as anilhas de menor diâmetro (mas maior espessura) para controlar as altas velocidades são colocadas o mais distante possível deste [3].

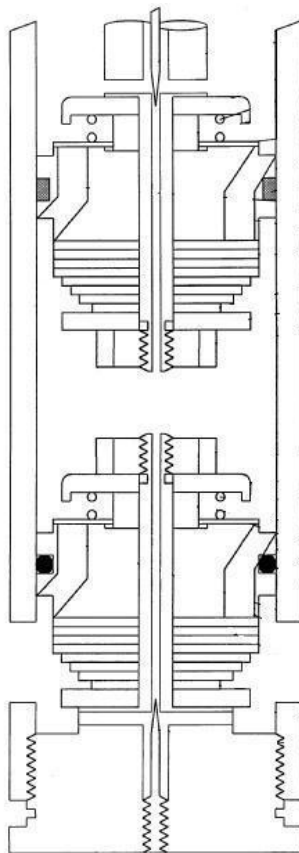


Figura 1.3 – Detalhes do interior de um amortecedor [4].

O funcionamento dos movimentos de extensão e compressão é o seguinte:

Movimentos de extensão: quando o amortecedor sofre movimentos de extensão, o óleo da câmara de tracção é forçado para baixo através dos furos existentes no pistão, após a abertura das válvulas de controlo de tracção, e passa para a câmara de compressão. Ao mesmo tempo, a haste ao ser retirada para fora do tubo, cria um espaço que deve ser preenchido pelo óleo existente na câmara reservatória. Este óleo é admitido através da válvula de admissão para dentro do tubo de pressão. A medida de resistência que o amortecedor deve fornecer ao

sistema, no movimento de extensão, é determinada pela regulação da válvula de tracção, da seguinte forma:

1º- Os movimentos lentos são controlados pela passagem de óleo por furos feitos na sede da válvula, no pistão.

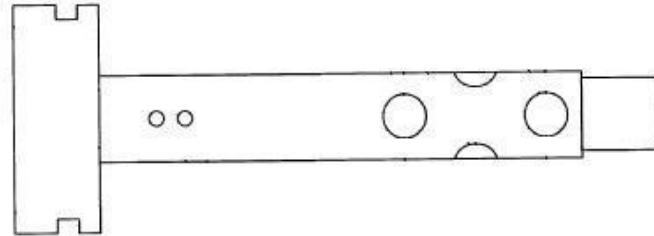


Figura 1.4 – Furos na sede da válvula, no pistão do amortecedor [4].

2º- A resistência aos movimentos mais rápidos ou de velocidades médias é regulada pela pressão e grau de deflexão das anilhas da válvula de tracção (ou extensão).

3º- O controlo para os movimentos amplos é obtido pela restrição da passagem de óleo no pistão.

Na figura 1.5 pode-se verificar a deflexão das anilhas (ou válvula) quando um amortecedor sofre um movimento de extensão.

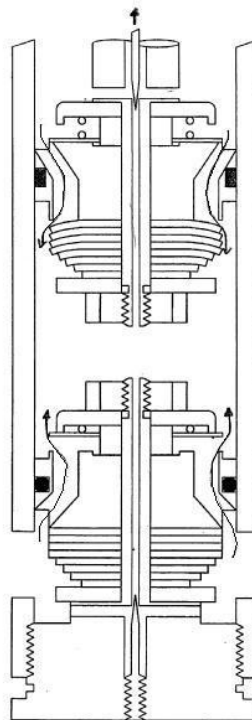


Figura 1.5 – Movimento de extensão de um amortecedor: deflexão das anilhas [4].

Movimentos de compressão: quando o amortecedor é comprimido, o óleo da câmara de compressão deve ser forçado para a câmara de tracção por outra série de passagens após abrir a válvula do pistão.

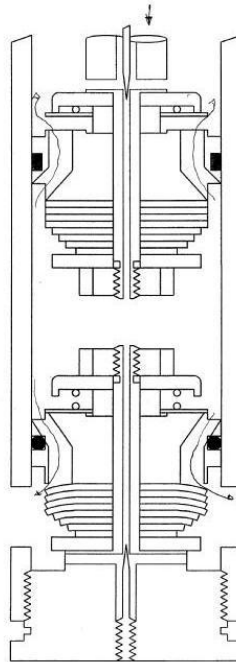


Figura 1.6 – Movimento de compressão de um amortecedor: deflexão das anilhas [4].

Neste movimento a haste é introduzida no tubo de pressão, ocupando um espaço na câmara de tracção. Portanto, um volume de óleo correspondente ao volume ocupado pela haste deve ser expelido de volta para o reservatório pela válvula de compressão. O controlo das válvulas funciona como na extensão. A extensão serve para limitar o curso do amortecedor.

A força produzida pelos amortecedores é proporcional à velocidade do movimento do veio, pelo que se um amortecedor for comprimido lentamente, produz uma força resistiva inferior à produzida por este no caso de ser comprimido de uma forma mais rápida.

1.1.2. Importância de testar o amortecedor

Os amortecedores são elementos críticos em veículos motorizados, principalmente na competição, pois destes depende a estabilidade do veículo, a sensibilidade do condutor/piloto em curvas, controlo da direcção em zonas irregulares, entre outras situações em que o controlo é apoiado fortemente nos amortecedores.

Desde que os amortecedores foram entendidos como elementos críticos de um veículo de competição, passou-se a sentir a necessidade de criar meios para os testar periodicamente de modo a avaliar o seu comportamento, e ajustá-los em função das condições em que serão utilizados. Assim, na década de 90 foram criadas as primeiras máquinas para testar amortecedores pelos engenheiros das grandes equipas mundiais de competição automóvel,

nomeadamente pelas equipas de topo da Fórmula 1. A estas máquinas foi dado o nome de *Shock Dynamometer*, ou *Shock Dyno*, e foram criadas precisamente com o intuito de testar amortecedores e aprender acerca do seu comportamento.

Estas máquinas foram criadas também com o intuito de obter dados concretos e precisos do funcionamento dos amortecedores, de modo a que estes pudessem ser testados e ajustados com base nesses dados, evitando que isto fosse feito puramente com base na intuição e experiência dos preparadores e pilotos, como até então era feito.

Na competição, é importante testar amortecedores e suspensões, de modo a otimizar o seu funcionamento, e consequentemente a estabilidade e controlo do veículo, podendo ser este um factor decisivo para melhorar a pilotagem, aumentar o bom estado dos pneus, cansar menos o piloto, o que, tudo somado, pode valer a vitória em muitas modalidades.

Já no veículo de uso diário, o teste dos amortecedores e suspensões é importante para assegurar e manter o seu bom estado de funcionamento, e consequentemente o controlo e estabilidade do veículo, podendo em muitos casos evitar acidentes de viação devido a falhas no controlo do veículo, provocadas pelo mau estado da direcção, devido à degradação ou desafinação dos amortecedores.

1.2. Constituição e Funcionamento da Máquina

Uma máquina “Shock Dyno” é uma máquina que comprime e tracciona um amortecedor a velocidades conhecidas e mede as forças produzidas pelo amortecedor [5].

1.2.1. Introdução à máquina de ensaio de amortecedores

Para ensaiar um amortecedor existem algumas máquinas desenvolvidas, as quais apresentam uma estrutura semelhante entre si. Estruturas típicas são apresentadas na figura 1.7.

Os principais elementos de uma máquina para ensaio de amortecedores são (1) um motor (pode ser eléctrico, pneumático ou hidráulico), que por norma é eléctrico, devido ao preço mais reduzido, e maior facilidade de realizar o controlo; (2) um disco excêntrico, que funciona como manivela, e que deve permitir fixar a biela em pontos diferentes, a distâncias do centro variáveis, de modo a ensaiar vários cursos do amortecedor (normalmente entre 20 e 100 mm); (3) um sistema de bielas, uma ligada ao excêntrico que gira com este, e outra que se desloca somente na vertical (normalmente é um veio); (4) um cilindro onde esta biela (ou veio) se desloca, para controlar e orientar o seu movimento; (5) apoios para agarrar os amortecedores; (6) um aparelho para medir a força exercida no amortecedor (normalmente uma célula de carga), (7) um aparelho para medir a posição ou deslocamento de uma das bielas, (8) uma estrutura que suporte o motor, e que possua duas barras verticais, que são ligadas por uma outra barra, suficientemente resistente para aguentar as forças exercidas no amortecedor, pois é nesta que está fixa a parte superior deste, e (9) um computador para

controlo dos ensaios realizados, recolha e processamento dos dados e apresentação dos gráficos finais.

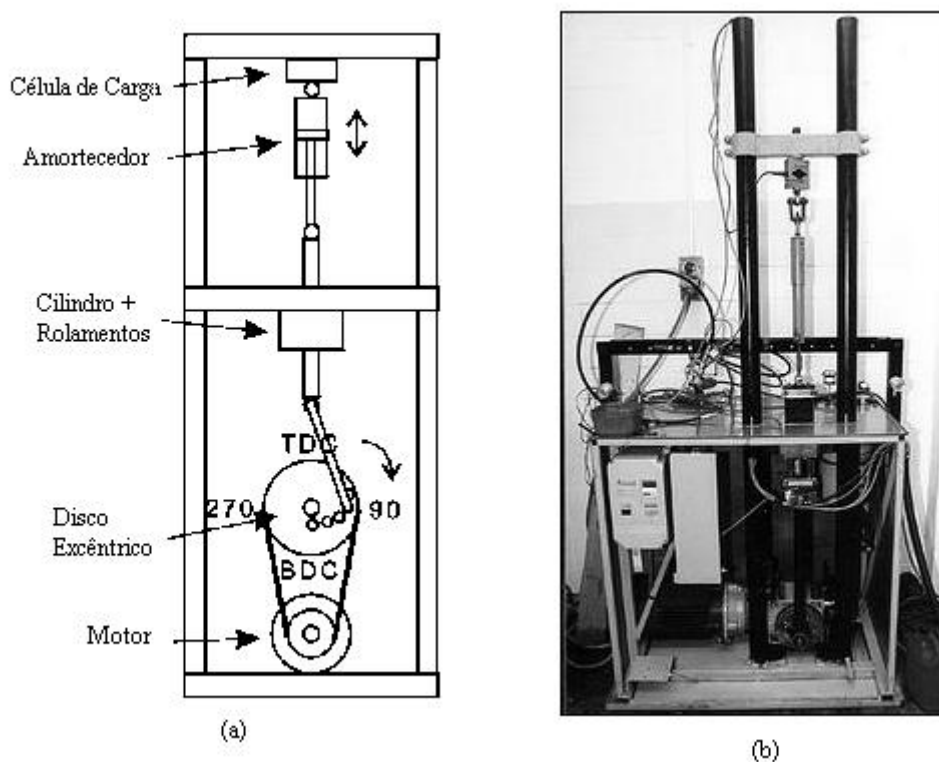


Figura 1.7 – Exemplos de máquinas para ensaio de amortecedores (a) esquema com elementos principais [5]; (b) imagem de máquina completa.

Em relação aos ensaios realizados na máquina, estes devem seguir os seguintes passos: (1) colocação do amortecedor nos respectivos apoios, (2) selecção do curso que se pretende testar, e (3) escolha das velocidades que se pretendem testar. Após isto, dá-se início a um (ou mais) ensaios, no decorrer dos quais o computador regista os dados necessários para no final apresentar os resultados.

A máquina que se pretende aperfeiçoar, permite o ensaio não somente de amortecedores, mas também de suspensões de motas, que pelas suas dimensões alteram inevitavelmente as suas dimensões face a máquinas que existem no mercado, não só da estrutura, mas também de todos os elementos mecânicos, os cursos a ensaiar, o tipo de apoios, entre outros.

1.2.2. Princípio de funcionamento da máquina de ensaio de amortecedores

A figura 1.8 mostra uma estrutura que suporta um motor eléctrico ligado a um excêntrico por meio de uma correia, fazendo este girar, e ao qual está ligada uma biela, que por sua vez está ligada a um veio, que se move no interior de um cilindro, e ao qual está ligada uma das extremidades do amortecedor.

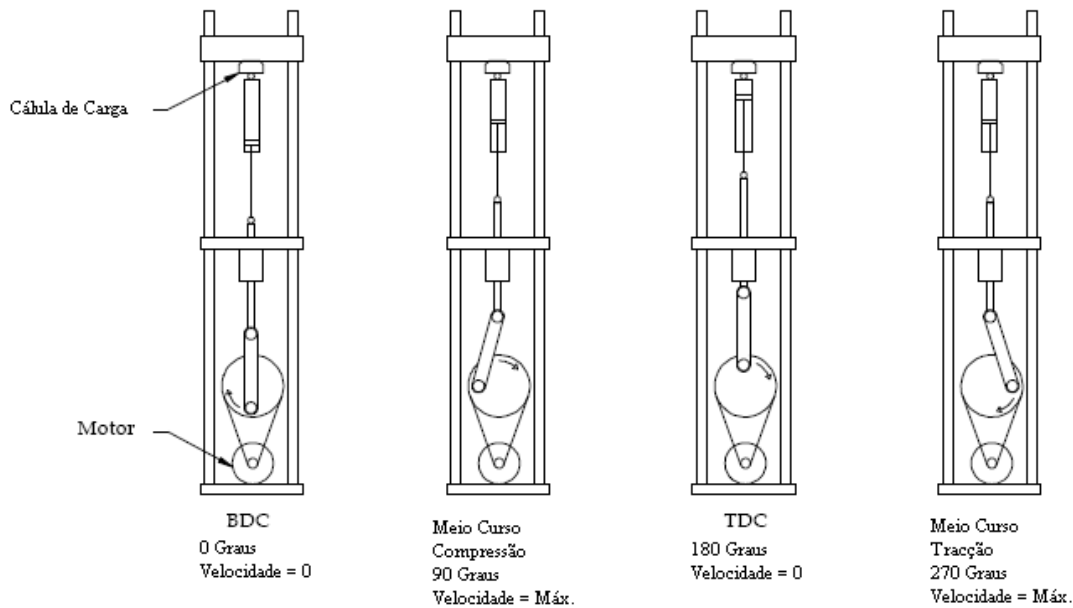


Figura 1.8 – Representação do funcionamento da máquina [5].

A outra extremidade do amortecedor está ligada a uma célula de carga, que está ligada a uma barra fixa na estrutura. À medida que o motor faz girar o excêntrico, o pistão do amortecedor move-se para cima e para baixo, tal como o pistão de um motor térmico no interior do cilindro. O excêntrico tem vários furos, a várias distâncias do centro de modo a poder-se variar o curso a testar no amortecedor, e o motor pode girar a várias velocidades de modo a ter várias velocidades de rotação no excêntrico, variando a velocidade linear no pistão do amortecedor. As forças são medidas pela célula de carga.

A velocidade de um pistão ligado a uma manivela varia continuamente à medida que esta manivela roda. Este tipo de movimento é chamado sinusoidal pois varia com o seno do ângulo da manivela. O pistão “para” (velocidade igual a zero) no ponto morto inferior (PMI, ou BDC), acelera até uma velocidade máxima a meio caminho do topo do cilindro (90°), e a partir desse ponto desacelera até parar novamente no topo, onde atinge o ponto morto superior (PMS, ou TDC). Quando se tem um amortecedor ligado a um sistema biela-manivela, o seu pistão comporta-se exactamente do mesmo modo, e a força gerada também varia continuamente. Contudo, sabe-se que a velocidade máxima do pistão ocorre somente uma vez por ciclo, no ponto em que o pistão está a meio caminho entre o topo e o fundo, e é simultaneamente o ponto onde o amortecedor gera a máxima força.

Para realizar um ensaio, coloca-se um amortecedor na máquina, escolhe-se um curso e uma velocidade, e liga-se o motor. O excêntrico é accionado e o veio (ou pistão) do amortecedor move-se para cima e para baixo até o motor ser desligado. Sabendo a velocidade de rotação do motor (e consequentemente do excêntrico) e o curso, consegue-se calcular a máxima velocidade (linear) do veio do amortecedor.

Por exemplo, considere-se que o motor roda a 1000 rpm, e que este está acoplado a um redutor mecânico com uma relação de transmissão igual a 10, que passa assim a ter uma

velocidade no veio de saída igual a 100 rpm, e considere-se ainda que o curso a testar é igual a 25 mm. Uma velocidade de 100 rpm corresponde a 1,67 rotações por segundo, e a distância percorrida numa rotação é igual a π vezes o curso (o curso é igual ao dobro da distância a que a biela está do centro do excêntrico, ou seja, duas vezes o raio, o que equivale ao diâmetro). Assim, $1,67 \times \pi \times 25$ [mm] corresponde a cerca de 132 [mm/s]. Esta é a velocidade máxima do pistão do amortecedor, e ocorre duas vezes em cada rotação do excêntrico: uma quando a biela se desloca para cima, e comprime o amortecedor, e outra vez quando a biela se desloca para baixo, puxando (ou traccionado) o amortecedor.

Mantendo este exemplo simples, suponha-se agora que se liga o amortecedor directamente a um medidor de força analógico, circular, com um ponteiro a indicar a força numa escala de zero até um dado valor. Aquilo que se iria observar era o ponteiro a variar de zero até um dado valor máximo de força (de compressão), quando o amortecedor fosse comprimido, um regresso do ponteiro a zero quando o pistão estivesse no ponto de compressão máximo, e uma nova subida do ponteiro até um valor de força máxima (de tracção) quando o pistão do amortecedor descesse em direcção à posição inicial, voltando o ponteiro ao zero quando o pistão do amortecedor alcançasse a posição inicial. Para o ensaio ser feito com leituras precisas e controladas correctamente a cada instante é usada uma célula de carga para ler as forças, as quais vão apresentar valores positivos na compressão, passam pelo zero, e apresentam valores negativos na tracção. Desta forma consegue-se mais facilmente traçar os gráficos pretendidos.

A maioria dos amortecedores são afinados para fazer mais força à tracção do que à compressão, pelo que, à medida que a máquina estiver a ensaiar um amortecedor, verificam-se valores de força maiores na tracção do que na compressão, o que irá influir no comportamento do motor eléctrico.

Analisando os dados de um ensaio realizado a um amortecedor [5] pode verificar-se que à medida que se aumenta a velocidade de rotação do excêntrico, e consequentemente a velocidade linear do pistão do amortecedor, as forças medidas à tracção e à compressão evoluem de maneira diferente: inicialmente, a uma velocidade de rotação mais reduzida (25 rpm), a força medida à compressão é ligeiramente superior à força medida à tracção. Quando se aumenta a velocidade de rotação para o dobro (50 rpm), ambas as forças aumentam, mas verifica-se que a força à tracção tem um maior aumento em relação à força medida à compressão. Duplicando novamente a velocidade de rotação (100 rpm), a força medida à compressão aumenta muito menos que a força à tracção, passando o valor desta última a ser maior que o da anterior. A partir daqui, à medida que se aumenta a velocidade de rotação, os valores obtidos para as forças são sempre maiores na tracção, com aumentos de cerca de 2500 [N] por cada 50 rpm, enquanto que na compressão os aumentos ficam-se pelos 700 [N] por cada aumento semelhante da velocidade.

Com os valores registados no referido ensaio consegue-se traçar o gráfico apresentado na figura 1.9.

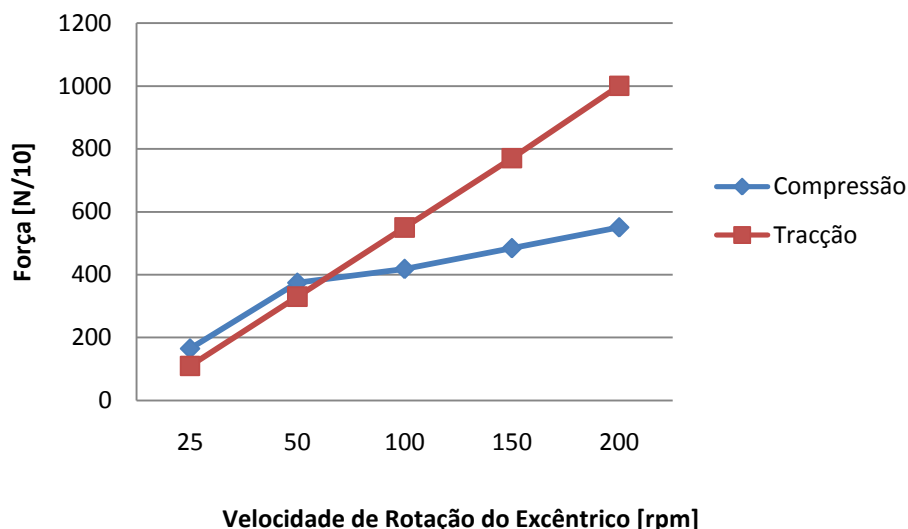


Figura 1.9 – Gráfico *Força-Velocidade* de um ensaio realizado a um amortecedor [5].

Este gráfico mostra que, para o amortecedor testado, a curva das forças medidas à tracção é bastante íngreme, ou seja, apresenta um grande aumento da força em cada aumento de velocidade, enquanto que a curva das forças medidas à compressão começa com uma grande subida, mas depois sofre pequenas subidas a cada aumento de velocidade.

A grande vantagem de uma máquina para ensaio de amortecedores verifica-se quando se mudam as afinações do amortecedor, o tipo de óleo, ou válvulas internas, e se repete exactamente o mesmo ensaio, com o mesmo curso e as mesmas velocidades, e se analisam as diferenças nos gráficos, verificando-se as alterações do comportamento do amortecedor. Para ter uma grande precisão nas medidas realizadas e nos gráficos obtidos, é fundamental que a máquina esteja equipada com aparelhos de aquisição de dados com uma elevada resolução e fiáveis, e que se tenha um bom *software*, fácil de usar e analisar os dados obtidos.

Analisando os dados de um ciclo completo de compressão e tracção de um amortecedor, e traçando o respectivo gráfico, consegue-se obter muita informação acerca do comportamento do amortecedor. A este tipo de gráfico é dado o nome de *Gráfico de Velocidade Contínua* (GVC, ou CVP, em inglês), e são estes gráficos que o *software* destas máquinas deve gerar, no final de cada ensaio.

1.2.3. Apresentação da máquina de ensaio de amortecedores desenvolvida

Na referência [6] está apresentado o projecto de uma máquina de ensaio de amortecedores, em que o principal objectivo era projectar e desenvolver uma máquina para ensaio de amortecedores e suspensões (*Shock Dynamometer*), que tivesse a capacidade de realizar testes a cursos e velocidades diferentes, escolhidos pelo utilizador. Esta máquina mede a força exercida no amortecedor, a posição do veio e sua velocidade a cada instante, de modo a que, no final de cada ensaio, o utilizador consiga obter gráficos que relacionem a força com a

velocidade do veio do amortecedor, dependente da velocidade de rotação do excêntrico, e a força com a posição do mesmo veio.

Para tal, com base no princípio de funcionamento das máquinas actuais que testam amortecedores, pretendeu-se projectar e desenvolver uma máquina com melhores características e funcionalidades.

Um dos principais objectivos do trabalho foi desenvolver um sistema de fácil alteração do curso de ensaio, no caso de se quererem testar vários cursos para um mesmo amortecedor, ou uma mesma suspensão, sem serem necessárias muitas e complexas alterações na máquina. Este sistema deveria permitir testar cursos maiores do que as máquinas actuais, de modo a poderem testar-se suspensões de mota, que têm cursos maiores que os amortecedores.

Depois, pretendeu-se que a máquina fosse de fácil utilização, ou seja, para alternar entre um ensaio de um amortecedor e o de uma suspensão, ou mesmo para alternar entre diferentes amortecedores ou diferentes suspensões, não fosse necessário realizar muitas alterações na máquina, e aquelas que tiverem de ser feitas, fossem o mais simples possíveis, do ponto de vista do utilizador. Dentro do mesmo objectivo, pretendeu-se que a máquina fosse o mais universal possível, ou seja, o equipamento desta permitisse testar todo o tipo de amortecedores e todo o tipo de suspensões existentes.

O *software* pretendia-se que fosse de fácil utilização, em que o utilizador introduzisse os dados do ensaio que pretendia realizar, e facilmente realizasse esse ensaio, obtendo no fim os gráficos desejados.

No final do trabalho conclui-se que o principal objectivo, de projectar a máquina para ensaio de amortecedores e suspensões, foi alcançado com sucesso, pois conseguiu-se projectar, construir e ainda realizar ensaios com a máquina.

Quanto às especificidades inicialmente desejadas para a máquina, de permitir testar vários cursos, a várias velocidades, trocando facilmente estes parâmetros de ensaio, tanto mecânica como electronicamente, também se conseguiu alcançar este objectivo com todo o sucesso, tendo sido testados tanto amortecedores como suspensões, a diferentes cursos e várias velocidades. Para permitir a realização destes objectivos foram desenvolvidas duas das maiores potencialidades deste projecto: um excêntrico com uma linha zero, que permite facilmente trocar o curso de ensaio, e determinar electronicamente a posição zero do excêntrico, e a variação da velocidade do motor, feita a partir de um VEV, controlado por um MSP430, sendo este controlo bastante exigente, tendo requerido um estudo aplicado.

Em relação à universalidade da máquina, ou seja, permitir testar qualquer tipo de amortecedores, bem como qualquer tipo de suspensões, também foi conseguida com sucesso, com o desenvolvimento de apoios que servem tanto para amortecedores como para suspensões, e que permitem variar as condições da sua utilização.

Relativamente ao *software* desenvolvido, este permitiu controlar a máquina, e obter todos os gráficos pretendidos, tendo o utilizador de introduzir os parâmetros dos ensaios que pretende

realizar e, a partir daí, o programa controla todo o ensaio automaticamente, obtendo-se no final as curvas *força-velocidade* e *força-posição* do amortecedor ou suspensão ensaiados.

A máquina desenvolvida é apresentada na figura 1.10.



Figura 1.10 – Imagem da máquina de ensaio de amortecedores, após concluído o projecto e a sua construção.

Os principais componentes eléctricos e electrónicos a destacar na máquina são: motor eléctrico assíncrono trifásico WEG, com 5,5 [kW] de potência, e 4 pólos (velocidade nominal igual a 1500 [rpm]); redutor mecânico BONFIGLIOLLI, com uma relação de 1:13,1; variador electrónico de velocidade (VEV) WEG, com controlo vectorial, e adequado ao motor aplicado; *encoder* HEIDENHAIN incremental de 5000 impulsos, para contar as rotações do excêntrico; célula de carga VISHAY de 1000 [kg], à tracção e à compressão; circuito electrónico com microcontrolador MSP430 F449 STK2 da *Texas Instruments* que controla todos os aparelhos electrónicos; *PC* que envia, recebe e trata os dados, apresentando os gráficos finais do ensaio.

1.2.4. Identificação de limitações na máquina existente

Na máquina de ensaio de amortecedores que foi desenvolvida e está apresentada em [6], verificou-se com a sua utilização que havia vários pormenores que podiam ser melhorados, e mesmo outros acrescentados. Tal só foi possível devido à máquina ter sido construída e utilizada no ensaio de amortecedores e suspensões, caso contrário, seria impossível analisar o que se poderia melhorar.

Começando pela máquina em si, verificou-se que se a base fosse ligeiramente mais comprida a sua estabilidade seria melhorada. Algumas vibrações ocorreram nos ensaios a frequências de funcionamento mais elevadas, devido ao motor estar completamente fora da estrutura, fazendo esta vibrar ligeiramente. Este facto também se deveu ao *encoder* aplicado não ter sido o seleccionado no projecto electrónico, por engano no envio do mesmo por parte do fabricante, o que provocou o recuo da posição do redutor, logo, do motor. Outra solução passaria por retirar o *encoder* e colocar o redutor mecânico mais à frente, junto ao excêntrico, o que seria mais eficaz para eliminar as vibrações. Neste caso, o controlo da posição deveria ser efectuado com base somente no sensor que conta as voltas do excêntrico, e com uma programação adequada do microcontrolador. Este é assim o primeiro aspecto a considerar sob o ponto de vista de aperfeiçoamento mecânico.

Verificou-se também que os apoios projectados para fixar amortecedores e suspensões, e também construídos e aplicados, servem perfeitamente para ensaiar suspensões, mas seria melhor do ponto de vista de estabilidade do apoio projectar (a aplicar) novos apoios específicos para ensaiar amortecedores, pois como estes têm um furo com um diâmetro inferior ao das suspensões (somente de 10 [mm]), este veio oscilava nos ensaios a maiores velocidades, devido a ter um comprimento demasiado elevado para o seu diâmetro, e também para a dimensão do furo do amortecedor. O projecto destes apoios convém ser complementado com um estudo de forças, de modo a verificar que os novos apoios são adequados às forças envolvidas num ensaio.

Em relação à parte electrónica, foi possível verificar com a prática que o VEV induz ruído na fonte de alimentação, o que interfere com o sinal da força devolvido pela célula de carga. Assim, devem ser incluídos filtros no projecto electrónico, principalmente na ligação do VEV com a rede de alimentação e com o motor eléctrico, e entre a fonte de alimentação e a nova placa electrónica desenvolvida.

Quanto ao *encoder*, este mostrou com a prática ser bastante sensível a vibrações da estrutura. A melhor solução seria mesmo aplicar um *encoder* na coroa do excêntrico, ou mesmo no veio de ligação do redutor com o excêntrico. Mas, mesmo assim, encontraram-se soluções alternativas a este dispositivo, como controlar a velocidade e posição do excêntrico somente com o sensor magnético. Como este detecta o ponto zero, e envia essa informação para o MSP430, caso a cada passagem activasse um temporizador, sabendo o tempo entre o início e final de cada volta, conseguir-se-ia calcular a velocidade de rotação do excêntrico e a velocidade linear do veio do amortecedor. Assim, um pormenor que se poderia melhorar seria precisamente eliminar o *encoder* e fazer o controlo somente com o sensor magnético que está colocado no excêntrico e com base na programação do microcontrolador.

Em relação à ligação do microcontrolador com o *PC*, esta é feita através de uma porta COM, mas para ligação série (RS232). Devido ao facto de actualmente os computadores de uso pessoal, principalmente os portáteis, estarem todos a adoptar ligações USB, a ligação com o microcontrolador deverá ser mudada para este tipo.

Por fim, o ultimo aspecto a melhorar prende-se com o programa de interface com o utilizador, que na máquina desenvolvida não está feito de modo a uma fácil interacção entre o utilizador e a máquina, sendo os comandos enviados um a um por uma porta série. Assim, para que um utilizador sem conhecimentos informáticos possa operar com a máquina, deve ser desenvolvido um programa para uma fácil utilização por parte do técnico que ensaie os amortecedores ou suspensões, em que este escolha os parâmetros do ensaio, dê início ao teste, e obtenha os gráficos finais dos ensaios.

1.3. Objectivos do Trabalho

O principal objectivo deste trabalho é complementar o projecto de uma máquina para ensaio de amortecedores e suspensões (*Shock Dynamometer*), realizado no âmbito do projecto final de curso da licenciatura em Engenharia Electromecânica, desenvolvendo todos os tópicos abordados no ponto anterior.

A máquina deverá ter a capacidade de realizar testes a cursos e velocidades diferentes, escolhidos pelo utilizador. Esta mede a força exercida no amortecedor, a posição do veio e sua velocidade a cada instante, de modo a que, no final de cada ensaio, o utilizador consiga obter gráficos que relacionem a força com a velocidade do veio do amortecedor, equivalente à velocidade de rotação do excêntrico, e a força com a posição do mesmo veio. A particularidade da máquina desenvolvida é o facto de ter melhores características e funcionalidades em relação às existentes no mercado, devido a permitir o ensaio de suspensões dianteiras de mota, o que altera as suas dimensões e características dos seus constituintes.

Começando pelos objectivos do trabalho a nível mecânico, estes passam por estudar e alterar a posição do redutor, e também os apoios para testar amortecedores, projectando-os e fazendo uma análise de forças de ambas as alterações, comparando com as soluções actualmente existentes na máquina.

A nível electrónico, pretende-se em primeiro lugar fazer um tratamento do ruído, introduzindo filtros no variador electrónico de velocidade (entrada da rede e saída para o motor), na fonte de alimentação da placa electrónica (*PCB*), filtros na instrumentação, bem como nas ligações entre os circuitos de instrumentação e os dispositivos a estes ligados, como a célula de carga, ou os sensores. Outro objectivo passa por retirar o *encoder*, alterando assim o programa de controlo de modo a realizar o controlo da posição e velocidade somente com o uso de programação e do sensor magnético de presença utilizado no excêntrico.

Outro objectivo passa pela facilidade de utilização do *software*, de modo a que qualquer utilizador, mesmo com poucos conhecimentos informáticos, consiga utilizar a máquina e

explorar as suas funcionalidades de modo simples e sem danificar nenhum equipamento (o que pode acontecer caso a máquina seja utilizada de forma inadequada). Para tal, o utilizador só terá de seleccionar parâmetros como o curso a ensaiar e as velocidades a que pretende que o amortecedor/suspensão seja ensaiado, entre outros, e dar ordem para o início do ensaio. O programa a desenvolver deverá realizar tudo o resto de forma automática, desde o início até ao final do ensaio, apresentando no final os gráficos obtidos com base nos valores lidos pelos aparelhos de medição, apresentando estes de forma simples ao utilizador, permitindo guardá-los também de forma simples.

Pretende-se ainda conhecer as normas de segurança, de calibração e de certificação de um equipamento deste tipo, e adequá-las à máquina desenvolvida, tanto a nível eléctrico como a nível mecânico, de modo a simplificar um possível processo de certificação do equipamento. Nesta fase, será útil desenvolver um manual do utilizador, apresentando os modos de funcionamento da máquina, e como trabalhar com esta, sendo ainda feita uma síntese das normas de segurança a respeitar.

Finalmente, caso todos os objectivos atrás referidos sejam alcançados com sucesso, seria desejável testar um amortecedor e uma suspensão com a máquina já finalizada, comprovando assim o sucesso do trabalho.

A principal contribuição deste trabalho será a finalização da construção de uma máquina que permita o ensaio de suspensões de motas, o que actualmente está muito pouco desenvolvido, e ainda de amortecedores de uma forma geral, e que seja o mais universal possível. Esta máquina será de extrema importância para o conhecimento do comportamento tanto de suspensões como de amortecedores, de veículos de competição e não só, devendo permitir otimizar o seu funcionamento e utilização.

A máquina poderá ser utilizada tanto por preparadores de suspensões/amortecedores de alto nível, já com conhecimentos avançados acerca do comportamento e funcionamento destes, como por mecânicos de oficinas normais, somente para afinação, regulação e reparação destes equipamentos.

1.4. Visão Geral da Organização do Trabalho

Após uma introdução ao funcionamento dos amortecedores e à máquina que se pretende aperfeiçoar para testar tanto amortecedores como suspensões, o projecto está dividido em sete partes: inicialmente são abordados os aspectos mecânicos a melhorar, começando por se fazer uma análise das forças envolvidas em alguns elementos da máquina, e com o conhecimento destas partir-se-á para o desenvolvimento das melhores soluções. Segue-se o estudo do ruído e perturbações em sistemas electromecânicos, fundamental para perceber os tipos de ruído que devem ser eliminados e as formas de o fazer, sendo seguidamente estudadas as técnicas e métodos para minimizar o ruído e perturbações envolvidas na electrónica utilizada. Após todo este estudo, será realizado todo o tratamento do ruído e perturbações existentes nos vários equipamentos electrónicos, e ainda alterados os circuitos de instrumentação, de modo a

adequar estes aos novos requisitos de eliminação de ruído, e ainda aos requisitos de segurança a aplicar na máquina. Aperfeiçoada toda a parte mecânica, eléctrica e electrónica da máquina, segue-se o desenvolvimento do *software* de interface com o utilizador, controlo e tratamento dos dados introduzidos e medidos, e realização dos respectivos gráficos. Seguidamente entrar-se-á nos aspectos relacionados com o registo, certificação, calibração e licenciamento da máquina, conhecendo as normas a respeitar e implementando-as. Na sequência do estudo do processo de certificação, será desenvolvido um manual do utilizador do equipamento, apresentado em anexo. Para terminar, serão apresentados alguns testes realizados com a máquina desenvolvida, seguindo-se as conclusões do trabalho e possíveis sugestões para trabalho futuro.

Nas alterações ao projecto mecânico começar-se-á por rever o projecto mecânico da máquina desenvolvida, e abordar as forças apresentadas por um amortecedor, com base em ensaios analisados (realizados por fabricantes de amortecedores), de modo a conhecer o comportamento destes, o tipo de forças e a sua variação. Segue-se uma análise das forças na estrutura da máquina, realizadas pelo redutor mecânico, o qual devido à sua posição provoca alguma vibração da estrutura para velocidades mais elevadas (e conseqüentemente para forças maiores). Estudam-se também as forças nos apoios, de modo a verificar o porquê da instabilidade verificada nestes em ensaios de amortecedores. Conhecidas as forças envolvidas na máquina existente, parte-se de seguida para as alterações a realizar: começa-se pela alteração da posição do redutor, analisando as forças exercidas por este na estrutura quando é colocado na nova posição, e são desenvolvidos os novos apoios para o suporte de amortecedores, estudando-se também as forças envolvidas, de modo a verificar os resultados da alteração.

O terceiro capítulo é de índole puramente teórica, sendo analisadas as várias perturbações e tipos de ruído existentes em sistemas electromecânicos, de modo a conhecer o que é necessário minimizar. Assim, começam por se analisar as parasitas electrónicas que afectam os circuitos electrónicos, as suas fontes, factores que favorecem o seu aparecimento e transmissão, e o seu espectro. São depois estudadas as perturbações por ligação galvânica, e alguns modos de as minimizar, indicando tipos de filtros e componentes destes. São também abordadas neste ponto as massas (mecânicas e electrónicas), a importância da sua ligação e o modo mais adequado de o fazer. Seguidamente, estudam-se as perturbações electromagnéticas, nomeadamente a influência de ondas electromagnéticas em circuitos electrónicos, e as blindagens electromagnéticas, de modo a saber como minimizar estas perturbações. Estuda-se de seguida o ruído de fundo, caracterizando-o e apresentado as formas deste se apresentar em circuitos electrónicos.

O quarto capítulo é ainda de forte índole teórica, com o estudo dos métodos de minimização de ruído e perturbações, mas já virado para o tratamento destes fenómenos, estudando-se os vários métodos e técnicas para os minimizar. Começa-se por realizar o estudo da protecção dos circuitos de entrada contra perturbações, desde a fonte de alimentação, aos vários circuitos de instrumentação, apresentando as soluções para minimizar os efeitos das perturbações apresentadas anteriormente, e são ainda estudados os filtros existentes, que permitem minimizar o ruído e todas as perturbações estudadas ao longo do capítulo anterior.

No quinto capítulo serão realizadas as alterações ao projecto electrónico da máquina, sendo tratado o ruído e as perturbações existentes, e adequados os circuitos às novas características da máquina de ensaio de amortecedores. Assim, é feita inicialmente uma revisão do projecto electrónico da máquina, apresentando-se os equipamentos usados, os circuitos desenvolvidos, e a placa electrónica onde todos os circuitos foram implementados. Depois, é abordado o tratamento do ruído realizado pelo VEV, sendo apresentada a solução para o minimizar. Segue-se o tratamento do ruído da fonte de alimentação, bem com dos vários circuitos de instrumentação, sendo abordadas todas as alterações a implementar. São seguidamente apresentadas as alterações realizadas nos circuitos de instrumentação, que permitem reduzir o ruído existente e alterar a placa electrónica, permitindo que esta garanta à máquina as novas funcionalidades desejadas. Após apresentadas todas as alterações, será ainda apresentada a nova placa de circuito impresso, que neste caso foi dividida em duas: uma somente para os circuitos das alimentações, e outra para os vários circuitos de instrumentação, que ligam os aparelhos ao microcontrolador. Para terminar aborda-se a alteração na ligação do MSP430F449 ao PC, que passa a ser feita via USB, apresentando-se os detalhes desta nova ligação.

O sexto capítulo consiste no desenvolvimento do *software* necessário para realizar a interface do utilizador com a máquina, para controlar todos os aparelhos electrónicos utilizados, e para a obtenção dos gráficos finais. Neste, começar-se-á por se abordar o programa anterior, e o que se pretende alterar. Segue-se o desenvolvimento do programa de interface, apresentando fluxogramas do funcionamento pretendido deste, passando a explicar-se como é realizado o programa e mostrando a sua apresentação para o utilizador, desde a introdução dos dados até à obtenção dos gráficos. É também abordado o novo programa desenvolvido para o microcontrolador, o qual deverá ser alterado de modo a se adequar ao novo programa de interface, e à nova placa electrónica, e novos componentes introduzidos na máquina, nomeadamente sensores.

Segue-se o estudo relativo à certificação da máquina desenvolvida, no sétimo capítulo. Neste, começam por se abordar as normas de segurança de equipamentos electromecânicos para uso industrial, as quais devem ser adequadas ao equipamento em questão, e abordado como se devem fazer cumprir, promovendo as alterações necessárias na máquina, que são apresentadas logo de seguida. São abordados depois os requisitos de calibração exigidos, de modo a que os resultados fornecidos sejam acreditados e válidos para qualquer tipo de utilização, sendo apresentado o seu método de implementação. Deste modo, estando em condições para se avançar para a certificação do equipamento, são indicados os critérios a cumprir para que esta seja possível, e como decorre o processo de certificação do equipamento. Após estudada a certificação da máquina, e no seguimento das exigências para a certificação da mesma, é feito o manual do utilizador desta, que é apresentado no Anexo A.

No final de todo o equipamento estar aperfeiçoado, e apresentados os critérios para a sua certificação, serão apresentados alguns ensaios realizados com a máquina construída com base neste trabalho, e discutidos os seus resultados, os quais permitem tirar conclusões tanto de todo o trabalho desenvolvido, como do funcionamento dos equipamentos ensaiados.

Para terminar, segue-se uma conclusão final do trabalho, e guias de orientação para trabalho futuro.

Referências

- [1] Amortecedores Remanufacturados, “Esquema básico de um amortecedor telescópico,” Novembro 2007, www.envenenado.com.br/acessorios/dampers/damper_02.jpg.
- [2] Motorcycle, “Setting up your bike,” Novembro 2007, www.ohlins.com.
- [3] E. Gorr, “Motocross and Off-Road Motorcycle Performance Handbook,” *Motorbooks International Publishers & Wholesalers*, Osceola – Estados Unidos da América, 1996.
- [4] Manual de preparação de suspensões e amortecedores, Race Tech.
- [5] P. Haney, “Shock Dynamometer: where the graphs come from,” *Roehrig Engineering, Inc*, High Point – Estados Unidos da América, 2004.
- [6] F. Duarte, “Máquina para ensaio de amortecedores,” Universidade da Beira Interior, Covilhã – Portugal, 2007.

Capítulo

2

Alterações ao Projecto Mecânico

No projecto mecânico dimensionaram-se todos os componentes e órgãos mecânicos da máquina de ensaio de amortecedores. Contudo, com a utilização da máquina, verificou-se que se poderiam realizar alterações que permitissem dar maior estabilidade à máquina no decorrer dos ensaios, e facilitar ainda o ensaio de amortecedores. Estes devem ser estudados e dimensionados de modo a otimizar o funcionamento da máquina.

2.1. Revisão do Projecto Mecânico

“Projecto mecânico é a designação usada em engenharia para todas as actividades respeitantes a dimensionamento, verificação e análise da falha de componentes e estruturas de órgãos de máquinas e equipamentos mecânicos” [1].

“O projecto mecânico trata apenas do problema das solicitações mecânicas nos órgãos de máquinas, em todos os casos em que estes sejam predominantes para o desempenho dos componentes, e sempre que aspectos secundários, como a estética, aparência, ergonomia ou marketing sejam de menor importância. Assim, no projecto mecânico somente se considera o efeito das solicitações mecânicas no componente” [1].

Para o projecto mecânico da máquina de ensaio de amortecedores, partindo dos conhecimentos obtidos através da análise de outras máquinas já existentes, procurou-se criar uma máquina que ensaiasse não somente amortecedores, mas também suspensões de motas, que pelas suas dimensões alteram inevitavelmente as dimensões da máquina, não só da estrutura, mas também de todos os elementos mecânicos, devido às forças envolvidas terem valores diferentes. Os cursos a ensaiar também aumentam, o tipo de apoios para a suspensão é diferente em relação aos existentes para testar amortecedores, entre outros pormenores que serão apresentados seguidamente. No projecto mecânico foram dimensionados todos os elementos mecânicos da máquina, estrutura, e elementos de ligação.

Assim, numa primeira abordagem à máquina projectada, tiveram-se por base as dimensões máximas de uma suspensão dianteira de uma mota (considerando as suspensões de motas de todo-o-terreno, que apresentam dimensões maiores que as restantes). Uma representação de uma suspensão como a atrás referida é apresentada na figura 2.1. Nesta, podem-se observar as 3 principais zonas externas de uma suspensão: a capa da suspensão (1), que é a parte que fixa esta à estrutura da mota, e cujas dimensões variam (d_1) entre 450 e 600 [mm], e (d_5) entre 35 e 60 [mm]; a bainha da suspensão (2), que é a parte móvel desta, subindo e descendo consoante as forças e solicitações aplicadas na suspensão, e o seu comprimento varia normalmente entre 100 e 300 [mm]; e a ligação da suspensão com a roda dianteira (3), que mede no máximo (d_3) 100 [mm], tendo um furo por onde passa um eixo, que liga a suspensão à roda, a uma distância do eixo central da suspensão entre (d_6) 0 e 50 [mm]. Calculando, obtém-se que a altura máxima para uma suspensão deste tipo ronda os 1000 [mm], ou seja, um metro.

Com base nestas medidas foram dimensionados os apoios superior e inferior para a suspensão, bem como as barras verticais que estão apoiadas na estrutura, e que têm uma altura suficiente para testar uma suspensão deste tipo.

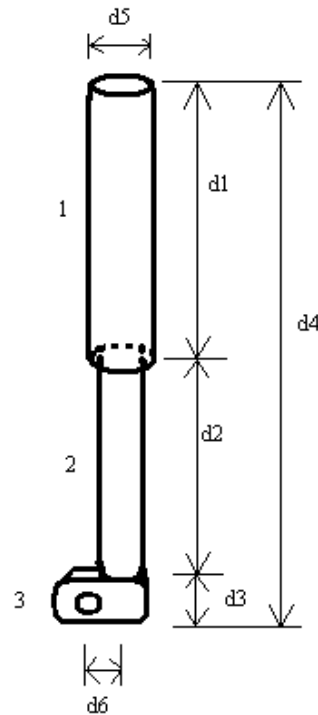


Figura 2.1 – Esquema de uma suspensão dianteira de uma moto de todo-o-terreno.

Numa abordagem inicial da máquina, comece-se por se analisar onde estarão envolvidas forças. O movimento que acciona todo o sistema irá partir de um motor eléctrico, pelo que será no local onde este estará apoiado que, quando uma força é feita por este, será aplicada uma força com sentido oposto. Por outro lado, quando a força é exercida no amortecedor ou na suspensão, esta será medida por uma célula de carga, que estará apoiada numa barra, que por sua vez estará apoiada em duas barras verticais. Assim, novamente tendo em consideração a terceira Lei de Newton, relativa ao par de forças acção-reacção, quando uma força atinge as barras verticais, é exercida uma reacção no local onde estas estarão apoiadas. Então, convém que o ponto onde as barras verticais e o motor estão apoiados seja o mesmo, ou ter o mínimo de pontos possíveis entre eles, de modo a evitar a vibração da estrutura, ou mesmo que esta parta devido às forças que passam por si.

Surgem assim duas hipóteses para a estrutura de suporte: ou se apoiam as barras e o motor na base, ou projecta-se um bloco central onde estão apoiadas as barras verticais e o próprio motor, devendo este ser suficientemente espesso e forte para suportar todas as forças exercidas sobre ele. No primeiro caso as barras verticais terão de ser bastante mais altas, tendo neste caso de ter dimensões gerais maiores do que na segunda hipótese. Estes casos são apresentados na figura 2.2 *a* e *b*, respectivamente.

Após analisar ambos os casos, estudou-se uma terceira hipótese, em que as barras verticais são ligadas ao bloco central, sendo o bloco central unido de uma forma rígida à base, onde apoia o redutor, como apresentado na figura 2.3.

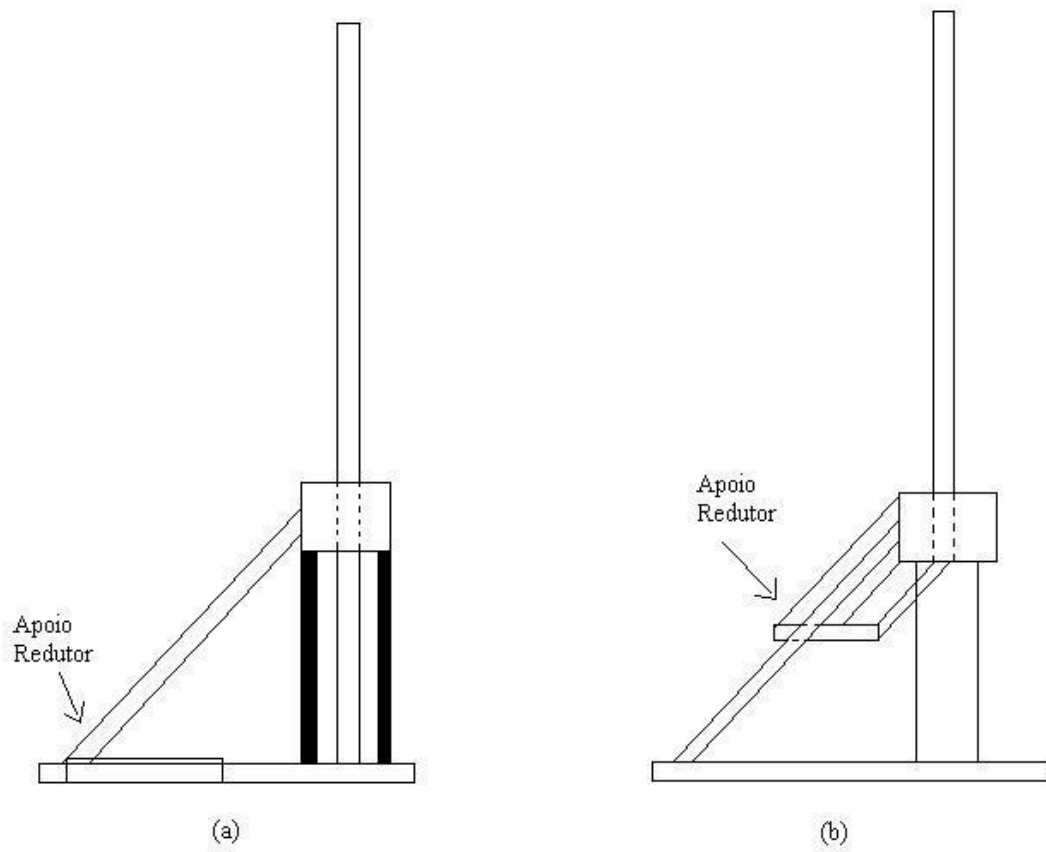


Figura 2.2 – Esquemas das hipóteses da estrutura a projectar (a) apoio do redutor na base; (b) apoio do redutor ligado ao bloco central.

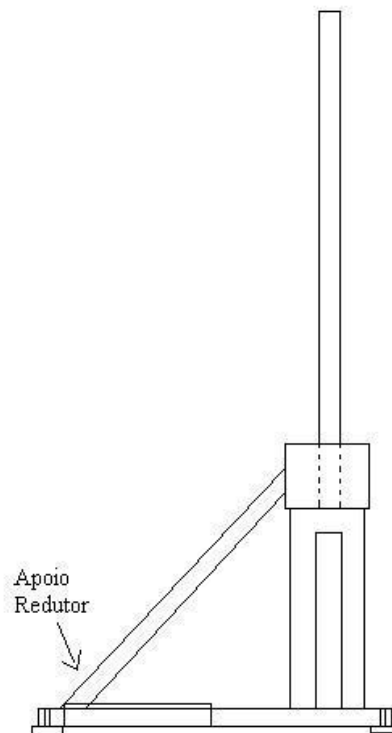


Figura 2.3 – Esquema da estrutura a projectar seleccionada.

A suspensão deverá ser apoiada em dois apoios, um em cima e outro em baixo, que deverão suportá-la de maneiras diferentes: na parte superior, visto esta ser cilíndrica, o apoio deverá “agarrar” a capa da suspensão, unindo esta com uma barra horizontal no cimo da estrutura, que fixa a suspensão, não permitindo o movimento desta; na parte inferior da suspensão, como passa um veio, o apoio deverá servir para aperto desse veio, unindo a suspensão com a biela superior, ou seja, este é o que vai suportar a parte móvel da suspensão. Para este apoio inferior dever-se-á ter em atenção o facto de haver uma distância entre o eixo da suspensão e o eixo do seu furo onde passa o veio que a liga à roda. Assim, numa primeira abordagem aos apoios, considera-se o formato apresentado na figura 2.4.

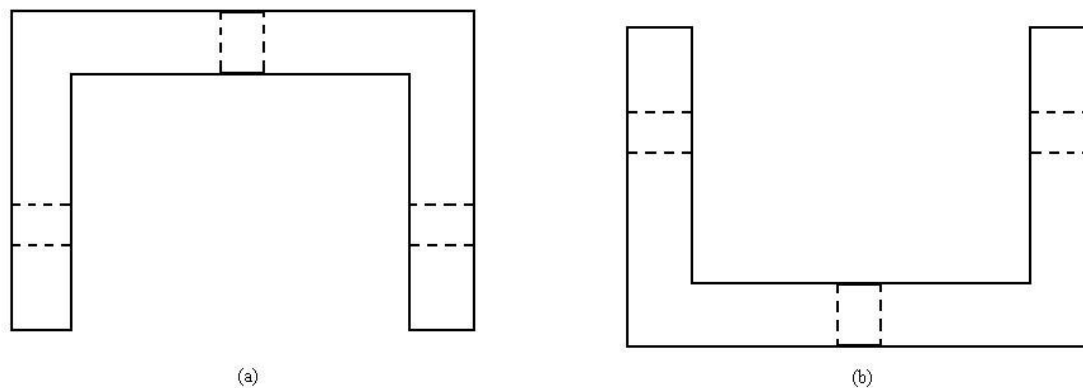


Figura 2.4 – Formato dos apoios da suspensão (e amortecedor): (a) apoio superior; (b) apoio inferior.

Estes apoios foram dimensionados de modo a permitir a fixação tanto de uma suspensão como de um amortecedor, sendo o mais universal possível. Os furos na direcção horizontal representam os locais por onde passam os veios de fixação do amortecedor (apoio superior e inferior) e da suspensão (apoio inferior), ou os parafusos que apertam as garras para apoiar a suspensão em cima (apoio superior). Os furos na direcção vertical representam os locais por onde estes apoios são apertados a outras peças: em baixo o apoio é apertado à biela superior (veio), em cima é apertado à célula de carga. A altura e comprimento destes apoios deve ser igual, mas a largura será diferente, devido ao *offset* da ligação inferior da suspensão, o que irá tornar necessário a criação de um sistema que permita testar suspensões com *offset's* diferentes, com o mesmo apoio.

A representação dos apoios da suspensão e amortecedor projectados e desenvolvidos está apresentada na figura 2.5 *a* (apoio superior) e *b* (apoio inferior).

Na parte de cima, o apoio está ligado a uma célula de carga, que por sua vez está ligada a uma barra horizontal. Esta barra é robusta, de modo a suportar as forças exercidas na suspensão ou amortecedor, sem ceder, e permite ser deslocada na direcção vertical, através das barras verticais, às quais está fixa.

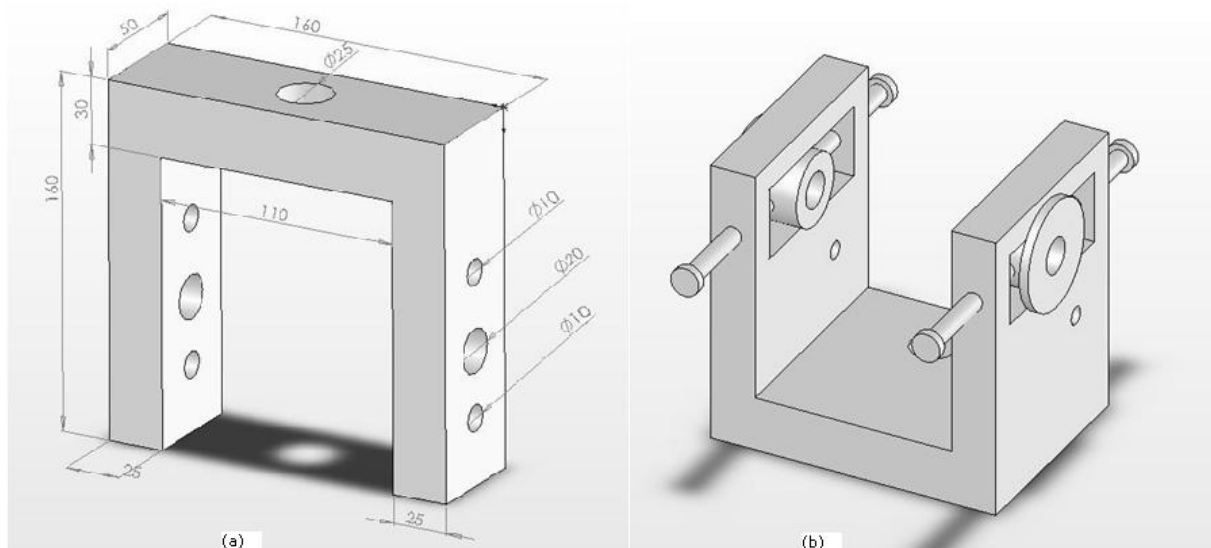


Figura 2.5 – Apoios da suspensão e amortecedor projectados: (a) apoio superior; (b) apoio inferior.

Sabendo as principais dimensões da suspensão podem-se abordar as barras verticais da máquina, que ligam a estrutura ao apoio superior da suspensão. Estas têm uma altura igual à soma das alturas da suspensão, dos apoios inferior e superior, do aparelho de medição da força, da barra que liga as duas barras verticais, e ainda da biela superior (veio) quando se encontra no curso máximo, e na parte mais elevada. Considera-se também a altura de um bloco central, onde a cada barra estará encastrada:

$$h_{BV} = h_{BS} + h_{CCarga} + h_{AS} + h_{Susp} + h_{AI} + h_{BC1max} + h_{BC} \quad [2.1]$$

No meio do bloco central está um cilindro, no meio do qual passa a biela superior, que se movimenta para cima e para baixo no seu interior, pelo que este tem dois rolamentos lineares, que guiam o movimento e suportem as forças laterais desta biela, provocadas pela biela inferior. Uma representação deste cilindro é apresentada na figura 2.6.

A altura do cilindro (h_{cil1}) é igual à altura do bloco central, tendo ainda duas extremidades que ficam na parte de fora deste bloco, através das quais o cilindro será aparafusado a este, cada uma com uma altura $h_{cil2}=h_{cil3}$. A altura total do cilindro é igual à soma destas três alturas:

$$h_{cilindro} = h_{cil1} + h_{cil2} + h_{cil3} \quad [2.2]$$

Quanto aos diâmetros deste, o diâmetro d_{cil1} representa o diâmetro interno do cilindro, d_{cil2} o diâmetro externo, e d_{cil3} o diâmetro externo das extremidades, e d_{cil4} o diâmetro interno das extremidades.

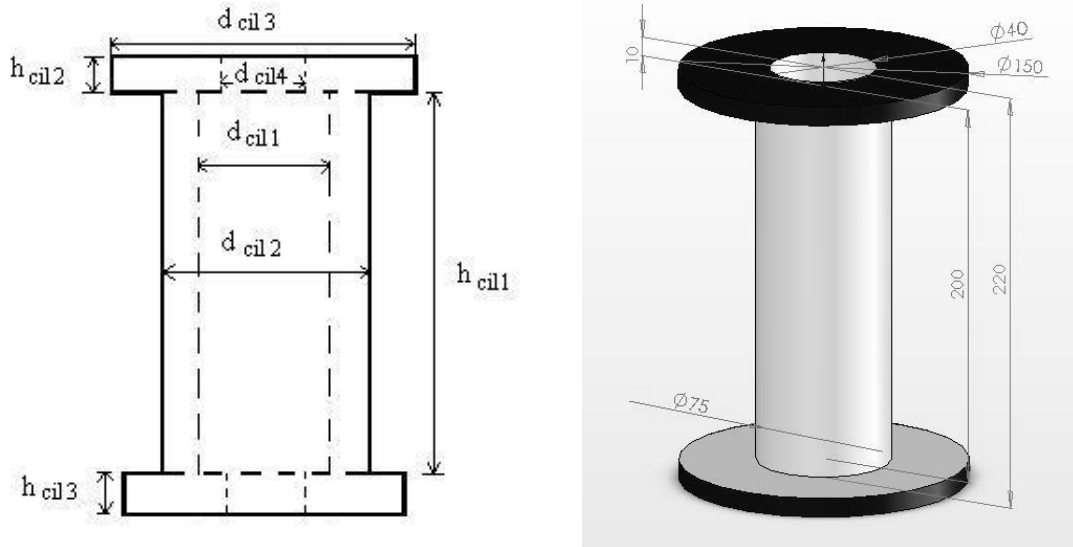


Figura 2.6 – Representação do cilindro.

A biela superior tem um comprimento (ou altura) igual à altura do cilindro, somando com a medida do curso máximo a ensaiar, e uns centímetros de tolerância em cada extremidade, para não haver risco de bater no bloco em nenhuma ocasião.

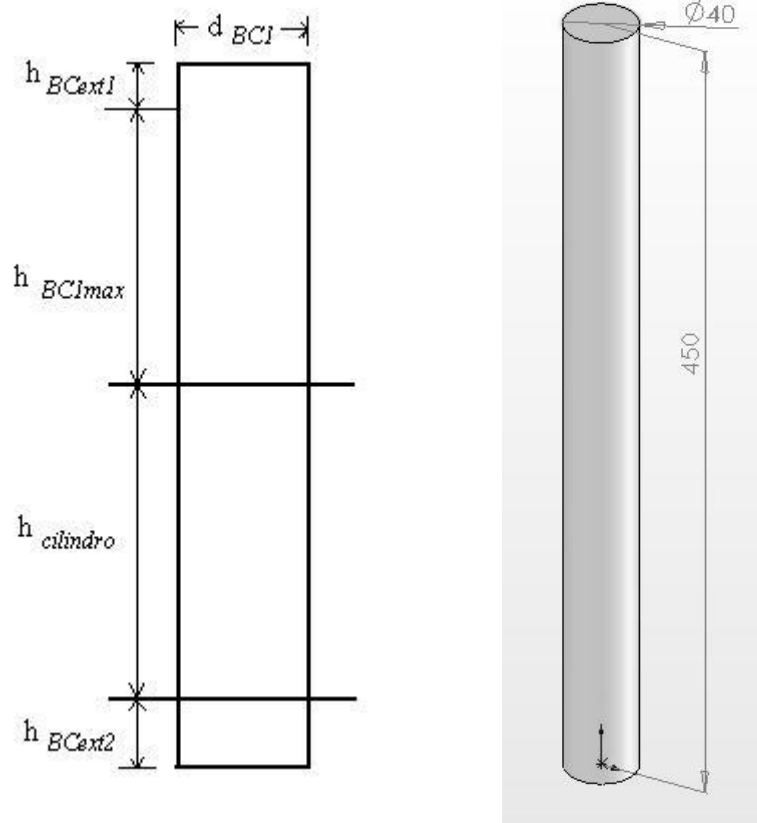


Figura 2.7 – Representação da biela superior.

A representação desta biela é ilustrada na figura 2.7, sendo um veio visto de frente, com um diâmetro externo d_{BC1} . A altura total desta biela (ou veio) é dada por:

$$h_{BC} = h_{cilindro} + h_{BC1max} + h_{BCext1} + h_{BCext2} \quad [2.3]$$

A biela de baixo tem a função de ligar o excêntrico à biela de cima, controlando o movimento desta última. O formato desta é o formato típico de uma biela, com duas extremidades cilíndricas, e uma coluna que as une.

Deve-se ter em atenção o ângulo θ_3 (figura 2.12) pois deste depende bastante a força exercida sobre e pela biela. Para controlar este ângulo ajusta-se o comprimento da biela, que não deve ser demasiado pequeno, para evitar forças muito elevadas, nem demasiado comprido, para não dar uma altura muito elevada a todo o sistema. A altura h_{BB1} desta biela foi dimensionada considerando a biela como uma coluna com ambas as extremidades articuladas.

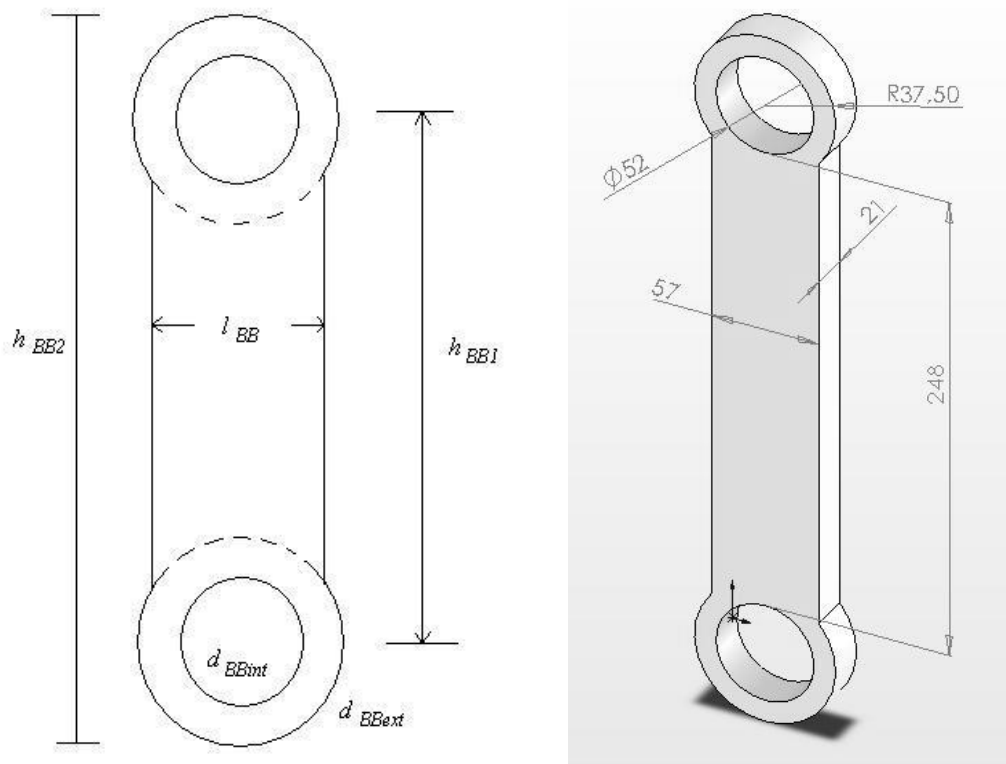


Figura 2.8 – Representação da biela inferior.

O que acciona esta biela, controla a amplitude do seu movimento, e todos os cursos possíveis de testar é o excêntrico. A representação deste elemento é apresentada na figura 2.9, sendo todo o processo de desenvolvimento deste componente descrito em [2].

Este elemento tem a função de ligar o motor e redutor à biela, conferindo um movimento de rotação a esta e, dependendo da distância da ligação do centro do apoio inferior da biela ao centro do veio do motor (que deve ser o mesmo do centro do excêntrico), se obtêm metade do curso a ensaiar. Com o objectivo de ensaiar cursos entre 40 e 180 [mm], têm de se ter

distâncias de ligação da biela com o centro do excêntrico entre 20 e 90 [mm] (raio), pelo que o excêntrico deverá ter um raio superior a 100 [mm] para espaço de um sistema de ligação com a biela.

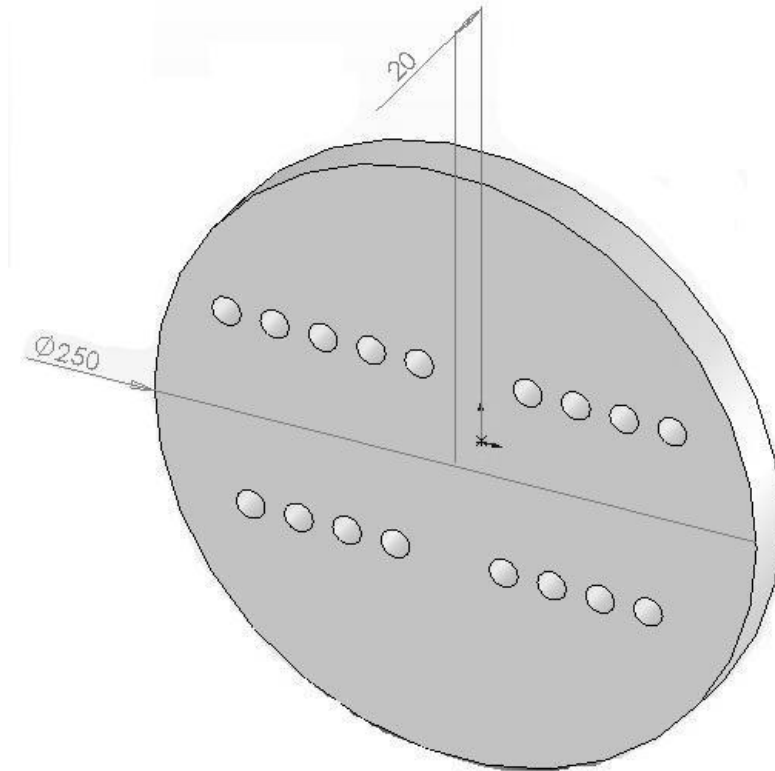


Figura 2.9 – Representação do excêntrico.

Foram também desenvolvidos elementos de ligação entre os componentes até aqui abordados, rolamentos tanto para o cilindro como para o excêntrico, suporte dos aparelhos electrónicos, entre outros, estando a representação final da máquina projectada apresentada na figura 2.10. Nesta figura estão representados todos os componentes projectados e desenvolvidos para a máquina, desde a estrutura, o conjunto motor e redutor, o sistema mecânico biela-manivela por este accionado, que começa no excêntrico, passando por uma biela, que converte o movimento rotacional do excêntrico para um movimento linear de um veio, estando este ligado ao apoio inferior do amortecedor. Já na parte superior da máquina, pode verificar-se a peça que foi desenvolvida, que é fixa a duas barras verticais em aço, fixas à estrutura, podendo esta peça mover-se, ajustando-se à altura do amortecedor ou suspensão a testar. A esta é fixa a célula de carga, e o apoio superior do amortecedor.



Figura 2.10 – Representação da máquina projectada.

2.2. Análise de Forças

Como é sabido, a força exercida por um amortecedor é directamente proporcional à velocidade deste, sendo dada pela seguinte expressão:

$$F = k \cdot v \quad [2.4]$$

onde k representa uma constante de amortecimento. A velocidade não é mais do que a derivada do deslocamento em ordem ao tempo:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad [2.5]$$

Então, a força exercida no amortecedor pode ser controlada pela velocidade de rotação do motor e pelo curso do excêntrico, cabendo assim ao projectista controlar essa força, pelo controlo da velocidade e posicionamento da biela no excêntrico. Deste modo, assume-se que a máxima força que se pretende testar será de 1000 [Kg.f], ou seja, 10 [kN], na direcção vertical, ou seja, segundo o eixo y . Contudo, para efeitos de projecto, considera-se um factor de segurança de 1,2 nesta força, ou seja, admite-se que a força exercida possa chegar a $F_{y,max} = 12$ [kN].

No capítulo 1 foi explicado o funcionamento do amortecedor, onde se verificou que a resistência que este faz ao movimento depende fortemente das válvulas (ou pilha de anilhas) usadas, que normalmente diferem entre a compressão e a extensão, o que faz com que a força realizada por este varie entre estes dois tipos de movimentos.

Assim, para uma mesma velocidade de rotação do motor, ter-se-ão diferentes valores da força, consoante o tipo de movimento a que este esteja sujeito.

Analisando novamente o ensaio realizado a um amortecedor apresentado no capítulo 1, passa agora a analisar-se o gráfico *Força-Velocidade* apresentado na figura 2.11, obtido a partir desse mesmo ensaio (apresentado em [3]).

Neste gráfico, consideram-se 4 rectas, duas para as forças positivas (medidas à compressão) e duas para as forças negativas (medidas à tracção). A primeira recta a considerar tem os valores de força entre 0 e 810 [N] (eixo y), e de velocidade entre 0 e 63,5 [rpm] (eixo x). A equação de uma recta é dada por:

$$y = m.x + b \quad [2.6]$$

sendo m o declive e b o ponto inicial. No caso desta primeira recta, o ponto inicial é zero, sendo assim $b=0$. O declive é calculado pela expressão:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{810 - 0}{63,5 - 0} = 12,7559 \quad [2.7]$$

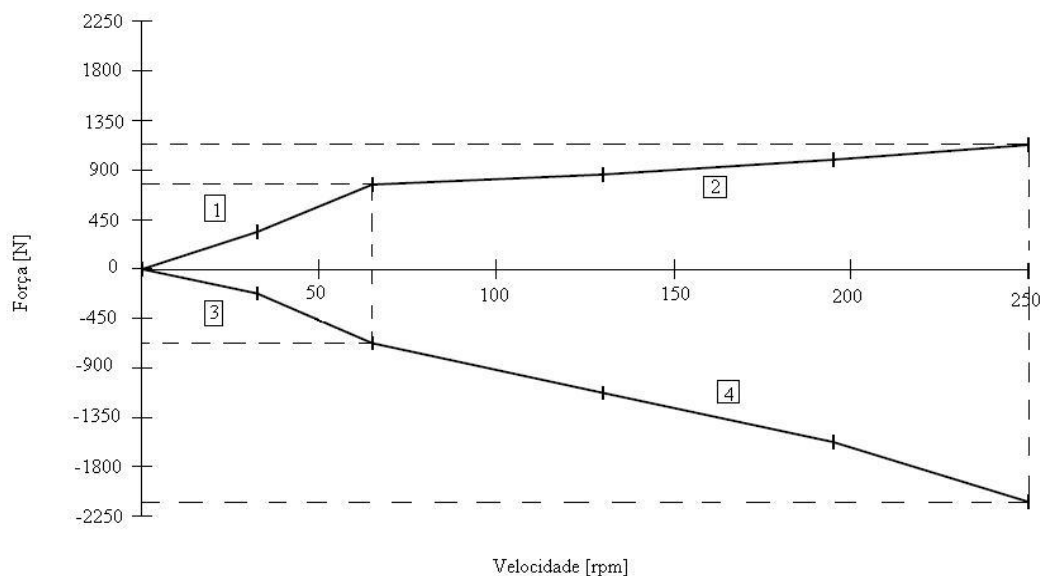


Figura 2.11 – Gráfico *Força-Velocidade* de um ensaio de um amortecedor.

Assim, a equação da primeira recta é dada por:

$$y = 12,7559.x \quad [2.8]$$

A segunda recta, com velocidades entre 63,5 e 250 [rpm] (eixo x) e forças entre 810 e 1170 [N] (eixo y), tem a seguinte equação:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{1170 - 810}{254 - 63,5} = 1,889 \quad [2.9]$$

$$y = 1,8898.x + b \Leftrightarrow b = y - 1,8898.x \quad [2.10]$$

Considerando o ponto $x = 63,5$ e $y = 810$, tem-se que $b = 690$. Então

$$y = 1,8898.x + 690 \quad [2.11]$$

Do mesmo modo, obtém-se para as rectas 3 e 4, considerando os valores das forças em módulo:

Recta 3:

$$y = 10,6299.x \quad [2.12]$$

Recta 4:

$$y = 7,3228.x + 210 \quad [2.13]$$

Com estas equações consegue-se ter noção da variação das forças num amortecedor, dos seus valores, sendo estas de grande importância para a selecção do motor, visto permitir calcular a força que o amortecedor realiza em função da velocidade a que o motor faz girar o excêntrico, e do curso deste último.

Pode ainda verificar-se que a constante k , da expressão [2.4] não é constante ao longo do ensaio, pois a força não aumenta sempre do mesmo modo, com a variação da velocidade: ao longo de cada recta existe uma constante diferente, pois em cada recta (das 4) a força varia de maneira diferente com as variações da velocidade. Pode-se entender o declive da recta como sendo a constante k , pois é este que determina a variação da força com a variação da velocidade.

O objectivo da máquina passa assim por permitir determinar essa constante k , com os ensaios realizados, a qual depende de várias variáveis, como a velocidade de ensaio, pilha de anilhas do amortecedor, tipo de óleo usado, temperatura de funcionamento desse óleo, afinação do amortecedor, entre outros.

2.2.1. Forças a desenvolver pela máquina

Considere-se o esquema apresentado na figura 2.12.

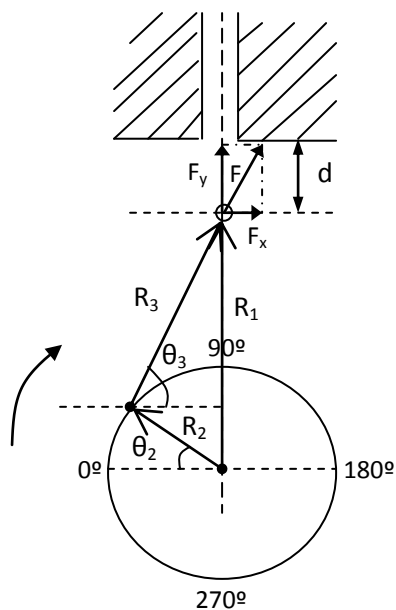


Figura 2.12 – Esquema do funcionamento da biela-manivela da máquina.

Considerando:

- R_2 é a distância entre o centro do eixo do motor, logo, do excêntrico, e o eixo inferior da biela, e pode variar, consoante o curso (diâmetro) que se queira testar, entre 20 e 90 [mm];
- R_3 é a distância entre eixos da biela, tendo uma medida fixa de 300 [mm];
- a distância R_1 é igual à soma vectorial das distâncias \bar{R}_2 e \bar{R}_3 ;
- a letra d representa a distância entre o fundo do cilindro e o eixo superior da biela;
- a distância a representa a distância entre o fundo do cilindro e o eixo do excêntrico, sendo igual a 470 [mm];
- como a distância a é igual à soma de d com R_1 , então: $d = a - R_1$ [mm];
- o ângulo θ_2 varia entre 0° e 360° , sendo o ângulo do apoio da biela no excêntrico.

Pretende-se calcular as variações do ângulo θ_3 em função da posição da biela, e da distância R_2 . Pretende-se ainda calcular a distância R_1 , d , as forças F_x e F_y , e ainda o momento M_I feito pela biela superior no cilindro.

Quanto às forças, atendendo à figura pode verificar-se que a força F se decompõe entre F_x e F_y , do seguinte modo:

$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y$$

$$\vec{F}_x = F \cdot \cos\theta_3 \quad [2.14]$$

$$\vec{F}_y = F \cdot \text{sen}\theta_3$$

Atenda-se à decomposição do vector R, apresentada na figura 2.13.

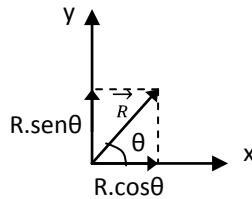


Figura 2.13 – Decomposição do vector R.

Com os vectores R da figura 2.12 pode então deduzir-se:

$$\sum x = 0 \Leftrightarrow -R_2 \cdot \cos\theta_2 + R_3 \cdot \cos\theta_2 = 0 \Leftrightarrow \theta_3 = \arccos \frac{R_2 \cdot \cos\theta_2}{R_3} \quad [2.15]$$

$$\sum y = 0 \Leftrightarrow R_1 = R_2 \cdot \text{sen}\theta_2 + R_3 \cdot \text{sen}\theta_3 \quad [2.16]$$

Assim, sabendo R_2 , R_3 , a , considerando que F é sempre igual a F_{max} (o que na prática não se verifica, visto a variação da força ser sinusoidal, mas para dimensionamento considera-se assim, de modo a prever sempre o pior caso), sabendo ainda que o ângulo θ_2 varia entre 0 e 360°, conseguem-se desde já calcular as forças em x e em y , as distâncias R_1 e d . Para calcular o momento M_1 multiplica-se a distância d (em metros) pela força F_x :

$$M_1 = d \cdot F_x [N \cdot m] \quad [2.17]$$

Para possibilitar a realização destes cálculos, e de modo a visualizar a alteração de cada uma das incógnitas, com a variação do ângulo θ_2 (com variações de 5 em 5°) foi feito em formato *Excel* um programa, em que são introduzidos os valores dos parâmetros R_2 , R_3 , a , e F , com várias folhas de apresentação, uma para cada valor de R_2 (raio que determina o curso a ensaiar), calculando-se os valores de θ_3 , R_1 , d , F_x , F_y , e M_1 para cada valor do ângulo θ_2 .

Com este programa, conseguiu-se verificar detalhadamente que:

- para cursos mais pequenos (R_2 entre 40 [mm] e 90 [mm]), o ângulo θ_3 sofre pequenas variações e a distância d não atinge valores muito baixos. Para estes valores a força F_x

é sempre bastante reduzida, relativamente a F_y , sendo também o momento M_1 reduzido;

- para cursos mais elevados, a partir de $R_2 = 100$ [mm] (e até 180 [mm]), verifica-se um aumento nas variações do ângulo θ_3 , aumentando assim a componente da força F_x e diminuindo ligeiramente a componente F_y , o que provoca um aumento considerável no momento M_1 . A distância d alcança nestes cursos maiores variações, devido ao aumento do curso e à maior variação de θ_3 .

Com os valores obtidos com este programa, conseguiram-se dimensionar adequadamente as bielas superior e inferior, os rolamentos a usar (tanto na biela inferior, como no cilindro, para a biela superior), e seleccionar o motor eléctrico e o redutor mais adequados a usar na máquina de ensaio de amortecedores.

2.2.2. Forças realizadas sobre a estrutura

A análise de forças na estrutura é feita nos pontos onde assenta o redutor mecânico, visto ser nestes pontos que são realizadas as forças opostas à que este aplica no excêntrico, de modo a transmitir essas forças ao amortecedor.

O redutor mecânico é apoiado na base da estrutura, através de 4 parafusos, dispostos de modo a formar um rectângulo, e a base onde este assenta é constituída por barras UNP80, soldadas entre si, e dispostas de forma a unir o redutor à estrutura, como apresentado na figura 2.14. Os 4 parafusos que unem o redutor à base da estrutura são identificados pelas letras *A*, *B*, *C* e *D*.

Dependendo da direcção da força (para cima, de modo a comprimir o amortecedor, ou para baixo, de modo a traccionar o amortecedor) realizada pelo excêntrico sobre a biela inferior, as forças realizadas pelo redutor sobre a estrutura vão também ter diferentes direcções. Considera-se o caso 1 como a situação em que se comprime o amortecedor, sendo a força realizada para cima (figura 2.12 *a* e *c*), e o caso 2 a situação em que se tracciona o amortecedor (figura 2.12 *b* e *d*).

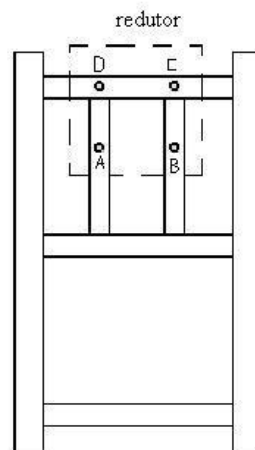


Figura 2.14 – Base da estrutura, com local de aplicação do redutor.

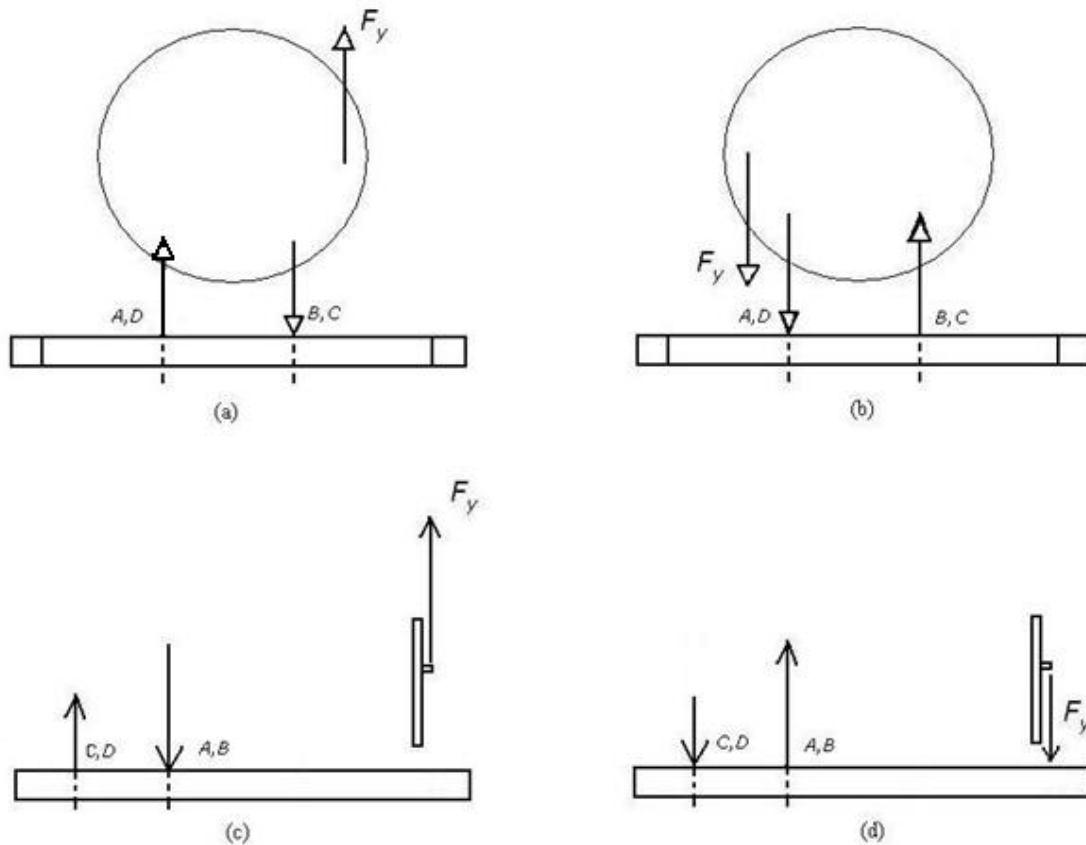


Figura 2.15 – Forças realizadas na base da estrutura: (a) caso 1, vista de frente; (b) caso 2, vista de frente; (c) caso 1, vista de lado; (d) caso 2, vista de lado.

Na figura 2.15 estão representados todos os casos possíveis das forças realizadas sobre os 4 locais de apoio do redutor na estrutura (*A*, *B*, *C* e *D*). Pode-se verificar que as maiores forças serão realizadas sobre os parafusos da frente do redutor (*A* e *B*). Nesta análise é desprezado o peso do motor, que faz incidência sobre os parafusos *C* e *D*.

A análise destas forças servirá para analisar a ligação do redutor na estrutura, que é feita através de parafusos, os quais devem ser analisados sobretudo em relação aos esforços de tracção (pois à compressão estes não têm uma criticidade considerável). Como as principais forças serão realizadas sobre os parafusos da frente, o dimensionamento dos parafusos de ligação foi feito calculando aquele que está sujeito a uma força maior, dimensionando este. Todos os restantes são iguais a esse, pelo que se dimensionou somente o parafuso que suporta as maiores forças à tracção. A representação das forças realizadas em cada parafuso, em cada caso, é apresentada na figura 2.16.

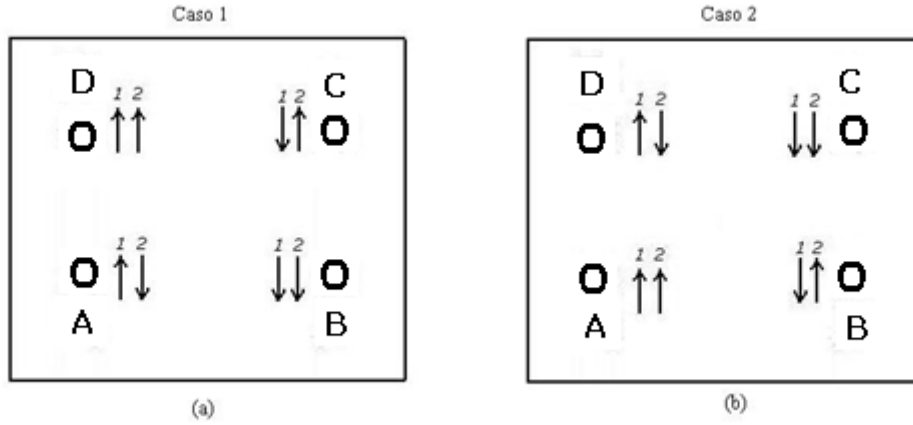


Figura 2.16 – Forças realizadas nos apoios do redutor: (a) caso 1; (b) caso 2.

Analisando a figura 2.16 a, que representa o caso em que força que o excêntrico realiza sobre a biela inferior é para cima (para comprimir o amortecedor), tem-se que:

$$\sum F_y = 0 \Leftrightarrow F_{y,max} = R_{AD} + R_{BC} \quad [2.18]$$

$$\sum M_0 = 0 \Leftrightarrow F_{y,max} \cdot r_{exc,max} = R_{BC} \times d_{EP} + R_{AD} \times d_{EP} \quad [2.19]$$

Onde $r_{exc,Max}$ representa o raio máximo de ligação da biela com o excêntrico, e d_{EP} representa a distância entre o centro do excêntrico o centro do parafuso (visto a imagem de frente).

Destas expressões conclui-se que:

$$R_{BC} = \frac{F_{y,max} \cdot \left(1 + \frac{r_{exc,max}}{d_{EP}}\right)}{2} \quad [2.20]$$

$$R_{AD} = F_{y,max} \cdot \left(1 - \frac{r_{exc,max}}{d_{EP}}\right) \quad [2.21]$$

Analisando de seguida a distribuição de forças apresentada na figura 2.16 c, ou seja, novamente o caso da força estar a ser aplicada no sentido de comprimir o amortecedor, e fazendo a mesma análise de igualar a zero o somatório das forças na vertical, e dos momentos, agora a partir do ponto CD, calculam-se as reacções nos apoios AB e CD, obtendo-se:

$$R_{AB} = F_{y,max} \cdot \left(\frac{d_{E-CD} + d_{E-AB}}{d_{E-AB}}\right) \quad [2.22]$$

Onde d_{E-AB} representa a distância entre o excêntrico e os parafusos A e B , e d_{E-CD} a distância entre o excêntrico e os parafusos C e D . Quanto à reacção nestes últimos parafusos, não é necessário calcular, pois nenhum representa o local onde são aplicadas as forças máximas.

Analisando então onde é aplicada a força máxima, verifica-se que é no apoio B, calculando-se a força exercida neste considerando que as forças R_{AB} e R_{BC} se distribuem de igual forma sobre os apoios em questão. Assim:

$$R_B = \frac{R_{BC}}{2} + \frac{R_{AB}}{2} \quad [2.23]$$

Calculada a reacção no apoio B, dimensiona-se o parafuso deste apoio, visto ser o caso mais crítico, pelo que os restantes são todos iguais.

2.2.3. Forças nos apoios

Para universalizar os apoios inferior e superior da suspensão e do amortecedor, projectaram-se estes com uma forma semelhante à apresentada na figura 2.17 (vistos de frente).

No caso do apoio inferior, a força é aplicada no centro da base, sendo transmitida ao amortecedor ou suspensão através de um veio que fixa esta peça ao componente a ensaiar, que passa na linha a tracejado.

No caso do apoio superior, a força recebida pelo amortecedor é transmitida ao apoio através do veio que os liga, e que passa também na linha a tracejado, estando o apoio ligado à célula de carga através da sua base.

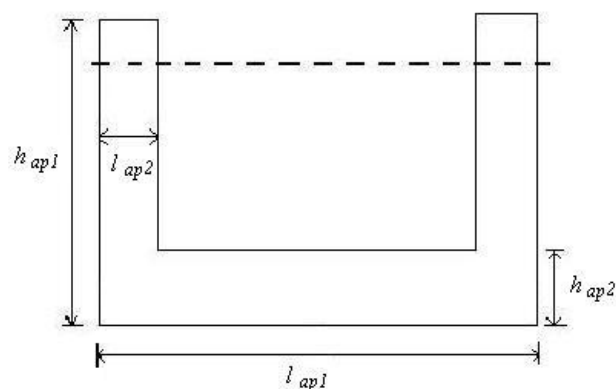


Figura 2.17 – Apoio Superior e Inferior do amortecedor/suspensão: vista frontal.

Verifica-se da figura 2.18 que a força aplicada na peça é distribuída de igual modo para as extremidades do veio de suporte do amortecedor ou suspensão, o qual estará sujeito a forças

de corte, devendo-se ter em atenção este pormenor do dimensionamento desse veio. Assim, a força aplicada em cada extremidade do veio (e nos furos deste apoio), é igual a:

$$F_{\text{furoAI}} = F_y / 2 \quad [2.24]$$

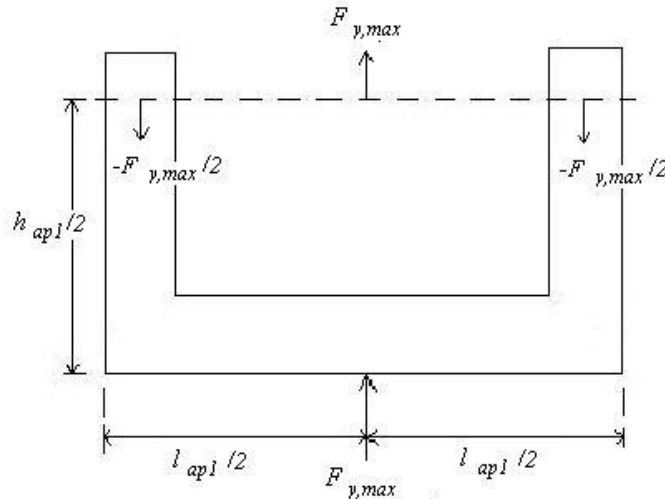


Figura 2.18 – Apoio do amortecedor: representação de forças.

Ou seja, a força máxima realizada em cada furo do apoio será igual a 6 [kN], considerando a força máxima aplicada na base do apoio igual a 12 [kN]. De referir que o apoio representado na figura 2.18 é o apoio inferior, bem como a expressão 2.24 é referente ao mesmo apoio, mas ambas se aplicam aos dois apoios (inferior e superior) de suspensão e amortecedor.

Em relação ao veio que passa nos furos do apoio, este irá também passar no furo do amortecedor (ou suspensão), unindo-os, de modo a que o movimento do apoio (neste caso, inferior) seja transmitido ao equipamento que esteja a ser ensaiado (ou amortecedor, ou suspensão). Não só o movimento é transmitido, mas também a força realizada pelo motor, que é transmitida pelo sistema mecânico, é imposta ao amortecedor através deste veio. Assim, torna-se necessário avaliar as forças e momentos que estão envolvidas no veio.

A força será transmitida ao amortecedor no ponto de contacto com este, ou seja, no centro do veio, tanto no apoio superior como no apoio inferior. Na prática, este veio tem somente uma extremidade roscada, através da qual será apertado ao apoio, ficando a outra extremidade somente apoiada. Assim, para determinar as forças envolvidas, numa primeira abordagem, considera-se o veio como sendo uma barra simplesmente apoiada, como representado na figura 2.19.

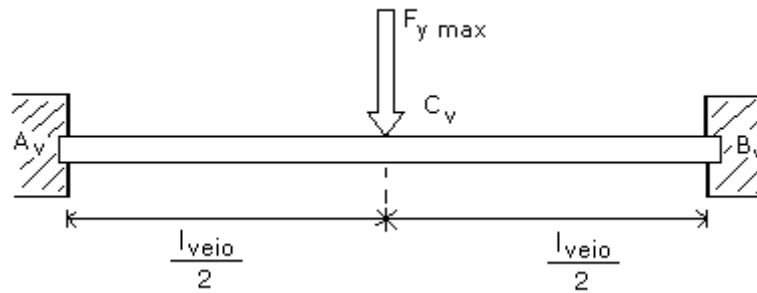


Figura 2.19 – Veio (parafuso) de união do amortecedor ao apoio: caso simplesmente apoiado.

Os pontos A_v e B_v representam os pontos onde o veio está ligado ao apoio, e o ponto C_v representa o ponto onde a força é aplicada no amortecedor, considerando-se a força máxima.

Então, em primeiro lugar determinam-se as reacções nos apoios, a partir do diagrama de corpo livre da barra completa, sendo a intensidade em cada reacção igual a metade da força máxima aplicada no centro (figura 2.20 a).

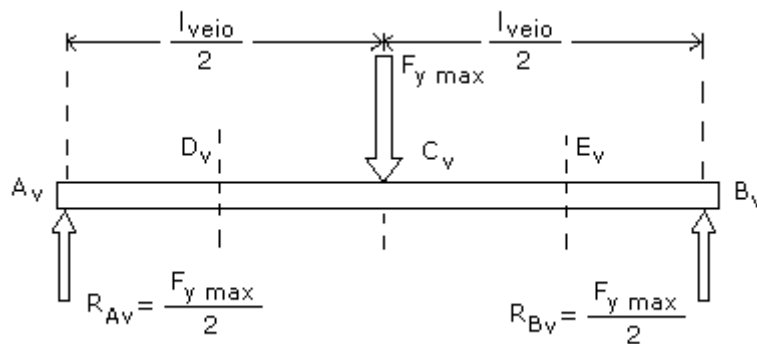


Figura 2.20a – Veio (parafuso) de união do amortecedor ao apoio: diagrama de corpo livre.

Em seguida corta-se a viga num ponto D_v , entre A_v e C_v , e desenha-se o diagrama de corpo livre (DCL) de $A_v D_v$ e $D_v B_v$, como indicado na figura 2.20 b.

Considerando que o esforço transversal e o momento flector são positivos, orientam-se as forças internas V_v e V'_v e os momentos internos M_v e M'_v como recomendado em [4]. Considerando o DCL de $A_v D_v$, e que a soma das componentes verticais e a soma dos momentos em torno de D_v das forças que actuam no DCL são zero, obtêm-se:

$$V_v = \frac{F_{y,max}}{2} \quad [2.25]$$

$$M_v = \frac{F_{y,max} \cdot x}{2} \quad [2.26]$$

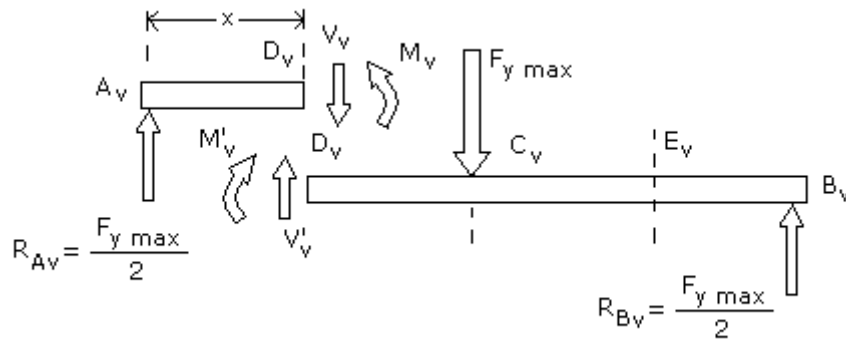


Figura 2.20b – Veio (parafuso) de união do amortecedor ao apoio: diagrama de corpo livre de AD e DB.

Por conseguinte, tanto o esforço transversal como o momento flector são positivos, o que é confirmado observando que a reacção em A_v tende a cortar e flectir a viga em D_v .

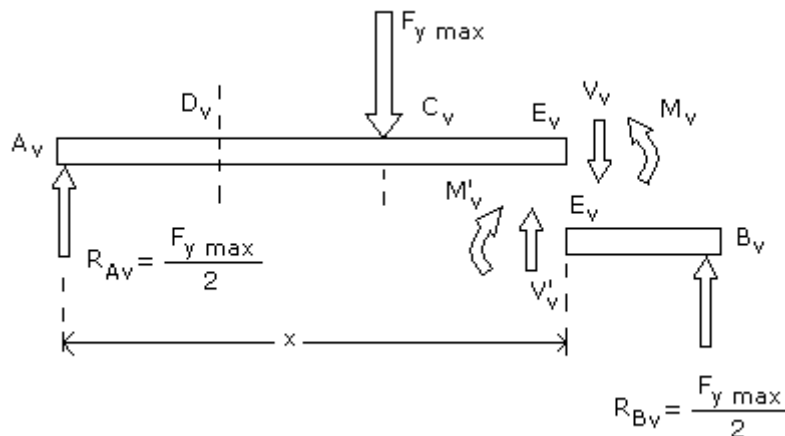


Figura 2.20c – Veio (parafuso) de união do amortecedor ao apoio: diagrama de corpo livre de AE e EB.

Analisando agora a viga considerando um corte feito num ponto E_v , entre C_v e B_v , e considerando o DCL $E_v B_v$ (figura 2.20c), obtém-se que a soma das componentes verticais e a soma dos momentos em torno de E_v das foras que actuam sobre o corpo livre são 0, obtém-se:

$$V_v = \frac{-F_{y,max}}{2} \quad [2.27]$$

$$M_v = \frac{F_{y,max} \cdot (l_{BS} - x)}{2} \quad [2.28]$$

Assim, o esforço transversal é negativo e o momento flector positivo, o que pode ser confirmado observando que a reacção em B_v flecte a viga em E_v .

Podem agora representar-se graficamente os diagramas de esforço transversal e de momento flector, tendo o esforço transversal valores constante, positivos entre A_v e C_v , e negativos entre C_v e B_v , enquanto o momento flector aumenta linearmente entre A_v e C_v , de zero até $F_{y,max} \cdot l_{BS}/4$, em $x = l_{BS}/2$. Entre C_v e B_v , o momento flector diminui linearmente desde este valor até zero. As representações destes diagramas são apresentada nas figuras 2.20 *d* e 2.20 *e*.

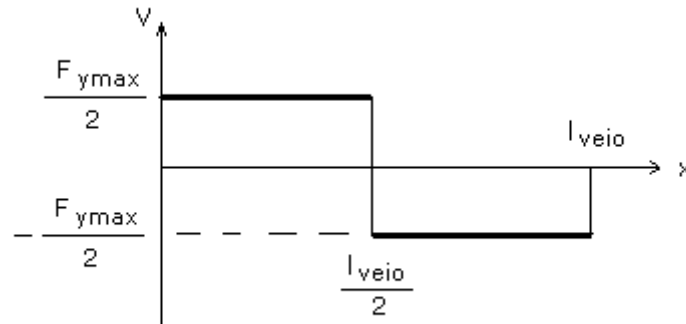


Figura 2.20d – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: diagrama do esforço transversal.

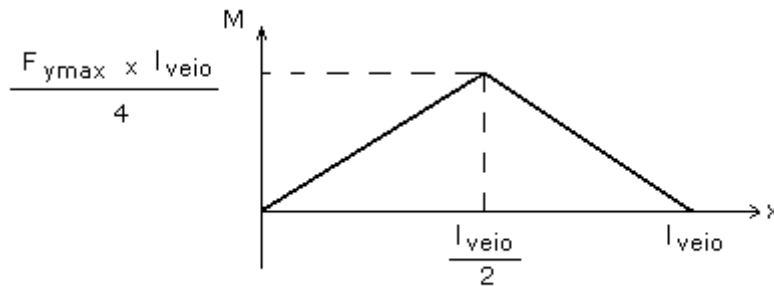


Figura 2.20e – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: diagrama do momento flector (análise para caso simplesmente apoiado).

Conclui-se assim que, devido ao esforço ser aplicado num só ponto, o esforço transversal é constante entre as secções onde estão aplicadas as cargas, enquanto que o momento flector varia linearmente entre essas mesmas secções. Isto claro, no caso de se considerar o a barra simplesmente apoiada, o que na prática não se verifica na totalidade. Analisando de seguida o caso de esta estar biencastrada, considere-se a figura 2.21 *a*. A análise é feita agora considerando um corte no centro, passando a ter-se neste caso uma força como representado na figura 2.21 *b*.

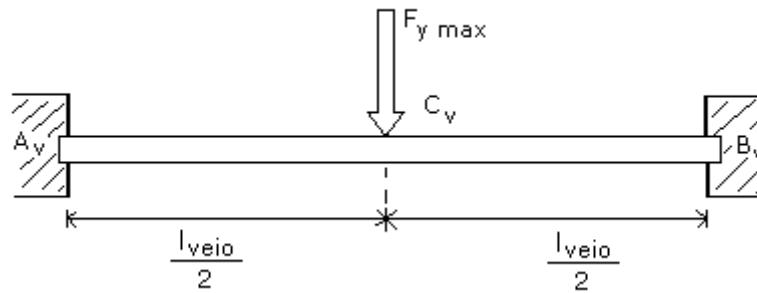


Figura 2.21a – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: caso biencastado.

Analisando as forças e momentos representados na figura 2.21 b, igualando $\theta=0$, tem-se que:

$$\frac{(F_{y,max}/2) \cdot (l_{BS}/2)^2}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{M' \cdot (l_{BS}/2)}{EI} = 0 \quad [2.29]$$

De onde se pode concluir que:

$$M'_v = \frac{F_{y,max} \cdot l_{BS}}{8} \quad [2.30]$$

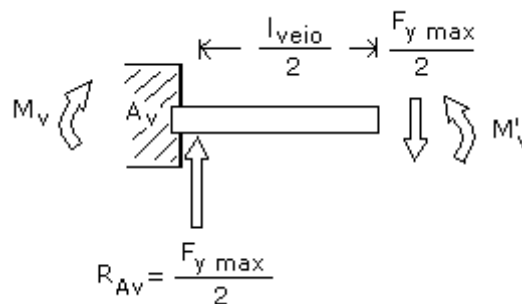


Figura 2.21b – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: diagrama de corpo livre de AC a CB.

Agora, fazendo a soma dos momentos, tem-se:

$$M_v = -\frac{F_{y,max}}{2} \times \frac{l_{BS}}{2} + M' \quad [2.31]$$

Substituindo a expressão [2.30] em [2.31], obtém-se:

$$M_v = -\frac{F_{y,max} \cdot l_{BS}}{8} \quad [2.32]$$

Partindo da análise feita no caso do veio de ligação ser considerando como uma barra simplesmente apoiada, a análise considerando este como uma barra biencastada é

semelhante, pelo que se irá obter para esta análise um diagrama do momento flector como o apresentado na figura 2.21c.

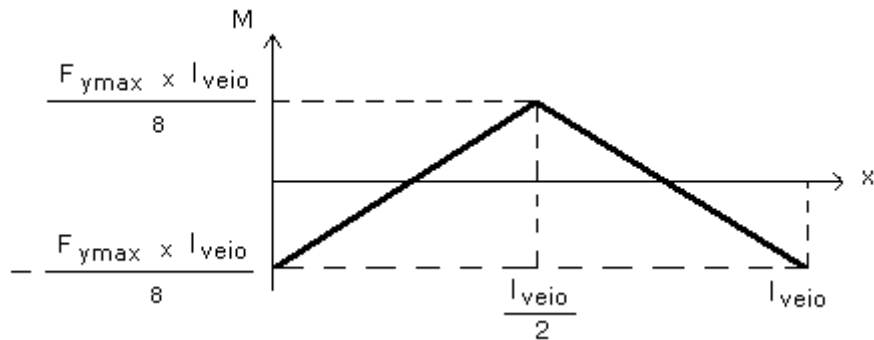


Figura 2.21c – Veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio: diagrama do momento flector (análise para barra biencastada).

Então, para obter o diagrama do momento flector real deste veio (parafuso) de ligação do amortecedor ao apoio, devem-se sobrepor os dois diagramas de momento flector apresentados em 2.20e e 2.21c, visto o veio se encontrar num estado entre biencastado e simplesmente apoiado, obtendo-se o diagrama do momento flector apresentado na figura 2.22.

O valor mínimo do gráfico final (para $x = 0$ e $x = l_{\text{veio}}$) é igual a $-(F_{y\max} \times l_{\text{veio}}) / 16$, e o valor máximo (em $x = l_{\text{veio}}/2$) é igual a $3 \times (F_{y\max} \times l_{\text{veio}}) / 16$, como apresentado na figura 2.23.

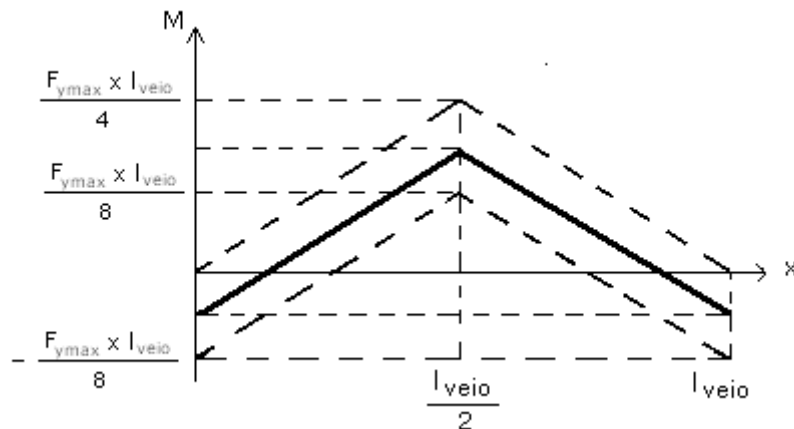


Figura 2.22 – Veio de ligação do amortecedor ao apoio: obtenção do diagrama final do momento flector.

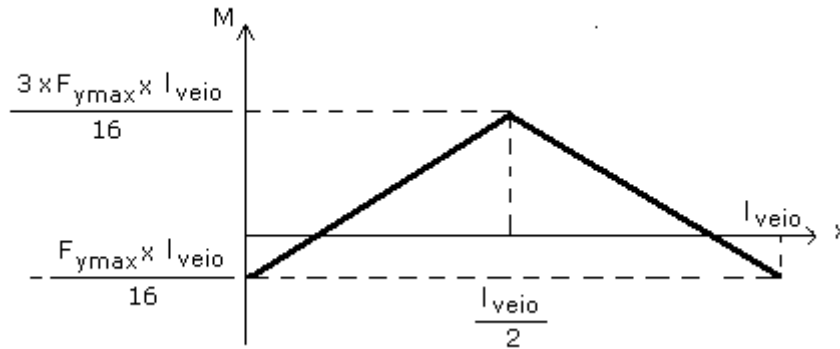


Figura 2.23 – Veio de ligação do amortecedor ao apoio: apresentação do diagrama final do momento flector.

2.3. Alteração da Posição do Redutor

Com a utilização da máquina desenvolvida verificou-se que, para velocidades de rotação do motor mais elevadas (frequências acima dos 80 [Hz]), a máquina vibrava ligeiramente. A principal causa destas vibrações está relacionada à distância entre o redutor, que exerce forças sobre a estrutura, e o excêntrico, que exerce forças sobre a biela, que por sua vez as transmite ao amortecedor. Esta distância deve-se ao facto de ter sido introduzido um sistema de ligação ao *encoder*, o qual se verificou não ser fundamental ao funcionamento da máquina. Assim, retirando este componente electrónico da máquina de ensaio de amortecedores, e fazendo o controlo da posição do excêntrico de forma computacional (através de um novo programa do microcontrolador), a posição do redutor pode ser alterada, colocando-se este componente mecânico directamente ligado ao excêntrico. Assim, vista a sua ligação à estrutura da máquina de uma posição superior (figura 2.24), e comparando com a figura 2.14, relativa à posição anterior do redutor, pode verificar-se que o redutor está apoiado numa zona central da base da estrutura, o que permite à priori dizer que as vibrações serão muito menores. Contudo, será feito de seguida o estudo das forças e momentos em cada um dos pontos de ligação do redutor com a estrutura, de modo a confirmar esta afirmação.

Em termos práticos, a distância entre os parafusos A/B e o excêntrico (d_{E-AB}) passa a ser igual a 150 [mm] (antes era de 350 [mm]), e a distância entre os parafusos C/D e o excêntrico passa a ser de 310 [mm] (antes era de 510 [mm]), ou seja, o redutor é colocado 200 [mm] mais à frente, em relação à posição anterior.

Partindo das expressões apresentadas em 2.2.2., recalculam-se as reacções em cada ponto de ligação do redutor com a base da estrutura, obtendo-se os seguintes valores:

- $R_B = 17850 [N]$;
- $R_A = 12950 [N]$;
- $R_D = -5850 [N]$;
- $R_C = -950 [N]$.

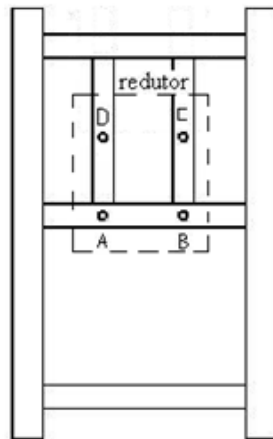


Figura 2.24 – Nova posição do redutor mecânico e ligações deste na base da estrutura (parafusos).

O valor mais elevado verifica-se novamente no apoio B, mas com a alteração da posição do redutor este valor é reduzido em 6800 [N], passando de 24650 [N] para 17850 [N]. Assim, recalculando o momento na zona do excêntrico, em relação aos parafusos CD (zona de apoio do redutor mais distante do excêntrico), este também passa de 6000 [N.m] para 3720 [N.m], o que permite concluir de uma forma mais precisa que as forças exercidas pelos apoios do redutor sobre a estrutura são muito menores com esta variação da posição, bem como o momento analisado.

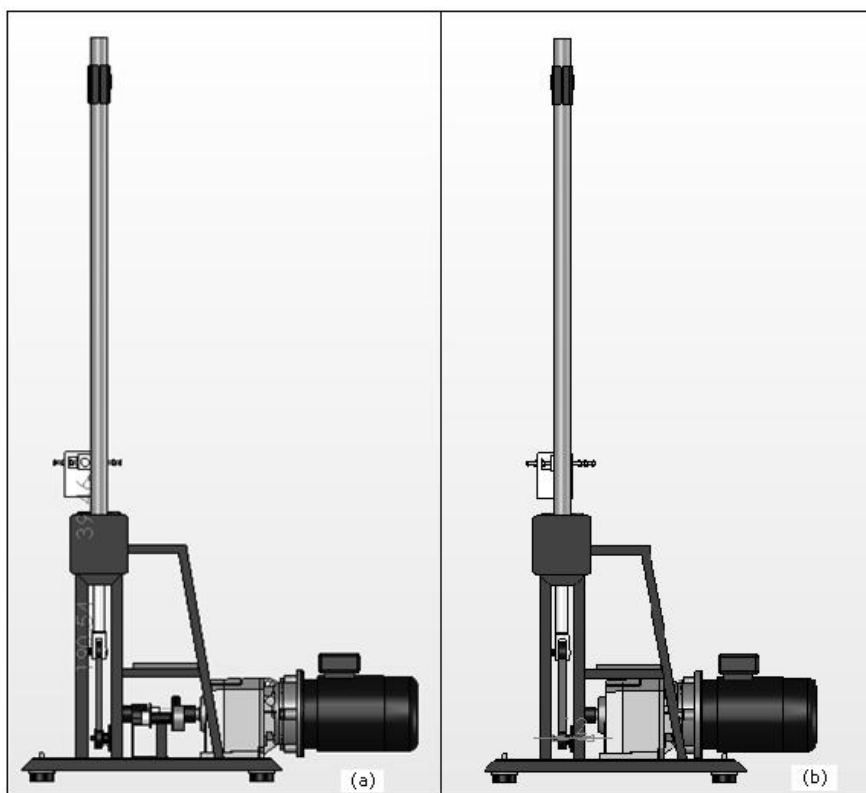


Figura 2.25 – Vista lateral da máquina (a) antes da alteração da posição do redutor, e (b) após removido o encoder e alterada a posição do redutor.

A figura 2.25 mostra a máquina de ensaio de amortecedores após alterada a posição do redutor, e removido o *encoder*, bem como todos os componentes que lhe estavam associados.

2.4. Novos Apoios para Amortecedor

Os apoios desenvolvidos no projecto da máquina de ensaio de amortecedores revelaram-se excelentes para o ensaio de suspensões de motas, mas não satisfatórios a 100% no ensaio de amortecedores. Isto porque, para permitir o aperto de suspensões, tiveram de ficar com uma largura que se mostrou ser demasiado elevada para os amortecedores, fazendo com que o parafuso de ligação entre o apoio e o amortecedor fosse demasiado comprido, criando momentos muito elevados no seu centro.

Assim, pretende-se nesta fase estudar um novo tipo de apoios, específicos para o ensaio de amortecedores. Como as ligações do amortecedor são muito mais pequenas do que as das suspensões, comece-se por se estudar estas ligações. Na figura 2.26 está representado um amortecedor, podendo-se identificar claramente as suas duas zonas de ligação, sendo a superior representada por 1 e a inferior por 2. Analisando amortecedores típicos disponíveis no mercado, verifica-se que o comprimento l_{am1} tem valores típicos até 25 [mm], e o comprimento l_{am2} até 45 [mm].

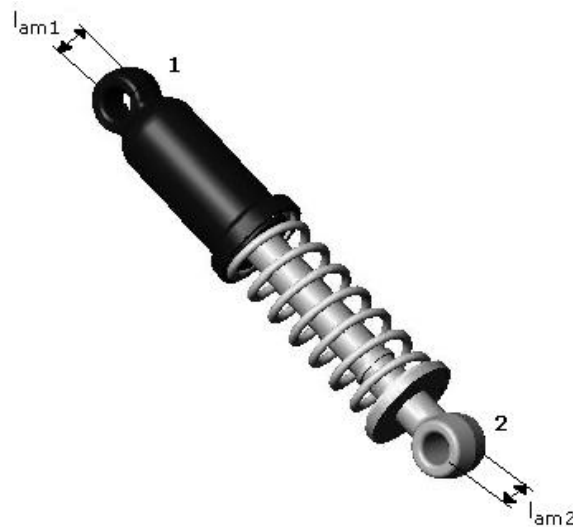


Figura 2.26 – Representação de um amortecedor, identificando as zonas de ligação deste com os apoios.

Com base nos valores apresentados, redimensionaram-se os apoios superior e inferior especificamente para ensaiar amortecedores, de modo a eliminar o problema dos elevados momentos no ponto de ligação do amortecedor. Assim, de seguida serão apresentados e estudados os novos apoios.

Começando pelo apoio superior, que está representado na figura 2.27, respeitando as dimensões máximas da zona de ligação do amortecedor, o apoio tem um formato em U, tendo

como dimensões interiores uma largura igual a 30 [mm], e uma altura igual a 40 [mm], de modo a dar alguma folga (a mínima possível) na zona de ligação do amortecedor.

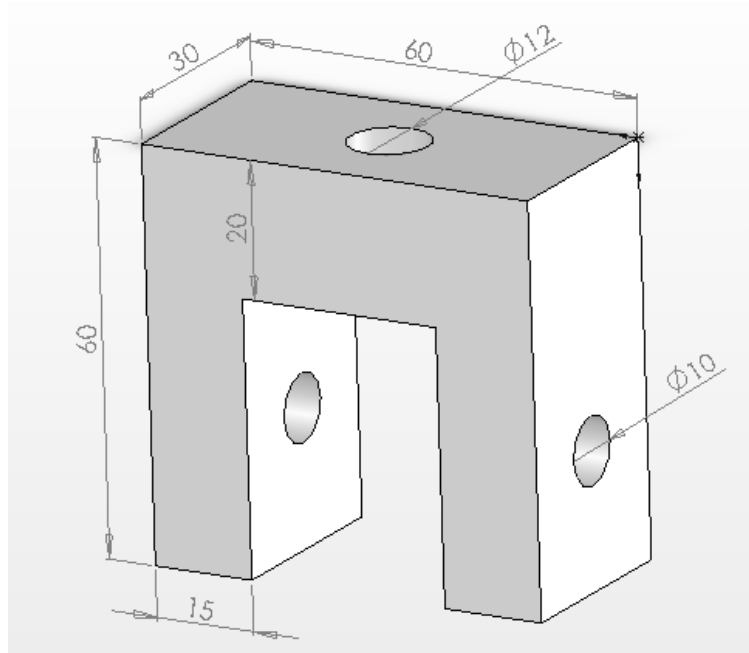


Figura 2.27 – Representação do novo apoio superior, específico para ensaiar amortecedores.

Os furos por onde passa o veio (parafuso de ligação) têm um diâmetro de 10 [mm], pois é este o furo universal dos amortecedores, resolvendo assim um problema de compatibilidades que iria existir se o diâmetro dos furos variasse significativamente de amortecedor para amortecedor. Estes estão feitos ao centro da parede lateral do apoio (desprezando a base deste), de modo a maximizar a área da parede na zona do furo, aproveitando ao máximo a resistência do material. A ligação deste apoio à célula de carga é feita através de um parafuso M12, tendo assim um furo de 12 [mm] na sua base (também ao centro), de modo a realizar a respectiva ligação. As dimensões da peça são apresentadas na figura 2.26, tendo esta um comprimento de 60 [mm], uma altura também de 60 [mm] e uma largura de 30 [mm].

As espessuras da peça (15 [mm] nas paredes verticais e 20 [mm] na base), foram atribuídas de modo a que a peça tenha resistência e rigidez suficiente para suportar as forças aplicadas sobre ela. Para confirmar que este apoio suporta as forças e tensões a que estará sujeito, deve-se calcular a tensão de corte, a tensão nominal (à flexão) e a tensão máxima, no ponto de aplicação da força. A tensão de corte nesta zona é igual a:

$$\tau = \frac{3}{2} \times \frac{F_{y\max}}{l_{AS} \times h_{ebAS}} = \frac{3}{2} \times \frac{12000}{60 \times 20} = 15 \text{ [MPa]} \quad [2.33]$$

Calculando à flexão, o momento será igual a 180 [N.m], sendo assim a tensão nominal igual a 45 [MPa]. Desta forma, e considerando um factor de concentração de tensões igual a 3, tem-se que a tensão máxima é igual a:

$$\sigma_{max} = \sigma_{nom} \times k_t = 45 \times 3 = 135 \text{ [MPa]} \quad [2.34]$$

Como estes valores estão abaixo dos valores das tensões de cedência e admissível do material (aço S355: tensão de cedência igual a 355 [MPa], tensão de corte igual a 205 [MPa]), considera-se que este suporta todas as forças nele aplicadas.

Quanto aos furos deste apoio, onde passará o parafuso de ligação com o amortecedor, e que têm um diâmetro de 10 [mm], para as dimensões destes e da parede onde são feitos, a tensão de cedência é igual a 15 [MPa], o momento flector máximo é igual a 120 [N.m], e a tensão máxima, considerando novamente um factor de concentração de tensões igual a 3, será igual a 240 [MPa]. Novamente se verifica que todos estes valores estão abaixo dos valores de cedência do aço seleccionado, pelo que toda a peça está bem dimensionada.

Estudando agora o parafuso que efectua a ligação do amortecedor com o apoio superior, a análise é feita tal como apresentado em 2.2.3. Para o apoio desenvolvido anteriormente, o momento máximo era igual a 360 [N.m] (considerando já o caso entre apoio simplesmente apoiado e apoio biencastado). Recalculando este momento para as novas dimensões do apoio, e conseqüentemente, do novo parafuso de ligação, o valor máximo será igual a 135 [N.m], ou seja, quase 3 vezes inferior ao momento máximo calculado para o parafuso do apoio anterior.

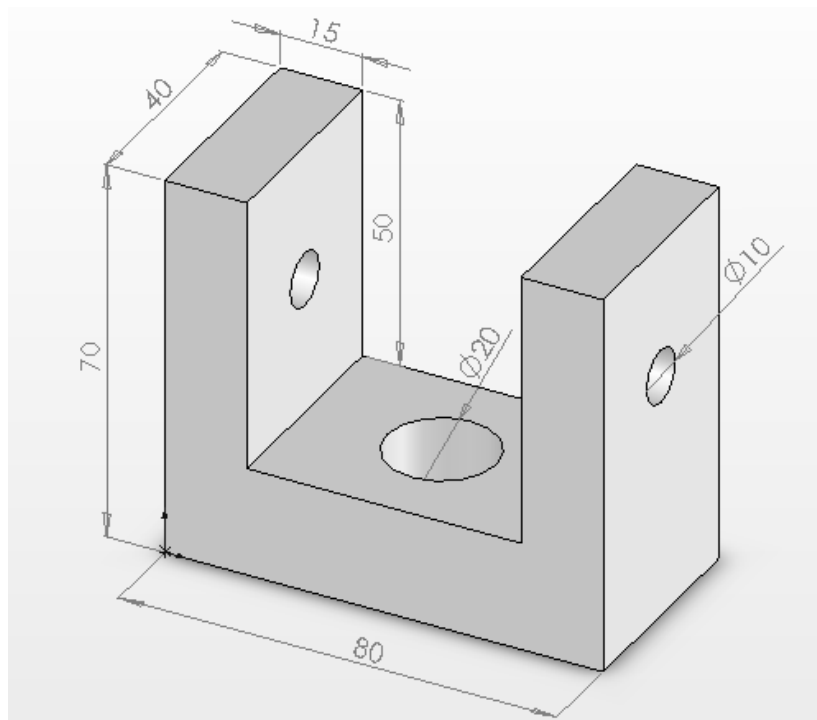


Figura 2.28 – Representação do novo apoio inferior, específico para ensaiar amortecedores.

Passando ao estudo do apoio inferior para o amortecedor, que está representado na figura 2.28, respeitando novamente as dimensões máximas da zona de ligação do amortecedor, o apoio tem um formato em U, tendo como dimensões interiores uma largura igual a 50 [mm], e uma altura também igual a 50 [mm], de modo a dar alguma folga (a mínima possível) na zona de ligação do amortecedor.

Os furos por onde passa o parafuso de ligação têm novamente um furo de 10 [mm], pelos motivos já apontados anteriormente, sendo feitos ao centro da parede lateral do apoio (desprezando a base deste apoio). A ligação deste apoio à biela superior é feita através de um parafuso M20, tendo assim um furo de 20 [mm] na sua base, também ao centro. As dimensões da peça são apresentadas na figura 2.27, tendo esta um comprimento de 80 [mm], uma altura de 70 [mm] e uma largura de 40 [mm].

As espessuras deste apoio são iguais às do apoio superior, ou seja, 15 [mm] nas paredes verticais, e 20 [mm] na base, e para confirmar que suporta as forças e tensões a que estará sujeito, será calculada a tensão de corte, a tensão nominal (à flexão) e a tensão máxima, no ponto de aplicação da força. A tensão de corte nesta zona é dada por:

$$\tau = \frac{3}{2} \times \frac{F_{y\max}}{l_{AI} \times h_{e\text{bAI}}} = \frac{3}{2} \times \frac{12000}{80 \times 20} = 11,25 \text{ [MPa]} \quad [2.35]$$

Calculando à flexão, o momento será igual a 240 [N.m], sendo assim a tensão nominal igual a 40 [MPa]. Desta forma, e considerando um factor de concentração de tensões igual a 3, tem-se que a tensão máxima é igual a:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{nom}} \times k_t = 40 \times 3 = 120 \text{ [MPa]} \quad [2.36]$$

Como estes valores estão abaixo dos valores das tensões de cedência e admissível do material seleccionado (aço S355), considera-se que este suporta todas as forças nele aplicadas.

Quanto aos furos deste apoio, onde passará o parafuso de ligação com o amortecedor, e que têm um diâmetro de 10 [mm], para as dimensões destes e da parede onde são feitos, a tensão de cedência é igual a 12 [MPa], o momento flector máximo é igual a 150 [N.m], e a tensão máxima será novamente igual a 240 [MPa], para um factor de concentração de tensões igual a 3. Novamente se verifica que todos estes valores estão abaixo dos valores de cedência do aço seleccionado, pelo que toda a peça está bem dimensionada.

Estudando o parafuso que efectua a ligação do amortecedor com o apoio inferior, tal como para o apoio superior, a análise feita é apresentada em 2.2.3. Para o apoio desenvolvido anteriormente, o momento máximo era igual a 360 [N.m]. Recalculando este momento para as novas dimensões do apoio, logo, do novo parafuso de ligação, o valor máximo será igual a 180 [N.m], ou seja, duas vezes inferior ao momento máximo calculado para o parafuso do apoio anterior.

2.5. Nota Conclusiva

Após realizadas as alterações pretendidas ao projecto mecânico, pode-se concluir que a máquina está pronta a ensaiar amortecedores de uma forma mais adequada e com uma maior estabilidade, tanto na estrutura, como nos próprios apoios.

Do estudo realizado à nova posição do redutor, conclui-se que os momentos que provocavam as vibrações da estrutura da máquina a velocidades de rotação do motor mais elevadas foram significativamente reduzidos, conseguindo-se deste modo evitar a vibração da máquina, permitindo assim realizar os ensaios com uma maior segurança. Para tal foi necessário remover todo o sistema de ligação com o *encoder*. Deste modo, caso se pretenda utilizar este equipamento electrónico, tal só é possível se o seu furo tiver um diâmetro que o permita ligar à coroa do excêntrico, ou na ligação do excêntrico com a biela. De qualquer forma, o objectivo é remover este componente da máquina, controlando a posição com o sensor colocado no excêntrico e o novo programa a desenvolver para o microcontrolador. Isto será abordado nos capítulos 4 e 5, respectivamente.

Os novos apoios projectados para os amortecedores, permitem o ensaio destes componentes sem o problema das vibrações na zona de ligação, e apresentam ainda a vantagem de ser muito mais leves em relação aos anteriores. Isto porque os apoios desenvolvidos anteriormente foram projectados para o ensaio de suspensões, e adaptados ao ensaio de amortecedores. Estes apoios apresentam novamente a vantagem da sua universalidade, ou seja, foram projectados para permitir ensaiar a generalidade dos amortecedores existentes no mercado.

Referências

- [1] C. Moura Branco, *et al*, “Projecto de Órgãos de Máquinas,” *Fundação Calouste Gulbenkian*, Lisboa – Portugal, 2005.
- [2] F. Duarte, “Máquina para ensaio de amortecedores,” Universidade da Beira Interior, Covilhã – Portugal, 2007.
- [3] P. Haney, “Shock Dynamometer: where the graphs come from,” *Roehrig Engineering, Inc*, High Point – Estados Unidos da América, 2004.
- [4] F. P. Beer, E. R. Johnston Jr., and J. T. DeWolf, “Mecânica dos Materiais,” 3ª Edição, *McGrawHill*, Lisboa – Portugal, 2003.

Capítulo

3

Análise de Perturbações e Ruído em Sistemas Electromecânicos

A maioria dos equipamentos de potência geram ruído e induzem perturbações, que caso não sejam previstas e tratadas, degradam os sinais dos circuitos de controlo, situação verificada com a utilização da máquina de ensaio de amortecedores. Assim, é feita uma análise às perturbações e ruído existentes em sistemas electromecânicos, com particular atenção aos existentes na máquina em desenvolvimento.

3.1. As Perturbações Electrónicas

As perturbações electrónicas são as tensões ou as correntes variáveis e indesejáveis que se sobrepõem ao sinal útil, produzidas ou impostas por um dado aparelho. Contrariamente ao ruído de fundo, que é uma característica própria de todos os circuitos, as perturbações electrónicas são transferidas pela ligação inoportuna de um circuito que é a sua fonte junto do circuito afectado.

As perturbações são susceptíveis de degradar a informação transmitida por um sinal útil e de provocar comandos inoportunos nos circuitos de controlo devido ao elevado nível do sinal. Estas situações ocorrem principalmente na parte inicial de uma cadeia de aquisição (ao nível dos sensores, seus condicionadores e amplificadores), pelo que todos os dispositivos devem ser estudados de modo a serem minimizados os efeitos das perturbações dos diversos tipos.

A importância das perturbações que afectam um circuito depende:

- da natureza e da intensidade dos fenómenos eléctricos da sua fonte;
- da influência que a fonte pode exercer no circuito;
- das características eléctricas do circuito perturbado.

As perturbações induzidas nos circuitos não são inevitáveis; pelo contrário, existem vários métodos de minimizar os seus efeitos, ou até mesmo de os suprimir, agindo-se dos seguintes modos:

- actuar sobre a fonte, sempre que possível, de modo a suprimir ou limitar os fenómenos na origem das perturbações;
- actuar sobre a ligação que existe entre a fonte e o circuito, de modo a anular ou reduzir a influência da perturbação;
- actuar no circuito afectado, de modo a minimizar a sensibilidade do sinal às perturbações.

3.1.1. Fontes de perturbações

Uma fonte de perturbações é um dispositivo ou um aparelho eléctrico que, em funcionamento, produz no meio envolvente um campo eléctrico e/ou um campo magnético variáveis. Esses campos propagam-se a partir da fonte, tanto por radiação, como pelos fios condutores.

A importância das perturbações surgirem num circuito é tão importante como os campos eléctricos e/ou magnéticos que se desenvolvem na sua fonte. Assim, consideram-se como potenciais fontes de perturbações:

- os circuitos de potência, que são a base das tensões e/ou das correntes variáveis importantes;
- os circuitos de comutação, onde se produzem as variações bruscas de correntes e de tensões.

Num mesmo circuito pode acontecer que haja um circuito de potência e um circuito de comutação, aumentando os riscos de aparecimento de perturbações.

Os circuitos de potência englobam:

- as linhas de transporte de energia;
- as aparelhagens eléctricas que são constituídas por transformadores, motores, geradores, emissores de radiação, etc.

Os circuitos de comutação são caracterizados pelas fases alternadas de bloqueio e condução de alguns dos seus componentes: circuitos numéricos, osciladores de relaxação, circuitos de relés, etc.

As fontes de perturbações anteriormente indicadas tanto se podem encontrar em equipamentos industriais como em equipamentos domésticos. De referir que em ambos os casos há dois fenómenos naturais susceptíveis de gerar as perturbações: a descarga electrostática e a trovoadas.

3.1.2. Modos de transferência

A transferência da perturbação do dispositivo fonte para o circuito que irá afectar acontece do seguinte modo:

- condução da perturbação ao longo dos condutores comuns à fonte e ao circuito: trata-se de um acoplamento galvânico;
- radiação a partir da fonte para o espaço envolvente, onde se inclui o circuito afectado: o acoplamento é electromagnético.

No caso de uma ligação electromagnética, o que acontece é uma onda electromagnética que é emitida pelo dispositivo perturbador, e recebida pelo circuito perturbado, que provoca o aparecimento de correntes e tensões parasitas.

Uma onda electromagnética é definida pela associação de um campo eléctrico E e um campo magnético H que se propagam. As amplitudes de E e H dependem da natureza da fonte e das correntes e tensões do circuito electrónico. Os campos variam no tempo a uma frequência f dos fenómenos eléctricos na fonte e variam no espaço, em função da razão d/λ onde d é a distância até à fonte e λ o comprimento, com: $\lambda = c/f$, sendo $c = 3 \times 10^8$ [m/s].

3.1.3. Espectros de frequências

A natureza dos fenómenos eléctricos que estão na origem das perturbações, e em particular a sua velocidade de variação, determina uma das características mais importantes que é o espectro de frequências. O conhecimento deste espectro é fundamental, devido aos meios de protecção a aplicar dependerem dele.

3.1.3.1. Tipos de espectros

Dividam-se, do ponto de vista do seu espectro, as tensões ou correntes perturbadoras em dois grupos:

- as perturbações de espectro estreito;
- as perturbações de espectro alargado.

Perturbações de espectro estreito

Estas perturbações podem ter origem em:

- dispositivos alimentados pelo sector produtor de perturbações a 50 [Hz] e suas harmónicas: 100 [Hz], 150 [Hz], etc.;
- oscilador sinusoidal;
- emissor de radiação ou um radar, com frequências de 500 [kHz] a 100 [GHz].

Perturbações de espectro alargado

No caso dos circuitos funcionarem em comutação, as tensões ou correntes produzidas são os impulsos. Quando estes impulsos são periódicos, o seu espectro é um espectro de linhas cujas frequências são múltiplas da frequência f dos impulsos, e cujas amplitudes resultam do desenvolvimento em série de *Fourier*.

Seja $a(t)$ a equação temporal dos impulsos. Se, por uma escolha apropriada da origem dos tempos, $a(t)$ for uma função par, pode-se escrever:

$$a(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos \omega t + a_2 \cdot \cos 2\omega t + \dots + a_n \cdot \cos n\omega t + \dots \quad [3.1]$$

Onde:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} a(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} a(t) \cos n\omega t dt, \quad \omega = 2\pi f$$

Se por uma escolha conveniente da origem dos tempos $a(t)$ for uma função ímpar, tem-se:

$$a(t) = a_1 \cdot \sin \omega t + a_2 \cdot \sin 2\omega t + \dots + a_n \cdot \sin n\omega t + \dots \quad [3.2]$$

Onde:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} a(t) \sin n\omega t dt, \quad \omega = 2\pi f$$

Quando os impulsos não são periódicos, o seu espectro é um espectro contínuo dado pela transformada de Fourier:

$$a(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad [3.3]$$

Onde

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$$

3.1.3.2. Espectro de perturbações, banda passante e não linearidade dos circuitos

A influência das perturbações num circuito depende da posição do seu espectro em relação à banda passante do circuito. Os circuitos de aquisição de dados são geralmente circuitos passa-baixo, onde a banda passante é um filtro anti retenção. Distinguem-se dois casos:

- uma fracção do espectro da perturbação, ou a sua totalidade, é incluída na banda passante do circuito: é necessário usar todos os meios possíveis para reduzir a perturbação antes desta atingir o circuito: blindagem, filtragem da alimentação e das entradas e saídas;
- quando o espectro da perturbação está totalmente na banda atenuadora do circuito, não há em princípio nenhum problema na condição de que a atenuação da perturbação seja suficiente.

Contudo, se a perturbação é intensa e se o comportamento do circuito, antes da filtragem, dos elementos não lineares (diodos, junções base-emissor por transístores), dos fenómenos de correcção e de batimento podem induzir novas frequências de ruído na banda passante do circuito.

Um componente não linear pode ser modelado por uma relação entre a sua tensão de entrada v_i e a sua corrente de saída i_o da seguinte forma:

$$i_o = a \cdot v_i + b \cdot v_i^2 + c \cdot v_i^3 \quad [3.4]$$

Quando v_i é fraca, o que representa o caso para o sinal de medida, o componente é quase linear. Por outro lado, quando o sinal de medida, $v_m = V_m \cos \omega_m t$, é imposta uma perturbação intensa, $v_p = V_p \cos \omega_p t$, a tensão de entrada v_i do dispositivo não linear fica:

$$v_i = V_m \cdot \cos \omega_m \cdot t + V_p \cdot \cos \omega_p \cdot t \quad [3.5]$$

Onde $V_p \gg V_m$ e $f_p > f_m$

Para evitar o fenômeno de alteração da frequência da perturbação devido às não linearidades dos componentes, é necessário tirar todas as medições, de modo a que uma perturbação intensa seja posta fora da banda passante, e não possa entrar no circuito, através de blindagem e/ou filtragem.

3.1.4. Modo comum e modo série

No circuito perturbado, a sobreposição do ruído ao sinal útil ocorre de acordo com um de dois modos possíveis: modo comum e modo série [1].

Há uma *perturbação de modo comum* sempre que uma perturbação parece idêntica em cada um dos condutores do sinal; neste caso, a perturbação faz interferência somente em relação à referência, à massa por exemplo, a diferença de potencial que é o sinal (figura 3.1 a).

Há uma *perturbação diferencial ou de modo série* sempre que uma perturbação surge na forma de diferença de potencial entre os condutores do sinal: está em série com a fonte (origem) do sinal (figura 3.1 b).

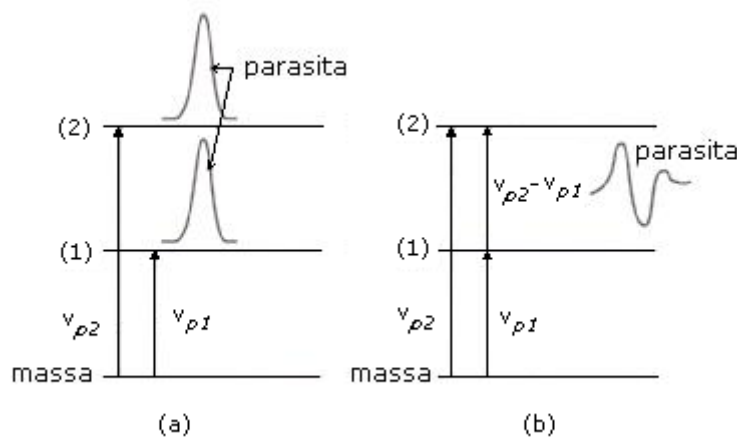


Figura 3.1 – Tipos de perturbações: a) perturbação de modo comum; b) perturbação de modo série.

Sendo dois condutores (1 e 2) sujeitos às tensões parasitas v_{p1} e v_{p2} em relação à sua referência, por definição:

- a tensão parasita de modo comum é:

$$v_{mc)p} = (v_{p1} + v_{p2})/2 \quad [3.6]$$

$$v_{mc)p} = v_p \text{ quando } v_{p1} = v_{p2} = v_p$$

- a tensão parasita diferencial ou do modo série é:

$$v_{d)p} = v_{p2} - v_{p1} \quad [3.7]$$

$$v_{d)p} = 0 \text{ quando } v_{p1} = v_{p2}$$

Concluindo, quando as perturbações são idênticas nos dois condutores do sinal, a perturbação é unicamente de modo comum. Quando as perturbações têm amplitudes diferentes em cada um dos condutores do sinal aparece, para além de uma tensão parasita de modo comum, uma perturbação do modo série.

No caso de um sinal útil ser sobreposto por uma perturbação de modo comum, um amplificador diferencial permite em princípio de se livrar da perturbação de modo comum e de não amplificar o sinal útil; na prática, o amplificador diferencial possui uma certa sensibilidade à tensão de modo comum que é especificada pela sua taxa de rejeição de modo comum.

A redução ou eliminação de uma perturbação em modo série é difícil: quando a sua frequência está bem definida, a perturbação pode ser reduzida ou eliminada pelo tratamento do sinal: filtragem ou integração durante um comprimento igual ao seu período ou a um dos seus múltiplos.

Resta referir finalmente que uma perturbação de modo comum pode dar origem a uma perturbação de modo série, quando as impedâncias associadas a ambos os condutores do sinal são diferentes. É por isto que é importante manter o equilíbrio de ambas as vias.

3.2. Perturbações por Ligação Galvânica

Há ligação galvânica quando um condutor comum está na origem da influência que exerce o dispositivo perturbador sobre o circuito perturbado. Vamos distinguir dois casos:

- o condutor comum é o suporte por onde se propagam as perturbações criadas pelo dispositivo perturbador;
- o condutor comum é a causa das tensões parasitas quando, percorrido pelas correntes provenientes dos dispositivos que lhe estão ligados, provoca pela sua impedância o aparecimento de tensões perturbadoras.

Por intermédio da rede, as perturbações podem atingir as alimentações dos dispositivos electrónicos e conseqüentemente, os seus diversos circuitos. A filtragem da tensão da rede, e de um modo geral de todas as linhas de entrada e saída de um dispositivo electrónico, é o meio de protecção mais eficaz. Quando por outro lado as perturbações têm uma amplitude tal que as sobretensões que estas provocam arriscam a induzir disfunções graves nos aparelhos por onde passam, o uso de dispositivos limitadores de tensão torna-se necessário.

Quanto aos fenómenos de influência devido à circulação de correntes nas impedâncias comuns a vários circuitos, as grandezas eléctricas num circuito podem depender de uma forma involuntária das correntes provenientes de outros circuitos. Um caso frequente de influência galvânica deste tipo aparece no condutor comum (linha de 0 [V], ou massa) quando serve de referência a vários dispositivos electrónicos. Este condutor é teoricamente equipotencial mas, de facto, a sua impedância não é nula, apresentando nos pontos de referência dos diversos dispositivos diferenças de potencial chamadas de massa que são funções de correntes que o percorrem, correntes provenientes dos dispositivos a que está ligado. A redução da impedância dos condutores de massa, por um lado, e uma organização criteriosa das ligações à massa por outro lado, permitem minimizar as diferenças de potencial da massa.

Por fim, o fenómeno da ligação galvânica pode aparecer sobre as linhas de alimentação de modo contínuo: a tensão aplicada a qualquer dispositivo depende das correntes de alimentação da montagem dos dispositivos. Uma variação brusca de uma das correntes, por consequência de uma comutação por exemplo, arrisca a provocar uma variação perturbadora da tensão de alimentação de um outro dispositivo. O uso de condensadores de desacoplamento cuidadosamente colocados entre as linhas de alimentação e a linha de 0 [V] permite filtrar e reduzir este tipo de perturbação.

3.2.1. Perturbações conduzidas – filtragem das linhas

Na cadeia de aquisição, uma filtragem das perturbações é normalmente assegurada por um filtro anti retorno em que a banda passante é limitada a um mínimo restrito imposto pelo espectro útil.

O problema aqui examinado refere-se às perturbações conduzidas pelo aparelho pelas suas diversas ligações aos dispositivos externos:

- linhas de entrada-saída como as ligações aos sensores, aos motores, ou a um controlador;
- linhas da rede de distribuição ligadas à alimentação.

Estas perturbações devem ser eliminadas mesmo à entrada do aparelho, de modo a evitar que, para diversas ligações, estas não sejam injectadas na cadeia de medição, onde a sua amplitude é importante, pois provocam certos fenómenos de não linearidades perturbadoras do sinal.

3.2.1.1. Tipos de filtros

A filtragem das perturbações no espectro estendido torna necessária a introdução de filtros passa-baixo, introduzidos de modo a que as frequências úteis estejam na banda passante e as frequências perturbadoras na banda atenuada.

Um filtro é um dispositivo bidireccional: pode ser utilizado para limitar a penetração das perturbações externas ao aparelho, ou para evitar a propagação de perturbações para fora do aparelho que as gera.

Os filtros são normalmente realizados à base de indutâncias e condensadores, separados ou associados em estruturas em L, T ou Π (figura 3.2). Quando as linhas a filtrar são percorridas por correntes muito fracas, as indutâncias podem ser substituídas por resistências.

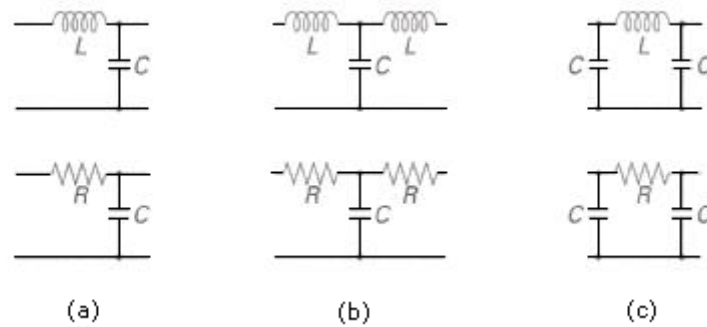


Figura 3.2 – Estruturas de filtros passa baixo passivos: a) em L; b) em T, c) em Π .

Quando a perturbação possui uma a frequência f_p perfeitamente determinada (50 Hz por exemplo), a sua redução pode ser obtida por meio de um filtro que rejeite a frequência f_p (figura 3.3). É importante de notar neste caso a atenuação suportada pelo filtro e que f_p não afecta o sinal útil.

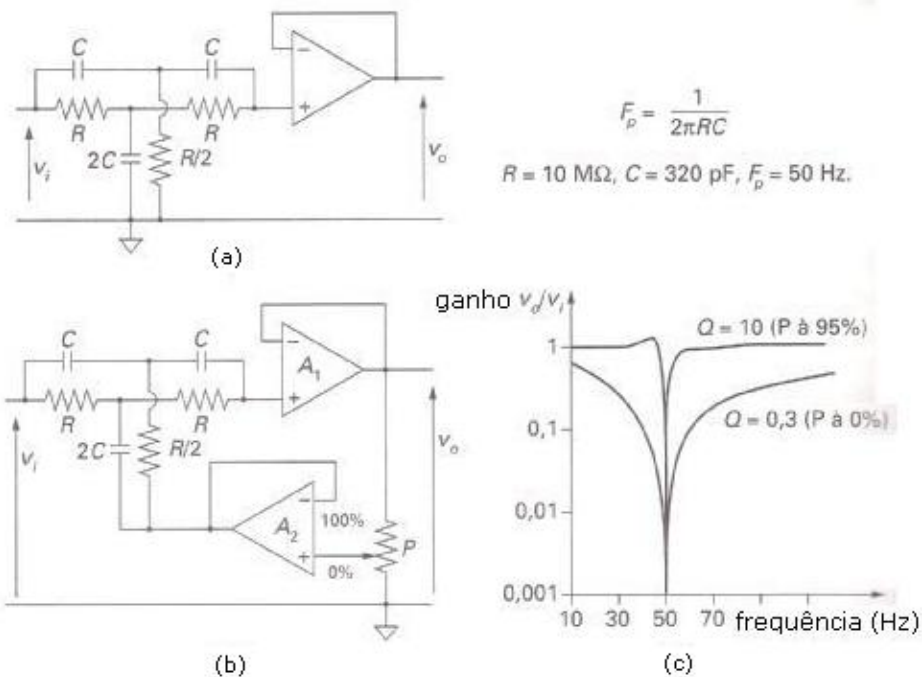


Figura 3.3 – Filtros de rejeição: a) célula de rejeição; b) célula de rejeição de banda regulável; c) resposta em frequência [1].

A eficácia de um filtro a uma frequência f é especificada pela sua atenuação de inserção $A(f)$, onde:

$$A(f) = 20 \lg \frac{V_1(f)}{V_2(f)} \quad [db] \quad [3.8]$$

$V_1(f)$ representa a amplitude da tensão aos terminais de uma carga de 50 [Ω], na ausência de filtro, a fonte de frequência f tem uma impedância interna de 50 [Ω]; $V_2(f)$ representa a amplitude da tensão aos bornes da mesma carga na presença do filtro, em que as outras condições operacionais se mantêm inalteradas. Os valores de $A(f)$ aquando da utilização de um filtro estão normalmente compreendidos entre 60 db (10^3) e 80 db (10^4).

3.2.1.2. Escolha dos componentes

Tendo em conta a importante extensão possível do espectro de perturbações, é necessário ter em consideração na escolha dos componentes do filtro os elementos perturbadores que condicionam o funcionamento nas altas-frequências.

Condensadores

O esquema equivalente de um condensador comporta, em particular, uma indutância parasita L_p que depende da introdução de “armaduras” e que é tão mais importante quanto maiores forem as suas ligações. Esta indutância de 5 a 150 [nH] é determinada com a capacitância C , e com a frequência de ressonância do condensador f_{oc} que é igual a $1/2\pi \cdot \sqrt{L_p C}$. É também importante limitar os comprimentos das ligações dos condensadores de filtragem de modo a manter as propriedades dos filtros satisfatórias nas altas frequências. Os condensadores “cruzados”, que são os elementos de filtragem na passagem de linhas de entrada-saída através de blindagem protectora de um aparelho, são caracterizados por uma indutância parasita mínima, uma frequência de ressonância própria superior a 1 [MHz].

Os condensadores de três pólos comportam duas ligações para uma das armaduras. Essas duas ligações fazem parte da linha a filtrar e apresentam duas vantagens: a indutância parasita da ligação linha-armadura é minimizada pois há contacto directo entre a linha e a armadura; e a indutância dessa ligação constitui com C um filtro em T melhorando a eficácia da filtragem.

Indutâncias

O esquema equivalente de uma bobine de indutância mostra, em paralelo, uma capacitância parasita C_p que determina, juntamente com a indutância L , a frequência de ressonância da bobine $f_{oL} = 1/2\pi \cdot \sqrt{LC_p}$ além da qual a impedância da bobine deve ser capacitiva; um exemplo da ordem de grandeza é $L=1 [mH]$, $f_{oL}=1 [MHz]$.

Por outro lado, as bobinas de indutância podem ser o sinal de forças electromotrizes parasitas induzidas pelos campos exteriores, ou serem a fonte de perturbações pela sua própria radiação. É por isto que o filtro deve ser introduzido no interior de uma blindagem.

3.2.1.3. Montagem dos filtros

Filtragem das linhas do sinal

Aquando da transmissão de um sinal diferencial vão-se distinguir três condutores: as duas linhas do sinal e o condutor de massa. Neste caso, a perturbação aparece:

- em modo comum, a diferença de potencial que lhe corresponde é idêntica entre todos os fios do sinal e a massa;
- e (ou) em modo diferencial, quando uma diferença de potencial parasita aparece entre as duas linhas do sinal.

A redução da perturbação em modo comum é normalmente assegurada pela taxa de rejeição do amplificador; uma atenuação suplementar por um filtro passa-baixo é obtido introduzindo o filtro entre qualquer linha do sinal e a massa. Tendo em conta a grande impedância de entrada do amplificador e os fracos valores de corrente que percorrem a linha, a indutância de filtragem pode ser substituída por uma resistência sem que isso resulte numa alteração do sinal (figura 3.4 a).

A perturbação em modo diferencial – provocada pelo desequilíbrio das impedâncias das linhas – pode ser reduzida por um filtro RC inserido entre as duas linhas de sinal, na entrada do amplificador (figura 3.4 b).

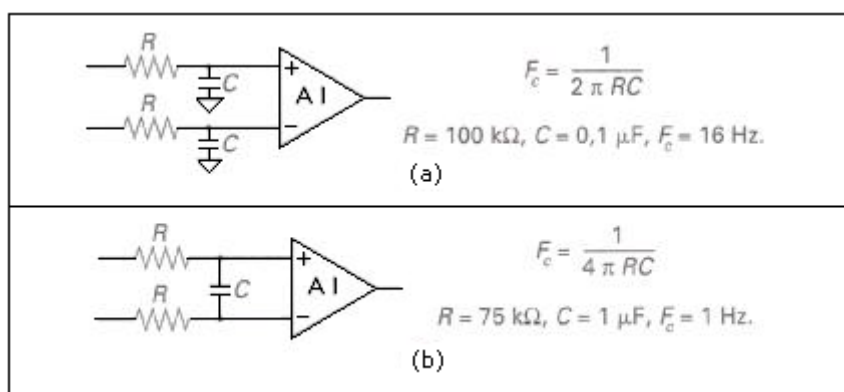


Figura 3.4 – Filtragem na entrada de um amplificador de instrumentação: a) filtragem de modo comum; b) filtragem de modo diferencial [1].

Filtragem das linhas da rede de distribuição

A rede de distribuição de energia eléctrica em sistemas monofásicos possui três linhas: uma fase, o neutro e a terra. Essas linhas são o suporte de propagação de perturbações de espectro muito estendido, podendo passar os 100 [MHz], e que são produzidas em particular pelos equipamentos ligados à rede. Essas perturbações podem aparecer:

- em modo comum quando a mesma diferença de potencial perturbadora é aplicada por um lado entre a fase e a terra, e por outro lado entre o neutro e a terra;
- em modo diferencial quando a diferença de potencial devido à perturbação é aplicada entre a fase e o neutro.

A redução destas perturbações efectua-se através de células de filtragem inseridas entre os condutores e elas sujeitos:

- fase e terra, neutro e terra para o modo comum (figura 3.5 a);
- fase e neutro para o modo diferencial (figura 3.5 b).

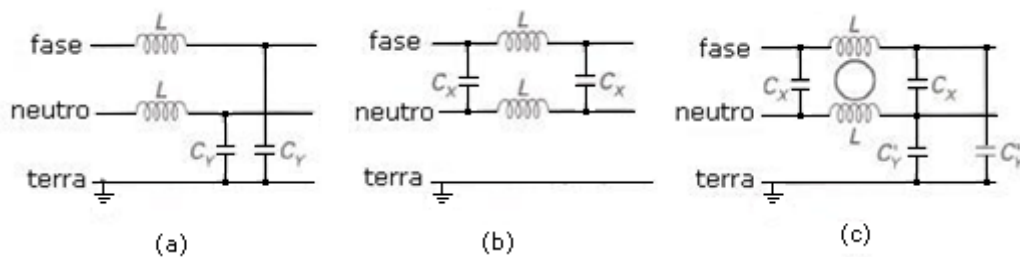


Figura 3.5 – Filtragem da tensão do sector: a) filtro de modo comum; b) filtro de modo diferencial; c) filtro combinado de modo comum e de modo diferencial utilizando uma bobine de fluxo.

As bobines de fluxo permitem uma combinação destes dois tipos de filtro num mesmo aparelho (figura 3.5 c). O elemento da base é um núcleo de ferrite sobre o qual são bobinados dois enrolamentos idênticos, mas deve-se ter atenção que:

- percorridos por uma corrente parasita de modo comum, os fluxos produzidos por esse enrolamento são somados, determinando um valor de indutância considerável ([mH]);
- percorridos por uma corrente parasita de modo diferencial, os fluxos subtraem-se, a indutância resultante é fraca ([μH]) evitando uma atenuação da corrente normal, a atenuação da perturbação resultante da acção da indutância residual e do condensador.

3.2.2. Sobretensões perturbadoras – limitadores de amplitude

Pela importância da sua amplitude, que em certos casos pode ultrapassar 10 vezes a tensão nominal do sector, certas perturbações podem provocar sobretensões prejudiciais nos equipamentos que estão sujeitos a estas. A protecção desses equipamentos pode ser

assegurada por limitadores de amplitude, capazes de dissipar a energia da sobretensão transitória mantendo nos bornes do equipamento uma tensão não prejudicial (figura 3.6). Os limitadores de amplitude são colocados por cima dos filtros e de modo a que a sua acção limitadora seja exercida sobre as sobretensões em modo diferencial ou em modo comum.

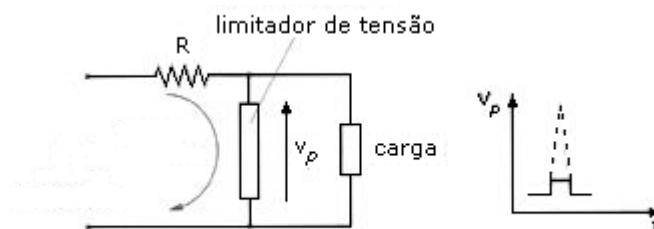


Figura 3.6 – Limitador de amplitude: princípio de utilização.

Existem três tipos principais de limitadores de amplitude: os *éclateurs*, os varistores e os díodos de avalanche.

Os *éclateurs* são tubos cheios com um gás inerte a baixa pressão, contendo dois eléctrodos sujeitos à tensão a limitar. Quando a tensão aos bornes é inferior à tensão desejada, o *éclateur* apresenta uma resistência muito elevada (> 10 [M Ω]); quando a tensão atinge o seu valor desejado (existem modelos desde 10 [V] até 100 [V]), estabelece-se um arco entre os eléctrodos e a tensão nos seus bornes decresce para um valor, característico do gás e da sua pressão, que é a tensão do arco (na ordem de 10 [V]), não estando limitada a corrente que para a impedância do circuito externo pode atingir valores transitórios muito elevados. Um inconveniente dos *éclateurs* é a sensibilidade da sua tensão desejada à velocidade de cruzamento da sobretensão. O *éclateur* tem três eléctrodos, estando qualquer um deles ligado a uma das linhas da rede de distribuição, limitando as sobretensões em modo comum e em modo diferencial.

Os varistores são resistências não lineares compostas por óxidos de zinco (ZnO). A sua característica tensão-corrente tem a forma:

$$V = k \cdot I^\beta \quad \text{onde } \beta \ll 1$$

As correntes máximas dos varistores são inferiores às dos *éclateurs*. Os tempos de resposta destas são muito curtos (nanosegundos) e não estão limitados pela indutância das ligações.

Os díodos de avalanche são díodos Zenner capazes de assegurar a descarga de uma corrente importante e são normalmente montados de cima para baixo para permitir uma limitação bipolar das sobretensões. Estes apresentam duas vantagens em relação aos varistores: uma velocidade de resposta mais elevada (10^{-11} s) e uma resistência em série mais fraca, limitando o cruzamento da tensão aos bornes quando as correntes transitórias são elevadas.

Do facto das suas características diferentes, mas complementares, há somente interesse em associar limitadores de amplitude de diversos tipos no caso de o *éclateur* a gás ou o varistor

terem como função dissipar a energia importante da sobretensão enquanto o díodo de avalanche ajusta muito rapidamente essa sobretensão.

3.2.3. Massa dos sinais – problemas e soluções

As tensões e correntes de polarização contínua necessárias ao funcionamento de um dispositivo electrónico são fornecidas pela fonte de alimentação que, normalmente, recebe a energia necessária da rede de distribuição. Com essa finalidade, a fonte de alimentação é colocada no secundário de um transformador, sendo o primário ligado à rede de distribuição. A fonte de alimentação em modo contínuo é assim isolada da rede: as tensões contínuas entregues são ligadas a um borne chamado de 0 [V] que é, à priori, flutuante. Essa saída 0 [V] é ligada ao condutor que serve de referência de potencial comum à montagem de sinais a tratar pelos circuitos ligados a essa alimentação: é por isso que esse condutor é definido por comum, massa do sinal ou massa electrónica.

3.2.3.1. Influência da diferença de potencial da massa

O condutor de massa distribui o potencial de referência para a montagem dos circuitos que por definição é equipotencial, sob pena de juntar aos sinais as quedas de tensão do qual é a origem. Na verdade, um condutor de massa nunca tem uma impedância nula, entre dois pontos distintos M_j e M_k , existindo uma diferença de potencial v_{Mjk} , chamada diferença de potencial da massa, devido à circulação na impedância de massa Z_{Mjk} , entre M_j e M_k , de uma corrente de massa i_{Mjk} que é a soma algébrica das correntes injectadas no condutor de massa pelos diferentes componentes que lhe são ligados (figura 3.7).

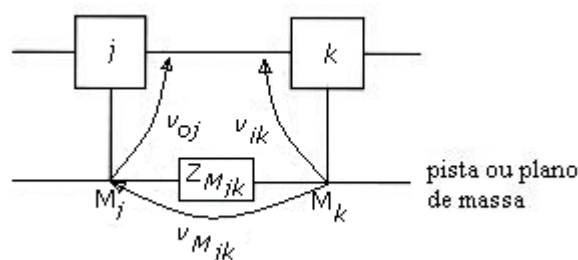


Figura 3.7 – Influência sobre os sinais da diferença de potencial da massa, quando os componentes são ligados em série sobre o condutor de referência.

Com base na figura 3.7, pode-se verificar que a tensão de entrada v_{ik} do dispositivo k tem a expressão:

$$v_{ik} = v_{Mjk} + v_{oj} \quad [3.9]$$

Onde $v_{Mjk} = Z_{Mjk} \cdot i_{Mjk}$ é a diferença de potencial da massa, e $v_{o,j}$ é a tensão de saída do dispositivo anterior.

A impedância do condutor de massa tem a expressão:

$$Z_M = R_M + jL_M\omega \quad [3.10]$$

A resistência R_M é preponderante a baixas frequências (abaixo de 10 kHz) e o seu valor óhmico é determinado pela resistividade do condutor e as suas dimensões geométricas. Esta resistência aumenta com a frequência. A indutância L_M é proporcional ao fluxo magnético que atravessa a superfície fechada que constitui o condutor de massa e os condutores que transportam a corrente que percorre o condutor de massa. É por isso que esta indutância depende da forma, da disposição e das dimensões dos condutores. De um modo geral é tanto mais fraca quanto mais curtos forem os condutores. A sua ordem de grandeza é o [nH/mm].

3.2.3.2 – Organização das ligações à massa

A diferença de potencial perturbadora v_{Mjk} entre dois pontos M_j e M_k do condutor de massa é proporcional:

- por um lado, à impedância Z_{Mjk} do condutor entre M_j e M_k ;
- por outro lado, à corrente i_{Mjk} que percorre o segmento M_jM_k .

Teoricamente a impedância de ligação Z_{Mjk} pode ser anulada alterando M_j e M_k , isto é, ligando a um ponto único as ligações ao condutor de massa de todos os componentes do sistema. Isto é o chamado agrupamento em paralelo ou em estrela (figura 3.8 a); neste caso, a diferença de potencial de um componente em relação a esse ponto de massa depende somente da sua própria corrente, sendo independente das correntes injectadas pelos outros componentes.

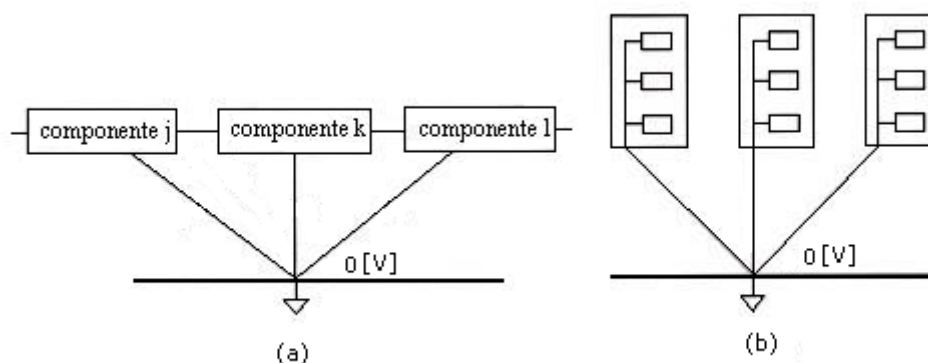


Figura 3.8 – Ligações à massa: a) montagem em paralelo ou em estrela; b) montagem série-paralelo.

Quando, como é normalmente o caso, o número de componentes é elevado, torna-se praticamente impossível ligar todos os componentes ao mesmo ponto de massa única. Neste caso, reagrupam-se as montagens de componentes por blocos, tendo cada bloco o seu próprio condutor de massa, sendo este condutor ligado a um ponto comum. Este ponto é chamado o ponto único de massa (PUM), e este agrupamento chama-se série-paralelo (figura 3.8 *b*).

Regras de associação dos circuitos

Devem-se agrupar por blocos os dispositivos em que os sinais têm níveis e velocidades da variação compatíveis:

- bloco analógico de fraco nível;
- bloco de potência (comando de motores, relés);
- bloco dos circuitos numéricos.

No interior de um bloco, o risco de perturbação por ligação galvânica é minimizado. Cada bloco possui o seu próprio condutor de massa do sinal, o qual é diferente do condutor 0 [V] da alimentação, no caso dos circuitos numéricos.

A montagem dos condutores de massa do sinal é ligada num só ponto: o ponto único de massa (PUM). Há interesse em colocar o PUM o mais próximo possível dos circuitos de nível baixo. Este é ligado por uma ligação específica aos 0 [V] das alimentações e, quando a referência de potencial é a terra local, ao chassis (massa mecânica) e à rede equipotencial de terra.

3.3. Perturbações por Ligação Electromagnética

A ligação entre dois dispositivos é dita electromagnética quando as ondas electromagnéticas radiadas por um deles atingem o outro dispositivo e provocam o aparecimento de tensões parasitas. As ligações magnéticas e eléctricas são, de facto, os casos limite de ligação electromagnética, com a diferença que nessas um dos componentes de onda, E ou H , é dominante em relação ao outro. Este tipo de perturbação é bastante aprofundado na referência [2], e será de seguida estudado.

3.3.1. Onda electromagnética – campo próximo – campo distante

Todos os dispositivos afectados por fenómenos eléctricos variáveis são fontes de ondas electromagnéticas. No vazio, as equações de Maxwell escrevem-se na forma:

$$\int_C E \cdot dl = -\mu_o \frac{\partial}{\partial t} \iint_S H \cdot dS \quad [3.11]$$

$$\int_C H \cdot dl = -\varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \iint_S E \cdot dS \quad [3.12]$$

Onde C é o contorno limitador da superfície S ,

$$\text{div } H = 0, \text{ div } E = 0$$

As equações [3.11] e [3.12] mostram que, a partir do momento em que existe um campo variável, campos magnéticos e eléctricos são indiscutivelmente limites. É esta associação que constitui a onda electromagnética na equação da propagação, deduzida das equações de Maxwell, pondo em evidência a velocidade de propagação que, no ar ou no vazio, tem a seguinte expressão: $c = (\varepsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$ e para o valor, a velocidade da luz: $c = 3 \times 10^8$ [m/s].

A frequência dos fenómenos eléctricos na fonte é f , e defina-se o comprimento de onda como $\lambda = c/f$, o período $T = 1/f$ e a pulsação $\omega = 2\pi f$.

A uma distância d da fonte, os campos têm as seguintes expressões:

$$\text{Campo eléctrico: } E(d) \cdot f \left[\omega \left(t - \frac{d}{c} \right) \right] = E(d) \cdot f \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right) \right];$$

$$\text{Campo magnético: } H(d) \cdot g \left[\omega \left(t - \frac{d}{c} \right) \right] = H(d) \cdot g \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right) \right].$$

O termo $2\pi d/\lambda$ traduz o atraso da fase, devido à propagação, entre o estado da fonte no instante t e os campos no mesmo instante à distância d .

No caso de $d \ll \lambda$ (região dita do campo próximo), o seu atraso é desprezável e podemos considerar que os valores dos campos no instante t correspondem ao estado das correntes e das tensões da fonte no mesmo instante.

No caso de $d > \lambda/2\pi$ (região dita do campo longínquo), a hipótese de regime quase estacionário não se aplica na modelação da ligação de um condensador ou uma indução comum não se justifica.

A onda electromagnética considera-se assim como uma onda quase plana formada por:

- um campo eléctrico: $E(d) \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)$,
- um campo magnético: $H(d) \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)$,

Onde $E(d)$ e $H(d)$ variam com $1/d$, e E e H são perpendiculares entre si e a direcção de propagação.

3.3.2. Influência de uma onda electromagnética num circuito

Ao considerar uma onda electromagnética suspensa cuja direcção de propagação é tida como o eixo Oz de um sistema de eixos rectangulares $Oxyz$, em que a direcção do Ox é a do campo eléctrico:

$$E = E_0 \cdot \cos \omega \left(t - \frac{z}{c} \right) \quad [3.13]$$

E onde a direcção Oy é a do campo magnético:

$$H = H_0 \cdot \cos \omega \left(t - \frac{z}{c} \right) \quad [3.14]$$

E_0 e H_0 estão ligados pela relação:

$$\sqrt{\epsilon_0} \cdot E_0 = \sqrt{\mu_0} \cdot H_0 \quad [3.15]$$

Considere-se um circuito rectangular ABCD que está situado no plano xOz , em que as suas cotas do comprimento a e b estão respectivamente paralelas aos eixos Ox e Oz ; seja z_0 a posição do centro M de rectângulo marcado no eixo Oz (figura 3.9).

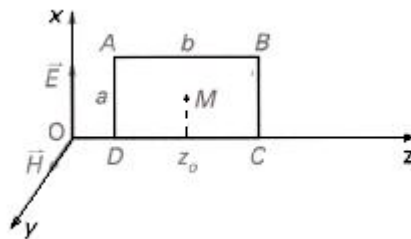


Figura 3.9 – Circuito somado a uma onda electromagnética plana.

O fluxo de indução $d\varphi$ através de uma superfície elementar de altura a e de largura dz tem a expressão:

$$d\varphi = \mu_0 \cdot H_0 \cdot a \cdot dz \cdot \cos \omega \left(t - \frac{z}{c} \right) \quad [3.16]$$

De onde, para o fluxo total φ através do circuito:

$$\varphi = \int_{z_0-b/2}^{z_0+b/2} d\varphi = \mu_0 \cdot H_0 \cdot \frac{\lambda}{\pi} \cdot a \cdot \sin \frac{\pi b}{\lambda} \cdot \cos \omega \left(t - \frac{z_0}{c} \right) \quad [3.17]$$

A f.e.m. induzida no circuito por este fluxo variável é:

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = 2 \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot c \cdot a \cdot \sin \frac{\pi b}{\lambda} \cdot \cos \omega \left(t - \frac{z_0}{c} \right) \quad [3.18]$$

Tendo a amplitude A desta f.e.m. a seguinte expressão:

$$A = 2 \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot c \cdot a \cdot \sin \frac{\pi b}{\lambda} \quad [3.19]$$

Esta amplitude A depende da relação do comprimento b do circuito com o comprimento de onda λ :

- A é máximo e igual a $2 \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot c \cdot a$ para $b = (2k+1) \cdot \lambda / 2$;
- A é nulo para $b = k\lambda$.

Este resultado é diferente do caso de perturbações galvânicas, onde a f.e.m. induzida, sendo proporcional à superfície do circuito, é assim proporcional a b . Este último resultado obtido, a partir da expressão de A , é válido desde que $b \ll \lambda$ e $\sin \frac{\pi b}{\lambda} \cong \frac{\pi b}{\lambda}$.

3.3.3. Blindagem Electromagnética

Uma blindagem electromagnética é um preenchimento metálico que separa a fonte de radiação electromagnética perturbadora do circuito a proteger. No estudo das perturbações em regime quase estacionário mostra-se:

- que uma blindagem ferromagnética permite direccionar os campos magnéticos perturbadores para fora dos volumes a proteger;
- que uma blindagem condutora procura uma protecção eficaz que se oponha aos campos eléctricos perturbadores.

Estes resultados derivam das leis da magnetostática e da electrostática: eles não podem contudo, *a priori*, ser aplicados ao espectro de frequências das perturbações. Somente tendo em conta o aspecto ondulatorio dos fenómenos permite uma visão geral da eficiência de uma blindagem.

3.3.3.1. Interação onda electromagnética – blindagem

A blindagem divide o espaço em três regiões (figura 3.10):

- região 1, onde se encontra a fonte de radiação electromagnética;
- região 2, correspondente ao volume metálico da blindagem;
- região 3, correspondente ao volume interior da blindagem, onde está situado o circuito a proteger.

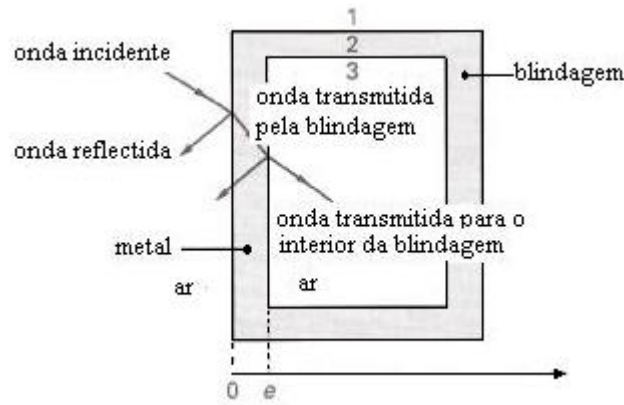


Figura 3.10 – Reflexões e transmissões de uma onda electromagnética por uma blindagem.

Os diferentes fenómenos físicos que estão em jogo na interacção onda-blindagem são os seguintes:

- na ligação 1-2 (ar-metal) uma parte da onda incidente é reflectida para o ar, enquanto a outra parte é transmitida pela blindagem; de uma parte e de outra da ligação ar-metal temos:

$$\frac{E_1(0)}{E_2(0)} = r_{12} \quad \frac{H_1(0)}{H_2(0)} = r'_{12}$$

$E_1(0)$ e $H_1(0)$ representam as amplitudes dos campos na ligação do lado do ar, $E_2(0)$ e $H_2(0)$ representam as amplitudes dos campos na ligação do lado da blindagem, r_{12} e r'_{12} representam os coeficientes de atenuação dos campos por reflexão na ligação 1-2, ar-metal.

Ao atravessar a blindagem, a espessura e , onde sofre uma atenuação devido à absorção:

$$\frac{E_2(0)}{E_2(e)} = A \quad \frac{H_2(0)}{H_2(e)} = A'$$

$E_2(e)$ e $H_2(e)$ representam as amplitudes dos campos na ligação 2-3, do lado da blindagem, A e A' representam a atenuação dos campos durante a sua propagação no metal.

- na ligação 2-3 (metal-ar) uma parte da onda é reflectida na blindagem, enquanto a outra parte é transmitida para o ar, no volume interior da blindagem. Numa parte e na outra da superfície de separação temos:

$$\frac{E_2(e)}{E_3(e)} = r_{23} \quad \frac{H_2(e)}{H_3(e)} = r'_{23}$$

$E_3(e)$ e $H_3(e)$ representam as amplitudes dos campos descendentes da blindagem e transmitidos para o seu espaço interior, r_{23} e r'_{23} representam os coeficientes de atenuação dos campos por reflexão na ligação 2-3, metal-ar.

Com as equações anteriores, obtém-se:

$$\frac{E_1(0)}{E_3(e)} = r_{12}r_{23}A = R \cdot A = S \quad \text{onde } R = r_{12} \cdot r_{23}$$

$$\frac{H_1(0)}{H_3(e)} = r'_{12}r'_{23}A' = R' \cdot A' = S' \quad \text{onde } R' = r'_{12} \cdot r'_{23}$$

Daqui pode verificar-se que:

$$R = R' \text{ e } A = A', \text{ de onde } S = S' = R \cdot A$$

S é a eficácia da blindagem, razão do campo incidente com o campo transmitido para o volume interior da blindagem, R é a atenuação devido à reflexão nas ligações, A é a atenuação por absorção da onda na sua propagação pela espessura da blindagem.

A eficácia da blindagem é normalmente expressa em db por: $S_{db} = 20 \lg S$.

Também:

$$S_{db} = R_{db} + A_{db} \quad [3.20]$$

3.3.3.2. Impedância de onda

O estudo da reflexão e da transmissão de uma onda na ligação entre dois meios pode levar à utilização do modelo da linha de transmissão. Neste caso, os fenómenos sobre a linha são determinados pelas discontinuidades da impedância: há que definir primeiro a impedância de uma onda.

A impedância de onda num ponto, Z_w , é a razão entre a amplitude do campo eléctrico e a amplitude do campo magnético no ponto:

$$Z_w = E/H \quad [3.21]$$

Num campo distante, para uma onda plana, esta razão é constante, independentemente da distância d à fonte e para o vazio tem o seguinte valor:

$$Z_w = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = Z_0 = 377[\Omega]$$

Isto não é igual na região do campo próximo onde a impedância de onda depende por um lado da natureza da fonte, e por outro lado da distância d .

No campo próximo, quando o campo H é predominante, a impedância de onda é inferior a Z_0 . Este é o caso de uma fonte com uma fraca impedância onde a influência da corrente que a percorre tem um efeito dominante. O modelo da fonte de radiação com um campo H predominante é a antena central formada por uma ou várias espiras condutoras. Em função da distância d a uma dada força, a impedância de onda para o caso deste modelo é:

$$Z_w = Z_0 \cdot \frac{2\pi d}{\lambda} \quad [3.22]$$

Ou, sabendo que: $Z_w = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ e $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{f\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$,

$$Z_w = 2\pi\mu_0fd = 7,9 \times 10^{-6} \cdot f[\text{Hz}] \cdot d[\text{m}] \text{ em } [\Omega]$$

No campo próximo, quando o campo E é predominante, a impedância de onda é superior a Z_0 . Este é o caso em que a fonte tem uma grande impedância e a corrente é fraca. O modelo de uma fonte destas é a antena *filare* que emite por radiação uma onda cuja impedância no campo próximo, a uma distância d , tem para o modelo:

$$Z_w = Z_0 \cdot \frac{\lambda}{2\pi d} \quad [3.23]$$

Sendo:

$$Z_w = \frac{1}{2\pi\epsilon_0fd} = \frac{1,8 \times 10^{10}}{f[\text{Hz}] \cdot d[\text{m}]} \quad [\Omega]$$

Em função da natureza exacta do circuito que emite radiação real, a impedância de onda no campo próximo tem um valor intermédio entre estes, máximo, correspondente à antena *filare* e, mínimo, correspondente ao caso normal.

3.3.3.3. Atenuação por reflexão

Ao utilizar a linha de transmissão como modelo para o estudo da propagação, os fenómenos de reflexão surgem como resultado de uma desadaptação, ou seja, da diferença entre a impedância da onda incidente e a impedância característica do metal da blindagem.

A partir da teoria das linhas, estabelece-se a expressão de atenuação por reflexão:

$$R = \frac{(Z_w + Z_m)^2}{4 \cdot Z_w \cdot Z_m} \quad [3.24]$$

Onde Z_w representa a impedância da onda incidente e Z_m representa a impedância característica do metal da blindagem cujo módulo tem a seguinte expressão:

$$Z_m = \sqrt{\frac{2\pi\mu f}{\sigma}} = 2,8 \times 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r f}{\sigma}} \quad [\Omega] \quad [3.25]$$

Sendo $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$, com μ_r a representar a permeabilidade relativa do metal e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ MKSA, σ a condutibilidade do metal em [S/m], f a frequência da onda em [Hz].

Considerando $\mu_r = 1$, $\sigma = 5,8 \times 10^{-7}$ [S/m], tem-se:

$$Z_m = 3,67 \times 10^{-7} \cdot \sqrt{f} \quad [\Omega]$$

Tendo em conta os baixos valores de Z_m (tabela 3.1), considera-se geralmente $Z_w \gg Z_m$, simplificando a expressão de R , fica:

$$R = \frac{Z_w}{4 \cdot Z_m}$$

Substituindo, tem-se:

$$R = 89,3 \cdot Z_w \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\mu_r f}} \quad [3.26]$$

Desta expressão pode concluir-se que a atenuação por reflexão é tanto mais importante quanto:

- maior for a impedância da onda;
- o metal for mais condutor;
- o metal não for ferromagnético.

No caso de se ter cobre:

$$R = 6,83 \times 10^5 \cdot \frac{Z_w}{\sqrt{f}}$$

Caso de um campo distante

A impedância da onda é constante neste caso:

$$Z_w = 377 \quad [\Omega] \quad \text{e} \quad R = 3,37 \times 10^4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\mu_r f}}$$

No caso de ter cobre:

$$R = 2,57 \times 10^8 \cdot \frac{1}{\sqrt{f}} \text{ e } R_{db} = 168,2 - 10 \lg f$$

A atenuação por reflexão diminui a uma frequência constante.

Caso do campo próximo

Neste caso a impedância da onda é relativamente elevada: $Z_w = 1/2\pi \epsilon_0 f d$, tendo-se assim:

$$R = \frac{Z_w}{4 \cdot Z_m} = 1,60 \times 10^{12} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\mu_r f^3 d^2}} \quad [3.27]$$

No caso de ter cobre:

$$R = 1,23 \times 10^6 \cdot \frac{1}{\sqrt{f^3 d^2}} \text{ e } R_{db} = 321,7 - 10 \lg(f^3 d^2)$$

Campo magnético dominante

Neste caso a impedância de onda é relativamente fraca, tendo-se:

$$R = \frac{Z_w}{4 \cdot Z_m} = 7 \times 10^4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma f d^2}{\mu_r}} \quad [3.28]$$

No caso de ter cobre:

$$R = 5,36 \cdot \sqrt{f d^2} \text{ e } R_{db} = 14,8 - 10 \lg(f d^2)$$

Se, no campo próximo tivermos:

$$d = \frac{1}{n} \times \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{1}{n} \times \frac{c}{2\pi f}$$

Onde n é tanto maior que 1 quanto mais próximo estivermos da fonte, passando as equações anteriores a escrever-se da seguinte forma, para o caso de termos cobre:

- para E dominante: $R_{db} = 168,2 - 10 \lg f + 20 \lg n$
- para H dominante: $R_{db} = 168,2 - 10 \lg f - 20 \lg n$
- para a onda plana: $R_{db} = 168,2 - 10 \lg f$

Estas expressões mostram que para um dado valor de n , a atenuação por reflexão de um campo E dominante é superior a $40 \lg n$ decibéis em relação a um campo H dominante.

3.4. Ruído de Fundo

Todos os dispositivos electrónicos são a base de sinais indesejáveis cujas variações são aleatórias e cuja origem está intrinsecamente ligada à natureza física dos componentes que os constituem. Estes sinais formam o ruído de fundo; eles são inevitáveis, mas uma escolha criteriosa dos componentes e das montagens permite a sua minimização. Em todos os casos, o ruído de fundo, quando presente, fixa o limite final da resolução (figura 3.11)



Figura 3.11 – Ruído de fundo: a) andamento da variação do ruído de uma tensão ou de uma corrente com o tempo; b) ruído sobreposto a um sinal.

3.4.1. Tipos de ruído

O ruído de fundo que, de um modo geral, corresponde às flutuações de densidade dos portadores de carga, e tem como origem fenómenos físicos diversos, que impõem as características específicas dos ruídos que estes criam.

3.4.1.1. Ruído térmico ou de *Johnson*

Em todos os condutores há movimentação térmica dos electrões e das flutuações da sua densidade em torno do seu valor médio; disto resultam pequenas, contínuas e aleatórias variações da tensão aos bornes do condutor; chama-se a isto ruído térmico, e está obrigatoriamente associado a todos os componentes resistivos.

A densidade espectral e_{br} do ruído térmico numa resistência de valor R é dada pela fórmula de *Johnson*:

$$e_{br} = \sqrt{4kTR} \quad [3.29]$$

Onde k representa a constante de *Boltzmann* ($k = 1,374 \times 10^{-23}$ [J/K]) e T é a temperatura absoluta da resistência. Esta densidade espectral é independente da frequência; o ruído correspondente é chamado ruído branco.

De referir que o ruído de *Johnson* está associado a todas as resistências fisicamente presentes num circuito, bem como à componente resistiva de uma impedância complexa. Pelo contrário, não há ruído térmico associado às resistências dinâmicas que são definidas como declives dV/dI .

3.4.1.2. Ruído de constituição (*excess noise*)

Este ruído está ligado à estrutura granular de certos tipos de resistências (aglomerado de carbono, por exemplo) e à evolução errática das linhas de corrente resultantes. A densidade espectral do ruído correspondente, e_{bc} , varia em $1/\sqrt{f}$: importante para frequências baixas, tornando-se desprezável frequências da ordem dos MHz. A sua expressão é:

$$e_{bc} = K_c \times \frac{IR}{\sqrt{f}} \quad [3.30]$$

Onde I é a corrente que atravessa a resistência R considerada, e K_c é uma constante para um dado tipo de resistência. Este tipo de ruído é chamado de *pink noise*, pois para a luz rosa, as frequências são mais baixas e são mais importantes.

3.4.1.3. Ruído de descarga ou de Schottky (*shot noise*)

Este ruído corresponde às flutuações de uma corrente I devidas à passagem por uma barreira de potencial (junção entre os semi-condutores p e n por exemplo). O ruído de descarga exprime-se na média de uma corrente de ruído, sendo a densidade espectral dada pela fórmula de Schottky:

$$i_{bs} = \sqrt{2qI} \quad [3.31]$$

Onde q é a carga de electrões e I é o valor médio da corrente quando as flutuações constituem o ruído. Numericamente:

$$i_{bs} = 0,57 \cdot \sqrt{I(\mu A)}, \text{ em } \left[\frac{pA}{\sqrt{Hz}} \right]$$

O ruído de Schottky, de densidade espectral independente da frequência é um *white noise*.

3.4.1.4 Ruído de cintilação (*flicker noise*)

Este ruído deve-se às flutuações das densidades dos transportadores que podem originar as recombinações dos defeitos de superfície dos materiais semi-condutores; pode ser reduzido através de tratamentos apropriados, mas nunca pode ser eliminado a baixas frequências (inferiores a 100 Hz). Traduz-se pelas flutuações da tensão e da corrente, e as densidades espectrais e_{bf} e i_{bf} são dadas respectivamente pelas expressões:

$$e_{bf} = \frac{K_e}{\sqrt{f}} \quad e \quad i_{bf} = \frac{K_i}{\sqrt{f}}$$

Sendo K_e e K_i as constantes para um dado dispositivo. Tal como o ruído de constituição das resistências, este ruído é considerado *pink noise*.

3.4.2. Cálculo das tensões e correntes de ruído

Os ruídos de fontes distintas ou os ruídos de uma mesma fonte com bandas de frequências distintas não estão relacionados. Enquanto tais ruídos se sobrepõem num dispositivo, a potência do ruído que resulta é a soma das potências de ruídos individuais. Em resultado, desde que a potência do ruído e os valores quadráticos médios das tensões e correntes do ruído sejam proporcionais, as tensões ou correntes do ruído ajustam-se quadraticamente:

$$V_b^2 = V_{b1}^2 + V_{b2}^2 + \dots + V_{bn}^2 \quad \text{e} \quad I_b^2 = I_{b1}^2 + I_{b2}^2 + \dots + I_{bn}^2$$

Onde V_b e I_b são as tensões e correntes de ruído eficazes resultantes da sobreposição dos ruídos de n origens distintas.

Do mesmo modo, a uma frequência f , para as densidades espectrais de tensão e corrente de ruído, tem-se:

$$v_b^2(f) = v_{b1}^2(f) + v_{b2}^2(f) + \dots + v_{bn}^2(f) \quad [3.32]$$

$$i_b^2(f) = i_{b1}^2(f) + i_{b2}^2(f) + \dots + i_{bn}^2(f) \quad [3.33]$$

Sendo $v_b(f)$ e $i_b(f)$ as densidades espectrais a uma frequência f resultante da sobreposição das densidades espectrais do ruído saídas de n fontes distintas.

Os cálculos da tensão e corrente de cada tipo de ruído estão apresentados em [1]. Contudo, apresenta-se seguidamente a dedução da tensão de ruído branco filtrada (banda passante de ruído), visto ser importante realizar esta análise mais pormenorizadamente.

Filtro passa-baixo de primeira ordem

Considere-se um dispositivo cuja função de transferência $T(f)$ é a de um filtro passa-baixo de primeira ordem, de frequência de corte f_c :

$$|T(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad [3.34]$$

Numa primeira aproximação:

$$\begin{aligned} |T(f)| &= 1 \quad \text{para } f < f_c \text{ (banda passante),} \\ |T(f)| &= f_c/f \quad \text{para } f > f_c \text{ (banda atenuada).} \end{aligned}$$

Para um *white noise*, de densidade espectral e_{bb} , estando aplicado à entrada do dispositivo, vai-se determinar a tensão de ruído transmitida à saída:

- tensão de ruído na banda passante:

$$E_{b)bp}^2 = f_c \cdot e_{bb}^2$$

- tensão de ruído na banda atenuada:

$$E_{b)ba}^2 = f_c \cdot e_{bb}^2$$

- tensão de ruído total à saída:

$$E_b^2 = 2f_c \cdot e_{bb}^2$$

Para um cálculo mais rigoroso:

$$E_b^2 = \frac{\pi}{2} \cdot f_c \cdot e_{bb}^2 = f_{cb} \cdot e_{bb}^2 \text{ onde } f_{cb} = \frac{\pi}{2} \cdot f_c \cong 1,57 f_c$$

A tensão do ruído à saída é a mesma que seria transmitida por um filtro passa-baixo ideal de frequência de corte f_{cb} , chamada frequência de corte do ruído ou banda passante do ruído. Conhecendo a frequência de corte f_c e, conseqüentemente, sendo especificada a densidade espectral do *white noise*, conhece-se a tensão de ruído à saída do dispositivo.

Filtros passa-baixo de ordens superiores a 1

Para um filtro de ordem n , o declive assintótico da função de transferência na banda atenuada é $-20 n$ db/década. O resultado da relação f_{cb}/f_c tende para 1, à medida que n aumenta, como pode ser visto na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Exemplo de valores para filtros passa-baixo de Butterworth.

Ordem n	1	2	3	4	5
f_{cb}/f_c	1,57	1,11	1,05	1,03	1,02

3.4.3. Esquemas equivalentes para o ruído

A determinação do ruído à saída de um dispositivo realiza-se associando a cada componente do circuito as fontes de ruído características desse componente. Pelos métodos habituais de cálculo de tensões de saída, podemos estabelecer o ruído produzido à saída por qualquer uma das fontes e deduzir o ruído total pela soma quadrática dos ruídos derivados de qualquer uma das fontes.

3.4.3.1. Esquema de ruído de um circuito resistivo

Numa representação de *Thévenin* (figura 3.12 a), a todas as resistências R vai-se associar em série um gerador e_{br} representativo da densidade espectral da tensão de ruído térmico da resistência R :

$$e_{br} = \sqrt{4kTR} \quad [3.35]$$

Este esquema pode ser transformado numa representação de *Norton* (figura 3.12 b) onde uma fonte de corrente i_{br} é colocada em paralelo sobre a resistência R ; i_{br} , densidade espectral da corrente de ruído térmico, tem a expressão:

$$i_{br} = \frac{e_{br}}{R} = \sqrt{\frac{4kT}{R}} \quad [3.36]$$

Para $T=300$ [K]: $i_{br} = 1,28 \times 10^{-1} \cdot 1/\sqrt{R_{\Omega}}$ em [nA/ \sqrt{Hz}].

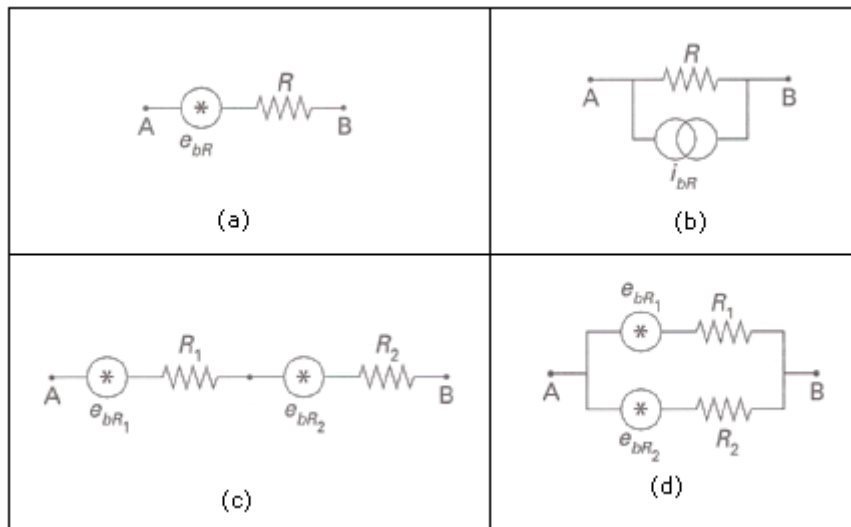


Figura 3.12 – Associação de resistências: a) esquema de Thévenin; b) esquema de Norton; c) resistências em série; d) resistências em paralelo [1].

Associação de resistências em série

As resistências R_1 e R_2 são montadas em série (figura 3.12 c); a densidade espectral do ruído e_{br} desta montagem resulta da soma quadrática das densidades espectrais e_{br1} e e_{br2} associadas a qualquer das resistências:

$$e_{br}^2 = e_{br1}^2 + e_{br2}^2 = 4kT(R_1 + R_2) = 4kTR_{eq} \quad [3.37]$$

Associação de resistências em paralelo

As resistências R_1 e R_2 montadas em paralelo nos bornes A e B (figura 3.12 d). Vamos calcular sucessivamente as densidades espectrais do ruído entre A e B:

- devido somente a e_{br1} , sendo: $\frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot e_{br1}$;
- devido somente a e_{br2} , sendo: $\frac{R_1}{R_1+R_2} \cdot e_{br2}$;

A densidade espectral e_{br} desta associação resulta da soma quadrática das expressões anteriores, obtendo-se:

$$e_{br}^2 = 4kT \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 4kT R_{eq} \quad [3.38]$$

Pode concluir-se que uma associação de resistências tem a mesma densidade espectral de ruído que a resistência que lhe é equivalente.

3.4.3.2. Esquema de ruído de um transístor

Transístor Bipolar

Em regime de pequenos sinais, o transístor pode ser modelado pelo *esquema de Giacoletto*. O esquema equivalente para o ruído obtém-se associando ao *esquema de Giacoletto* as diversas fontes de ruído onde o transístor é a base:

- de ruído térmico da resistência r_{br} : $e_{br\ bb'} = \sqrt{4kT r_{br}}$;
- de ruído de *Schottky* da corrente base I_B : $i_{bs)B} = \sqrt{2qI_B}$;
- de ruído de *Schottky* da corrente do colector I_C : $i_{bs)C} = \sqrt{2qI_C}$;
- de ruído de cintilação do transístor: $i_{bF} = K_i / \sqrt{F}$.

Transístor de efeito de campo

O esquema equivalente para pequenos sinais de um transístor de efeito de campo é completado com o estudo do ruído para as diferentes fontes de ruído, que são:

- o ruído térmico da resistência R_c de canal: $i_{bRc} = \sqrt{4kT/R_c}$;
- o ruído de cintilação do transístor: $i_{bF} = K_i / \sqrt{F}$;
- o ruído i_{bG} associado ao pino *gate* onde a expressão complexa depende da corrente i_G (ruído de *Schottky*) e do ruído térmico do canal ligado ao pino *gate* pelo condensador C_{gs} .

3.4.3.3. Esquema do ruído do amplificador operacional

A montagem de transístores e de resistências que constituem o amplificador operacional produz um ruído que pode ser modelado por três fontes (figura 3.13) colocadas na entrada do amplificador:

- uma fonte de densidade espectral de tensão e_{ba} , colocada indiferentemente na entrada inversora (-) ou não inversora (+);
- duas fontes de densidades espectrais de corrente i_{ba+} e i_{ba-} colocadas entre a massa e respectivamente as entradas + e -; geralmente $i_{ba+} = i_{ba-} = i_{ba}$.

As fontes e_{ba} e i_{ba} são sempre as fontes de ruído composto.

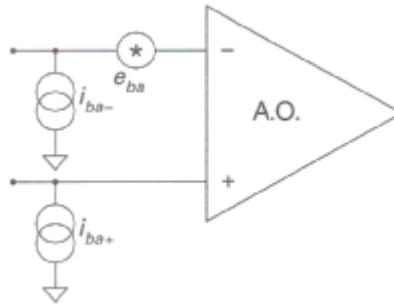


Figura 3.13 – Esquema de ruído do amplificador operacional [1].

Amplificador inversor e amplificador não inversor

Não considerando o gerador da fonte de excitação, estes dois tipos de amplificadores quantificam o ruído num mesmo esquema (figura 3.14) onde são representadas as fontes de ruído do amplificador operacional cada uma das resistências exteriores que lhe estão associadas.

A densidade espectral da tensão v_{bo} aparece à saída, resultante da soma quadrática das densidades espectrais de tensões de ruído na saída $v_{bo)k}$ devido a cada uma das fontes de ruído:

$$v_{bo}^2 = \sum v_{bo)k}^2 \quad [3.39]$$

A tensão eficaz do ruído à saída, V_{bo} , numa banda de frequências de limites f_{min}, f_{max} , deduz-se da densidade espectral v_{bo} :

$$V_{bo}^2 = \int_{f_{min}}^{f_{max}} v_{bo}^2 \cdot df \quad [3.40]$$

Pela aplicação da expressão [3.39], a densidade espectral v_{bo} do ruído resultante à saída é:

$$v_{bo}^2 = v_{bo1}^2 + v_{bo2}^2 + v_{bo3}^2 + v_{bo4}^2 + v_{bo5}^2 + v_{bo6}^2$$

Substituindo:

$$v_{bo}^2 = 4kT \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left[R_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot R_3 \right] + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot e_{ba}^2 + \left[\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot R_3 + R_2^2 \right] \cdot i_{ba}^2$$

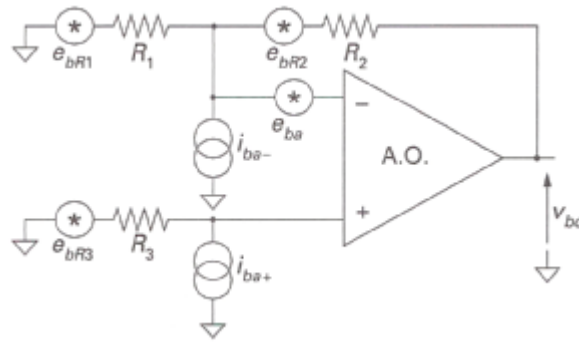


Figura 3.14 – Esquema do ruído do amplificador inversor ou não inversor [1].

Então, para reduzir a influência das correntes de polarização das entradas, escolhemos $R_3 = R_1 // R_2$, obtendo assim:

$$v_{bo}^2 = 8kT \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot R_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot e_{ba}^2 + 2R_2^2 \cdot i_{ba}^2 \quad [3.41]$$

Aplicando a expressão [3.40] consegue-se deduzir a tensão eficaz do ruído à saída V_{bo} .

$$V_{bo}^2 = 4kT \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left[R_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot R_3 \right] \cdot (f_{max} - f_{min}) + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot E_{ba}^2 + \left[\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot R_3 + R_2^2 \right] \cdot I_{ba}^2 \quad [3.42]$$

Com:

$$E_{ba}^2 = e_{bba}^2 \cdot [F_{ce} \cdot \ln(f_{max}/f_{min}) + (f_{max} - f_{min})]$$

$$I_{ba}^2 = i_{bba}^2 \cdot [F_{ci} \cdot \ln(f_{max}/f_{min}) + (f_{max} - f_{min})]$$

Para facilitar a comparação do sinal de entrada no ruído de fundo, ele é usado em relação ao ruído de entrada do amplificador; isto obtém-se dividindo o ruído na saída pelo ganho do amplificador. Resulta para v_{bi} e V_{bi} , respectivamente densidade espectral e valor eficaz do ruído na entrada, as expressões:

$$v_{bi}^2 = 4kT \cdot \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) + e_{ba}^2 + \left[\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 + R_3^2 \right] \cdot i_{ba}^2 \quad [3.43]$$

$$V_{bi}^2 = 4kT \cdot \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) \cdot (f_{max} - f_{min}) + E_{ba}^2 + \left[\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 + R_3^2 \right] \cdot I_{ba}^2 \quad [3.44]$$

Esta expressão põe em evidência as contribuições de três fontes de ruído: ruído das resistências, ruídos de tensão e corrente do amplificador operacional; mostra ainda em particular a influência que a resistência da fonte de excitação exerce sobre o ruído, que na montagem não inversora é igual a R_3 :

- para as fracas resistências da fonte, as causas principais de ruído são a tensão de ruído do amplificador operacional e o ruído das resistências. É imperativo, quando a resistência da fonte é fraca, escolher um amplificador com fraca tensão de ruído;
- para os valores elevados de resistências da fonte, a corrente de ruído do amplificador operacional que percorre a resistência da fonte pode ser a causa de ruído. É por isso que quando se utiliza uma fonte de resistências elevadas é indispensável escolher um amplificador com muito fracas correntes de ruído.

3.4.3.4. Esquema do ruído do amplificador de instrumentação

As fontes internas de ruído do amplificador de instrumentação são modeladas tal como para o amplificador operacional para três fontes colocadas nas entradas:

- uma fonte de densidade espectral de tensão e_{ba} colocada na entrada inversora ou não inversora;
- duas fontes de densidade espectral de corrente i_{ba+} e i_{ba-} colocadas entre a massa e as entradas + e -; geralmente $i_{ba+} = i_{ba-} = i_{ba}$.

As fontes e_{ba} e i_{ba} são sempre as fontes de ruído composto, mas os seus valores e as suas evoluções em frequência são função do ganho G do amplificador e dados pelo construtor.

Considere-se uma montagem com fonte de excitação na massa e o seu esquema equivalente para o cálculo do ruído (figura 3.15).

A densidade espectral v_{bi} do ruído total na entrada tem como expressão:

$$v_{bi}^2 = e_{ba}^2 + e_{bR2}^2 + e_{bR1}^2 + (R_1^2 + R_2^2) \cdot i_{ba}^2 \quad [3.45]$$

A tensão eficaz V_{bi} do ruído na estrada é:

$$V_{bi}^2 = \int_{f_{min}}^{f_{max}} v_{bi}^2 \cdot df \quad [3.46]$$

Ficando:

$$V_{bi}^2 = 4kT \cdot (R_1 + R_2) \cdot (f_{max} - f_{min}) + E_{ba}^2 + [R_1^2 + R_2^2] \cdot I_{ba}^2 \quad [3.47]$$

Onde:

$$E_{ba}^2 = e_{bba}^2 \cdot [F_{ce} \cdot \ln(f_{max}/f_{min}) + (f_{max} - f_{min})]$$

$$I_{ba}^2 = i_{bba}^2 \cdot [F_{ci} \cdot \ln(f_{max}/f_{min}) + (f_{max} - f_{min})]$$

Se o ganho G do amplificador for constante na banda de frequências de f_{min} a f_{max} , a tensão eficaz do ruído V_{bo} à saída do amplificador é:

$$V_{bo} = G \cdot V_{bi} \quad [3.48]$$

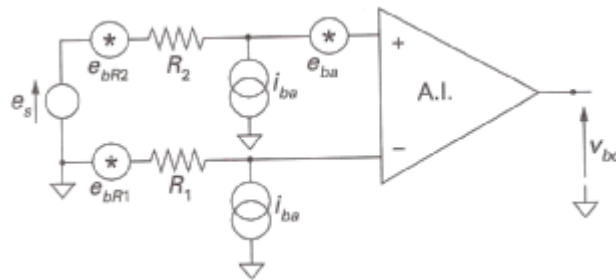


Figura 3.15 – Esquema equivalente do ruído de uma montagem com amplificador de instrumentação [1].

3.5. Nota Conclusiva

Neste capítulo foram estudados os vários tipos de perturbações que afectam os circuitos electrónicos, bem como as perturbações e ruídos existentes nestes circuitos. Após este estudo, verifica-se que no projecto da máquina para ensaio de amortecedores não foi contemplada a existência de ruído, pelo que os valores resultantes das medições tinham naturalmente uma forte componente de ruído associada.

Agora, conhecendo os vários tipos de perturbações que afectam os circuitos e componentes utilizados, pretendem-se estudar e introduzir todas as técnicas e filtros necessários nos vários componentes eléctricos e electrónicos, de modo a minimizar os efeitos das perturbações, maximizando assim a precisão e exactidão das medidas e performances de todos os elementos

constituintes da máquina. O estudo dos filtros, técnicas e métodos de minimização do ruído será realizado no capítulo seguinte.

Referências

- [1] G. Asch, *Acquisition de données – Du capteur à l’ordinateur*, Dunod, Paris – França, 1999.
- [2] H. W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, 2ª Edição, John Wiley & Sons, Inc, Nova Iorque – Estados Unidos da América, 1998.

Capítulo

4

Tratamento de Perturbações e Ruído Electrónico

Estudadas as perturbações e tipos de ruído que afectam os circuitos electrónicos da máquina de ensaio de amortecedores, são estudados os métodos e técnicas para minimizar os seus efeitos, de modo a obter sinais com uma maior qualidade.

4.1. Protecção dos Circuitos de Entrada contra Perturbações

Os circuitos de entrada da cadeia de aquisição são os circuitos geralmente a nível baixo, logo, muito sensíveis a perturbações. Estes são constituídos por:

- fontes de sinais: sensores e eventualmente pontos de medida associados;
- suas ligações à instrumentação;
- estágio de entrada da instrumentação que é geralmente um amplificador.

O principal problema que apresentam os circuitos de entrada da cadeia está relacionado por um lado com as referências de tensão das fontes de sinal (sensores e condicionadores), e por outro lado com o resto da instrumentação.

A protecção destes circuitos está detalhadamente explicada em [1], [2] e [3], sendo seguidamente apresentado o seu estudo.

4.1.1. Perturbações na instrumentação e possíveis soluções tecnológicas

Os sensores colocados num sem número de aplicações são geralmente colocados a alguma distância dos outros elementos da cadeia de aquisição e dos dispositivos que asseguram a exploração dos dados das medições. Estes últimos têm como referência de potencial a ligação à terra. Por outro lado os sensores são colocados tanto em contacto directo, como próximo de condutores que não estão necessariamente ao mesmo potencial aos que servem de referência aos outros elementos da cadeia.

As dificuldades que correm o risco de surgir estão principalmente ligadas à diferença de potencial v_M , chamada massa, que existe entre a massa M_i da instrumentação propriamente dita e a massa ou terra local M_s ao nível do sensor e do seu eventual condicionador, que representam a fonte do sinal. Em consequência, começa-se por conceber os blocos de entrada considerando que a diferença de potencial da massa v_M , ou uma parte não desprezável desta última, não possa ser introduzida na cadeia de aquisição onde, enquanto se sobrepõe ao sinal, ela estraga a sua informação (figura 4.1 a).

A separação do sinal e da diferença de potencial da massa é possível de realizar, configurando os circuitos de acordo com os seguintes esquemas:

- utilizar uma massa de referência única:
 - Sendo M_i , a massa da instrumentação, a fonte do sinal está então isolada de M_s e ligada a M_i (figura 4.1 b);
 - Sendo M_s , a massa local ao nível do sensor, a instrumentação está então isolada de M_i e ligada a M_s (figura 4.1 c);
- ligar os circuitos à sua massa: sensor e condicionador a M_s e a instrumentação a M_i , mas neste caso é obrigatoriamente necessário:

- Fazer de modo a que a diferença de potencial da massa apareça como uma tensão de modo comum que será depois reduzida pela taxa de rejeição do amplificador diferencial de entrada;
- Intercalar entre os circuitos a diferentes referências um isolamento galvânico que suporte a diferença de potencial da massa e assegure a transferência de sinal.

Apesar da protecção dos circuitos contra a diferença de potencial da massa, é necessário assegurar por meio de blindagens a imunidade do sinal em relação aos outros modos de ligação das perturbações. Para isto é necessário escolher discriminadamente a referência do potencial das blindagens, a qual deve ser feita de modo a evitar que as correntes parasitas derivadas da blindagem não possam passar para os circuitos de sinal.

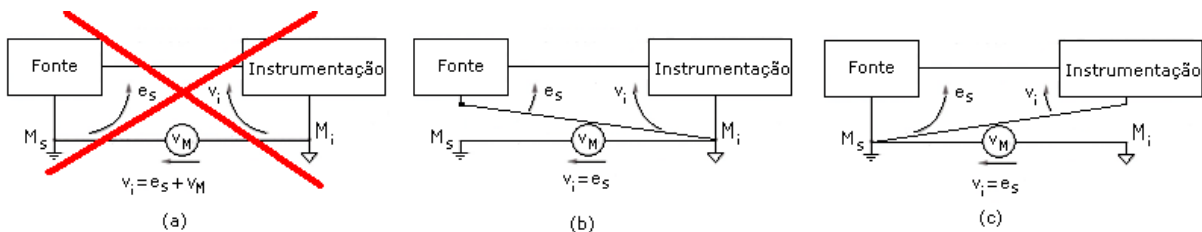


Figura 4.1 – Ligação às massas: a) fonte e instrumentação ligadas às suas próprias massas, a entrada da instrumentação sendo do tipo assimétrica; b) fonte isolada da massa local e ligada à massa da instrumentação; c) instrumentação isolada e ligada à massa local da fonte.

4.1.2. Fonte isolada da massa local – instrumentação ligada à rede equipotencial da terra

O isolamento da fonte corresponde, do ponto de vista eléctrico, a uma impedância de isolamento Z_{is} entre a fonte e a terra local. Z_{is} é formada por uma resistência elevada R_{is} em paralelo com um condensador reduzido C_{is} . Entre a massa local M_s e a massa M_i da instrumentação é estabelecida a diferença de potencial v_M .

4.1.2.1. Amplificador de entrada do tipo assimétrico

A fonte isolada da sua massa local M_s é limitada por um cabo bifilar na zona de entrada do amplificador; isto faz com que a fonte do sinal esteja ligada à massa M_i da instrumentação (figura 4.2 a). Tem de se determinar neste caso a influência da diferença de potencial da massa v_M sobre a tensão de entrada v_i do amplificador.

Considere-se: R_1 , R_2 , resistências das vias 1 e 2, somadas às resistências da fonte e ligações correspondentes. Z_{is} , R_1 , v_M podem ser substituídas, entre A e M_i , pelo seu equivalente de *Thévenin* (figura 4.2 b) caracterizado por:

- a força electromotriz equivalente: $v'_M = \frac{R_1}{R_1 + Z_{is}} \cdot v_M \cong \frac{R_1}{Z_{is}} \cdot v_M$ com $Z_{is} \gg R_1$
- a impedância em série: $Z' = R_1 // Z_{is} \cong R_1$.

A tensão de entrada v_i do amplificador, de impedância de entrada Z_i , tem a seguinte expressão:

$$v_i = (e_s + v'_M) \cdot \frac{Z_i}{R_1 + R_2 + Z_i} \approx e_s + v'_M \quad [4.1]$$

Com $R_1, R_2 \ll Z_i$

A tensão parasita v'_M , em série com o sinal, é tanto mais fraca quanto maior for a impedância do isolamento Z_{is} .

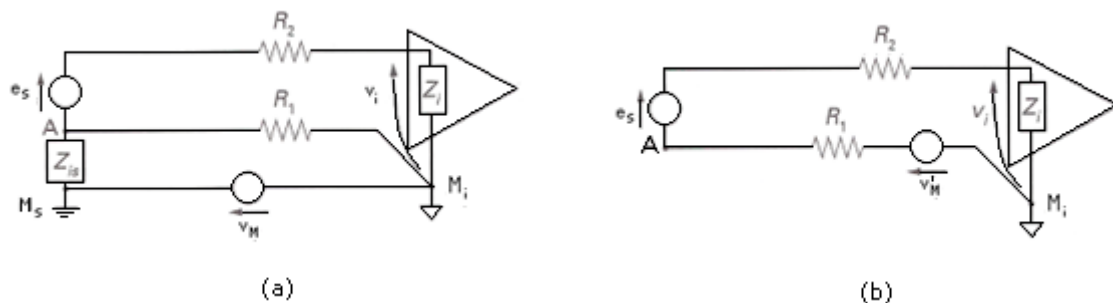


Figura 4.2 – Fonte isolada da sua massa local e instrumentação à entrada assimétrica: a) esquema eléctrico real; b) esquema eléctrico equivalente.

Blindagem

É necessária uma blindagem para assegurar a protecção da fonte e da ligação contra os campos eléctricos e electromagnéticos parasitas. A blindagem, tal como a fonte, deve estar ligada à massa M_i para minimizar a diferença de potencial parasita entre a fonte e a ligação em relação à blindagem. Podemos distinguir dois casos, dependendo da fonte estar directamente ligada à sua blindagem ou desta não estar isolada:

- fonte ligada à sua blindagem – a blindagem da fonte está ligada à blindagem do cabo de ligação à massa da instrumentação. Caso haja uma ligação capacitiva à blindagem, a corrente parasita i_p que percorre a blindagem de impedância Z_{bl} cria uma tensão parasita $v_p = Z_{bl} \cdot i_p$ que se junta ao sinal; quando a ligação é coaxial, a utilização de uma dupla blindagem (cabo triaxial) permite limitar este efeito;
- fonte isolada da sua blindagem – a fonte e as blindagens são ligadas à massa da instrumentação. A tensão de entrada do amplificador não é, neste caso, directamente afectada pela circulação de correntes parasitas sobre a blindagem.

4.1.2.2. Amplificador de entrada do tipo simétrica (diferencial)

Quando a tensão parasita v'_M desenvolvida pela diferença de potencial da massa v_M da montagem assimétrica arrisca não ser desprezável em relação ao sinal útil, ou quando o sinal é sobreposto por uma tensão de modo comum da instrumentação (caso de uma ponte de *Wheatstone*), torna-se necessário utilizar um amplificador diferencial, cuja função é atenuar pela sua taxa de rejeição, as tensões perturbadoras de modo comum.

Caso de uma fonte sem modo comum de instrumentação

A montagem geral é representada na figura 4.3. Suponha-se que a blindagem está ligada a M_i . Designa-se por Z_{bl} a impedância da blindagem entre o ponto A, ponto comum à fonte e à blindagem, e a massa M_i ; a tensão do ponto A, devida à diferença de potencial v_M é: $v_A = v_M \times Z_{bl} / Z_{is}$; esta é uma tensão de modo comum para o amplificador, e pode ser atenuada pela sua taxa de rejeição. Na verdade, a tensão da blindagem do cabo evolui entre v_A e 0 no ponto M_i : existe uma diferença de potencial entre o cabo e a sua blindagem que varia de 0 a v_A , existindo por consequência o risco de circulação sobre o cabo de uma corrente parasita. Este risco desaparece se a blindagem estiver ligada à saída da “bainha” do amplificador, devendo o seu potencial igualar o potencial de modo comum v_A , anulando toda a diferença de potencial devido a v_M entre o cabo e a sua blindagem.

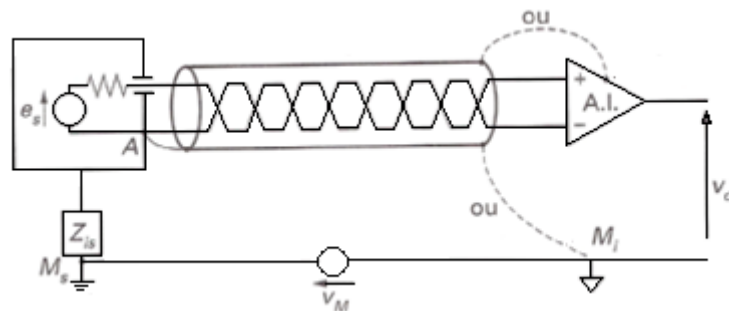


Figura 4.3 – Fonte isolada da sua massa local e instrumentação à entrada simétrica: montagem geral com blindagem na massa de instrumentação.

Caso de uma fonte com modo comum de instrumentação

Nos dispositivos de medida que utilizam os sensores resistivos, o condicionador associado é frequentemente uma ponte de *Wheatstone*, alimentada por uma tensão contínua E_a ligada à massa M_i da instrumentação. O sinal de medida é neste caso sobreposto por uma tensão de modo comum de instrumentação, que é igual a $E_a/2$, quando as quatro resistências estão em equilíbrio. O sensor está distante do ponto de ligação com a instrumentação e está isolado da massa local M_s , à qual está ligado pela impedância de isolamento Z_{is} , que é somada à diferença de potencial da massa v_M entre M_s e M_i .

Ponte de Wheatstone – Montagem com quatro resistências variáveis

Esta montagem é utilizada em particular nos sensores de força e de pressão, tal como as células de carga. É assim que, no caso de um sensor de pressão, as resistências variáveis (extensómetros) são coladas sobre um diafragma, em que as deformações são proporcionais à pressão a medir, iguais mas de sinais opostos aos pontos onde são implantadas duas resistências variáveis, situadas em dois ramos junto da montagem (montagem *push-pull*).

Os extensómetros são isolados do diafragma, sendo a impedância de isolamento o condensador de isolamento C_{is} ; entre o diafragma e a instrumentação à qual está ligada a ponte, há uma diferença de potencial da massa v_M (figura 4.4).

Para dar continuidade à simetria da montagem a tensão parasita diferencial é nula, continuando somente presente uma tensão parasita de modo comum:

$$v'_M \approx \frac{1}{2} \cdot \omega_M \cdot C_{is} \cdot R_0 \cdot v_M \quad [4.2]$$

Sendo R_0 a resistência de um extensómetro e ω_M a pulsação de v_M . Esta tensão parasita de modo comum é reduzida à saída do amplificador com base na sua taxa de rejeição à frequência da perturbação.

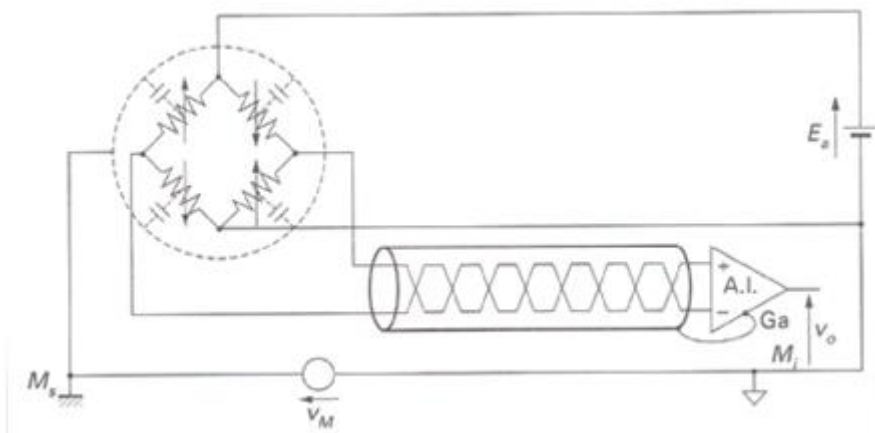


Figura 4.4 – Ponte de Wheatstone: montagem com 4 extensómetros activos.

4.1.3. Fonte ligada à sua massa local – Instrumentação isolada da ligação equipotencial à terra

Considere-se a configuração da figura 4.1 c, que é simétrica à estudada no parágrafo 4.1.2.2 em que a fonte do sinal está isolada de M_s , estando a instrumentação ligada a M_i . No presente caso, diz-se que a instrumentação é flutuante: o potencial de ligação do comum da instrumentação (linha 0 [V] isolada da terra) não é imposto *a priori*, mas é estabelecido pela ligação da instrumentação à fonte do sinal.

Enquanto a aparelhagem estiver limitada à sua instrumentação, tem-se um aparelho de medida autónomo (por exemplo, um voltímetro digital), estando geralmente os dados medidos visíveis. Quando a instrumentação for um elemento de um conjunto mais importante dos dispositivos ligados à massa M_i (ligação de rede equipotencial de terra), os dados adquiridos devem ser transferidos através de um barramento de isolamento apoiado, por exemplo, com um CAN à saída em série e uma ligação optoelectrónica.

Examine-se então a influência da diferença de potencial da massa sobre a medida e os meios permanentes de a reduzir.

Seja Z_{is} ($R_{is} // C_{is}$) a impedância de isolamento entre a instrumentação e a massa M_i , geralmente a ligação de terra do laboratório ou da sala de controlo (figura 4.5 b), onde:

- a f.e.m. equivalente é $v'_M = v_M \cdot R_1/Z_{is}$;
- a impedância interna equivalente é R_1 .

Daqui resulta que a tensão v_i nos bornes da resistência de entrada R_i ($R_i \gg R_1, R_2$) é:

$$v_i = e_s + v'_M \quad [4.3]$$

Sendo o termo perturbador $v'_M = v_M \cdot R_1/Z_{is}$

A perturbação é tanto mais fraca quanto a impedância de isolamento seja mais elevada. Contudo, como visto anteriormente, o termo perturbador arrisca não ser desprezável desde que o sinal seja muito fraco ou que a impedância de isolamento diminua devido à perturbação ou à presença de frequências elevadas na diferença de potencial de massa.

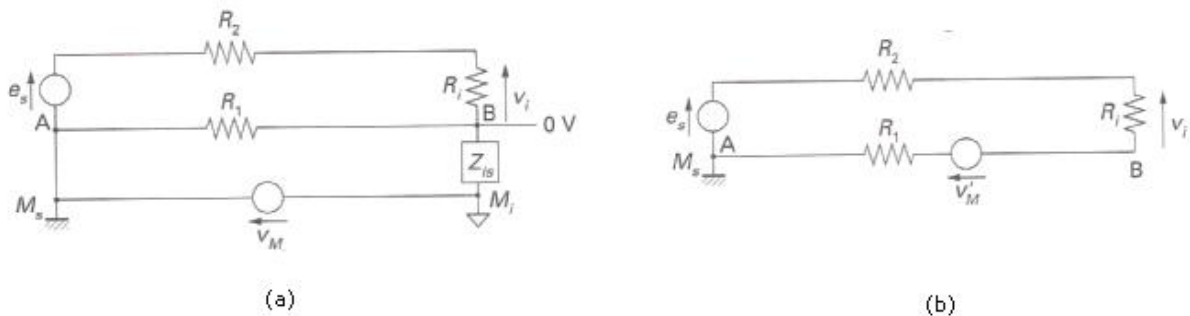


Figura 4.5 – Fonte ligada à sua massa local à qual está ligada uma instrumentação flutuante: a) esquema eléctrico; b) esquema equivalente.

4.1.3.1 Circuito de protecção

Na montagem anterior o termo perturbador é devido à diferença de potencial desenvolvida aos terminais de R_i pela corrente de massa $i_M \cong v_M/Z_{is}$ que percorre a impedância de isolamento. Esta corrente pode ser significativamente reduzida pela minimização da diferença de potencial aplicada aos terminais de Z_{is} . Este resultado pode ser obtido utilizando um segundo

isolamento Z'_{is} em série com Z_i e ligando o seu ponto comum G_a designado como protecção à massa M_s (figura 4.6 a). Nestas condições a aplicação do teorema de *Thévenin* faz-se sucessivamente:

- entre A e G_a : f.e.m. equivalente: $v'_M = v_M \cdot R_3 / Z'_{is}$;
Impedância equivalente: R_3 , com $R_3 \ll Z'_{is}$;
- entre A e B: f.e.m. equivalente: $v''_M = v'_M \cdot R_1 / Z_{is}$;
Impedância equivalente: R_1 , com $R_1 \ll Z_{is}$;

A tensão de entrada v_i nos terminais de R_1 é mantida: $v_i = e_s + v''_M$, onde o termo perturbador v''_M tem a expressão:

$$v''_M = v_M \cdot \frac{R_3}{Z'_{is}} \cdot \frac{R_1}{Z_{is}} \quad [4.4]$$

Desta expressão resulta que a utilização de uma protecção é susceptível de induzir uma redução considerável da tensão perturbadora.

4.1.3.2. Blindagem

A instrumentação é colocada no interior de uma primeira blindagem ligada à protecção G_a ; a ligação da protecção à massa M_s da fonte é assegurada pela blindagem do cabo, não havendo praticamente diferença de potencial entre a blindagem de protecção e a instrumentação interior. A blindagem de protecção é colocada no interior de uma segunda blindagem chamada blindagem externa e que, por razões de segurança é ligada à terra da instalação. Entre a blindagem de protecção e a blindagem externa é colocada a impedância de isolamento Z'_{is} (figura 4.6 b).

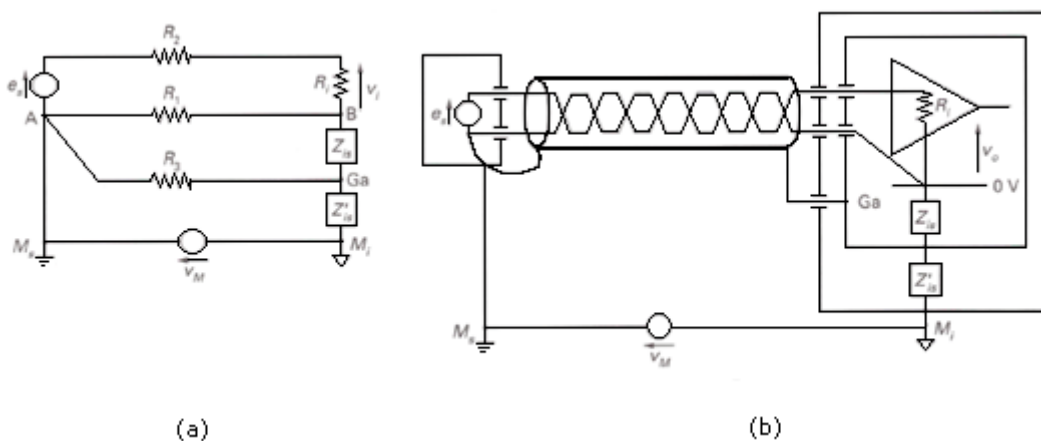


Figura 4.6 – Circuito de protecção: a) esquema eléctrico; b) Ligação das blindagens.

4.1.4. Fonte e instrumentação ligadas a duas massas distintas

Entre a massa M_s da fonte e a massa M_i da instrumentação, há normalmente uma diferença de potencial de massa v_M . Se for usado um amplificador assimétrico, essa diferença de potencial v_M aparecerá em série com o sinal e_s e irá perturbar a medição (figura 4.1 a).

Neste caso, há dois procedimentos que podem ser aplicados:

- utilizar um amplificador diferencial, de modo a que o sinal e_s apareça como um sinal diferencial e a tensão v_M como uma tensão de modo comum, que será assim reduzida em série com o amplificador com base na sua taxa de rejeição de modo comum; o valor máximo da tensão de modo comum aplicável a um amplificador de instrumentação é da ordem de 10 [V], porém, certas montagens com amplificador diferencial autorizam tensões de modo comum de várias centenas de volts;
- criar um isolamento galvânico entre uma parte da fonte do sinal (e eventualmente da electrónica associada) ligada à massa M_s e outra parte da instrumentação ligada à massa M_i . Nestas condições, os circuitos fonte e instrumentação passam a ter os funcionamentos electricamente independentes e a transferência do sinal e_s realiza-se da fonte para a instrumentação independentemente da diferença de potencial da massa v_M . Os dispositivos a utilizar para realizar esta operação são um amplificador de isolamento, um dispositivo de ligação optoelectrónico e um condensador volante.

4.1.4.1. Utilização de um amplificador diferencial

A montagem com um amplificador de instrumentação é representada na figura 4.7 a. Supondo que as vias de entrada estão em equilíbrio:

$$R_1 = R_2 = R \quad e \quad Z_{mc} \gg R$$

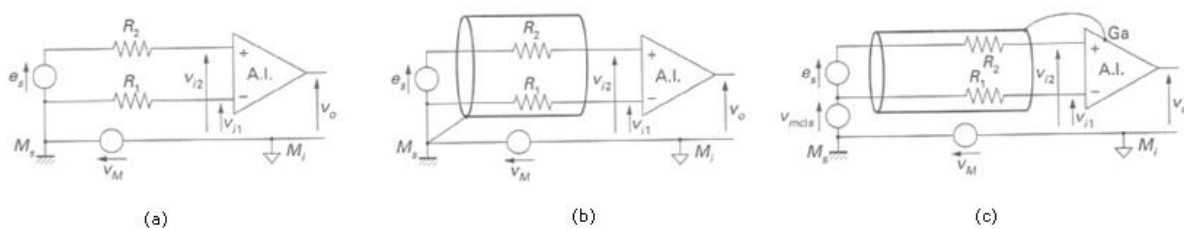


Figura 4.7 – Amplificador de instrumentação: a) montagem de base; b) blindagem ligada à massa M_s da fonte de sinal; c) utilização da protecção do amplificador no caso de uma tensão de modo comum de instrumentação.

Tem-se:

$$v_{i1} = v_M, \quad v_{i2} = e_s + v_M, \quad v_{d)i} = v_{i2} - v_{i1} = e_s, \quad v_{mc)i} = (v_{i2} + v_{i1})/2 \approx v_M,$$

$$v_o = G_d \cdot \left(e_s + \frac{1}{\tau_r} \cdot v_M \right) \text{ na condição que } |v_M| < 10[V].$$

G_d e τ_r são respectivamente o ganho diferencial e a taxa de rejeição do amplificador.

Protecção de oposição aos campos parasitas

A protecção contra os campos magnéticos é obtida pela torção dos fios de ligação.

A protecção contra os campos eléctricos e electromagnéticos é realizada pela blindagem da fonte e dos fios de ligação, estando as blindagens ligadas somente à massa da fonte de sinal, de modo a evitar toda a diferença de potencial devido a v_M entre a blindagem e os fios de ligação (figura 4.7 b). Enquanto o sinal da fonte for sobreposto por uma tensão de modo comum $v_{mc)s}$, em relação a M_s (figura 4.7 c), é destacado ligar a blindagem dos cabos à saída da protecção do amplificador.

Caso das tensões de modo comum elevadas

Enquanto a tensão de modo comum ultrapassar 10 [V] em valor absoluto, o amplificador de instrumentação não pode ser utilizado. Podemos contudo utilizar um amplificador de isolamento, sendo este um amplificador diferencial especialmente concebido para suportar tensões de modo comum elevadas. Este tipo de amplificador (figura 4.8 a) existe na forma integrada (Burr Brown INA 117).

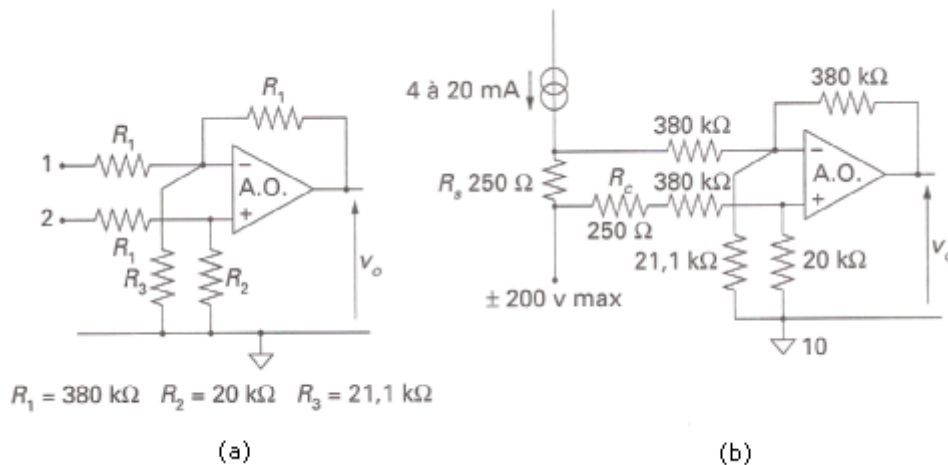


Figura 4.8 – Amplificador diferencial com modo comum elevado: a) esquema; b) equilíbrio das vias [1].

Para os valores indicados das resistências, a tensão de modo comum máxima aplicável nas entradas 1 e 2 do amplificador diferencial é de +/- 200 [V]. Esta corresponde a uma tensão de modo comum nas entradas do amplificador operacional de +/- 10 [V]. O ganho diferencial é igual a 1 e a taxa de rejeição de modo comum, função da junção das resistências é de pelo menos 80 [db] a 60 [Hz], enquanto a resistência R_s da fonte for fraca, inferior a 20 [Ω]; caso contrário, a taxa de rejeição é mantida para estabilização do equilíbrio das vias por uma resistência de compensação R_c igual a R_s (figura 4.8 b).

4.1.4.2. Isolamento galvânico entre a fonte de sinal e a instrumentação

Amplificador de isolamento

Este tipo de amplificador é formado por dois estágios: o estágio de entrada A_1 e o estágio de saída A_2 . As suas tensões de alimentação e as suas referências de tensão são totalmente independentes devido à barreira de isolamento que as separa.

O estágio de entrada tem como referência de tensão a massa M_s de sinal enquanto o estágio de saída está ligado à massa M_i da instrumentação.

A transferência do sinal realiza-se do estágio de entrada A_1 para o estágio de saída A_2 através da barreira de isolamento, tanto por ligação óptica, como por um transformador de isolamento.

As blindagens da fonte e da ligação ao amplificador A_1 devem ser ligadas à massa M_s da fonte (figura 4.9). Enquanto o próprio amplificador é blindado, o seu estágio de entrada A_1 possui uma blindagem ligada a M_s pela ligação à blindagem do cabo, enquanto que a blindagem do estágio de saída é ligada à massa de instrumentação M_i .

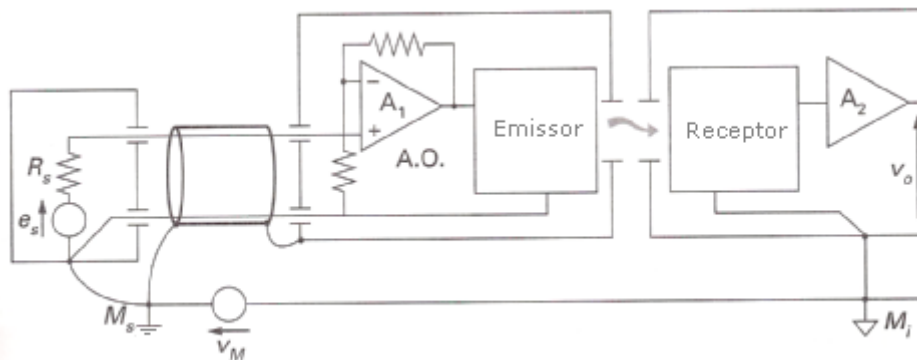


Figura 4.9 – Amplificador de isolamento: Ligação das blindagens.

Se o sinal e_s for sobreposto a uma tensão de modo comum em relação a M_s , o estágio de entrada do amplificador de isolamento é precedido por um amplificador de instrumentação cuja função é eliminar a tensão de modo comum pela sua taxa τ_r para apresentar, à entrada do amplificador A_1 , uma tensão ligada à sua própria massa.

Ligação optoelectrónica

Um dispositivo de ligação optoelectrónico é formado pela associação de um díodo emissor de luz (LED) e de um fotodetector (fotodíodo ou fototransistor) que é o receptor da luz emitida pelo LED. Entre o emissor e o receptor de luz, uma barreira de isolamento assegura a independência eléctrica dos circuitos ligados ao emissor num dos lados, e ao receptor no outro lado. A diferença de potencial máxima aplicável entre estes circuitos é da ordem de kV.

O circuito eléctrico associado à fonte de sinal comanda a corrente I_1 no LED, determinando o fluxo óptico Φ emitido; este fluxo recebido pelo fotodetector é convertido numa corrente I_2 que corresponde ao sinal transmitido através da barreira de isolamento. O ganho de corrente I_2/I_1 não é em geral constante mas depende de I_1 : resulta que a ligação não é linear e que está mal adaptada à transferência de sinais analógicos. Pelo contrário, comporta-se bem na transferência de sinais binários de onde resulta a necessidade de converter anteriormente o sinal analógico entregue pela fonte.

São possíveis de utilizar dois procedimentos de conversão: a conversão tensão-frequência (CVF) e a conversão analógica-numérica (CAN) na saída série.

Conversão analógico-numérica na saída série

A montagem da cadeia de aquisição onde o elemento final é o CAN é ligada à massa M_s da fonte de sinal, ficando o projectista encarregado da exploração do sinal ligado a uma massa M_i . A transferência em paralelo dos dados numéricos sobre n bits exige n vias com um opto-isolador em cada uma; o CAN em série à saída permite essa transferência numa só via utilizando um só opto-isolador. Os dados transmitidos são recebidos num registo com entrada série e saída paralelo. Muitos outros opto-isoladores são contudo necessários de modo a assegurar em particular a transferência do sinal de relógio e do comando de conversão.

4.2. Filtros

O sinal de medida, suporte de informação captada, é caracterizado pelo seu espectro de frequências; vamos definir o espectro útil pela junção de frequências, limitado superiormente pela frequência alta f_h , necessária para uma transmissão apropriada da informação.

A função do filtro é eliminar tanto quanto possível o conjunto de frequências externas no espectro útil do sinal a tratar e, em particular, sinais não desejados, perturbações industriais e ruído de fundo. Esta função é indispensável para evitar o afastamento no espectro útil de frequências indesejáveis, desde que os sinais devam ser modelados.

O filtro é normalmente do tipo passa-baixo, estando a sua banda passante limitada ao mínimo imposto pelo espectro útil do sinal de medida.

4.2.1. Tipos de filtros

A função de transferência ou ganho de um filtro passa-baixo pode ser escrita na forma:

$$G(\omega) = \frac{G_0}{A(\omega)} \quad [4.5]$$

Onde $A(\omega)$ é a atenuação induzida pelo filtro à pulsação ω . Por outro lado, temos que $A(0)=1$, sendo G_0 o ganho em tensão do filtro em estado contínuo.

4.2.1.1. Famílias de filtros

No caso dos filtros polinomiais frequentemente utilizados, $A(\omega)$ é um polinómio de ordem k que define a ordem do filtro.

Quando k é par, $A(\omega)$ pode ser obtido sob a forma de um produto de termos quadráticos, tendo, considerando $p=j \omega$:

$$A(p) = \left[a_1 \left(\frac{p}{\omega_0} \right)^2 + b_1 \frac{p}{\omega_0} + 1 \right] \dots \left[a_j \left(\frac{p}{\omega_0} \right)^2 + b_j \frac{p}{\omega_0} + 1 \right] \quad \text{com } j = k/2$$

Quando k é ímpar, a função $A(p)$ contém ainda um factor de primeiro grau da forma: $[a_0 p / \omega_0 + 1]$.

Destas expressões deduz-se um modelo de síntese dos filtros:

- um filtro de ordem k par ($k=2j$) é feito pela junção em cascata de j filtros de ordem 2, cada um correspondente a um dos termos quadráticos;
- um filtro de ordem k ímpar ($k=2j + 1$) é feito pela junção em cascata de j filtros de ordem 2 e de um filtro de ordem 1.

Quanto mais elevada for a ordem k de um filtro, mais próxima está a sua função de transferência da de um filtro ideal; quanto mais elevado for k mais complexa é a sua realização.

As diversas famílias de filtros têm o nome dos polinómios utilizados para definir a sua atenuação $A(\omega)$.

Os *filtros de Butterworth* são caracterizados, para uma dada ordem k , pela resposta mais uniforme na banda passante (figura 4.10 a). O módulo de atenuação de um filtro passa-baixo de ordem k tem a expressão:

$$|A(f)| = \sqrt{1 + (f/f_0)^{2k}} \quad [4.6]$$

Os *filtros de Chebychev* apresentam, para uma dada ordem k , a separação mais limpa entre a banda passante e a banda atenuada; na banda passante, eles têm contudo uma resposta que varia k vezes (sendo k a ordem do filtro), entre um máximo e um mínimo. Quanto maior a amplitude desta oscilação, mais linear é o corte entre a banda passante e a banda atenuada (figura 4.10 b). O módulo da atenuação de um filtro passa-baixo de ordem k tem a expressão:

$$|A(f)| = \sqrt{1 + a^2 \cdot C_k^2(f/f_0)} \quad [4.7]$$

Onde $C_k(f/f_0)$ representa o *polinômio de Chebychev* de ordem k que, para $0 \leq f \leq f_0$, varia k vezes entre 0 e 1; o parâmetro a determina a amplitude da variação de $|A(f)|$ na banda passante.

Os *filtros de Bessel* têm a vantagem de ter, na banda passante e para uma dada ordem k , os tempos de transmissão mais constantes; isto resulta numa minimização da distorção de fase que se traduz, em particular, para uma deformação mínima dos sinais complexos impulsionados (figura 4.10 c). Os tempos de transmissão têm a expressão: $\tau_t = d\phi/d\omega$. No caso da banda passante τ_t ser praticamente constante, tem-se que $\phi \cong \omega \tau_t$.

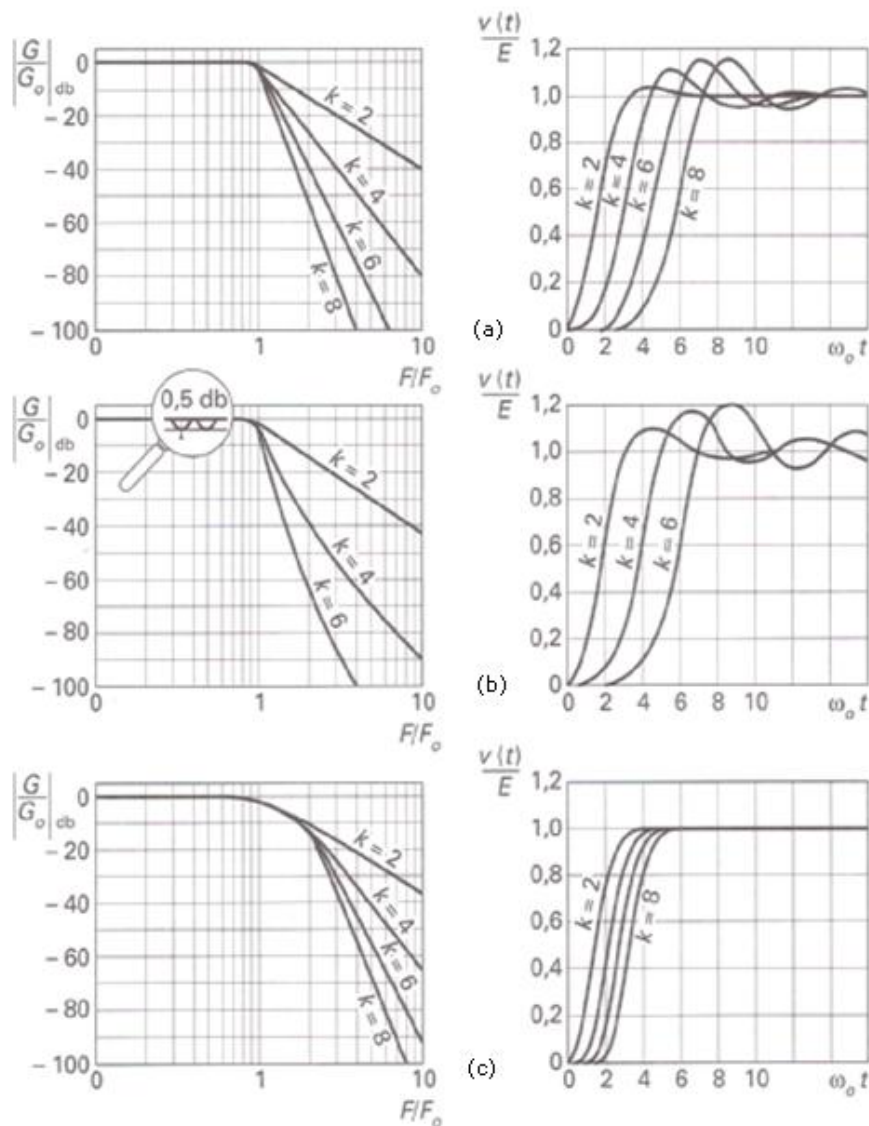


Figura 4.10 – Respostas normalizadas dos principais tipos de filtros passa-baixo em função da frequência (sinal sinusoidal) e em função do tempo (sinal escalar de amplitude E). a) Butterworth; b) Chebychev (ondulação 0,5 db); c) Bessel.

Considere-se um sinal complexo aplicado à entrada do filtro:

$$v_i(t) = \sum a_i \cdot \cos(\omega_i t + \Psi_i)$$

As componentes do sinal estão na banda passante do filtro, pelo que temos à saída:

$$v_o = G_o \cdot \sum a_i \cdot \cos(\omega_i t + \Psi_i - \varphi_i)$$

Desde que $\varphi_i = \omega_i \tau_t$, podemos escrever:

$$v_o = G_o \cdot \sum a_i \cdot \cos(\omega_i(t - \tau_t) + \Psi_i) = G_o \cdot v_i(t - \tau_t) \quad [4.8]$$

Verifica-se assim que o filtro introduz sob o sinal um atraso temporal τ_t .

4.2.1.2. Métodos de realização

Distinga-se entre os filtros entre passivos, activos e de condensadores comutados.

Os *filtros passivos* são constituídos em média somente por resistências, indutâncias (bobines) e condensadores. São muito utilizados para a filtragem antiparasita das linhas de alimentação e de um modo geral para filtragem a alta frequência, tendo em contrário, a baixas frequências, o inconveniente de utilizar indutâncias importantes, demasiado elevadas e caras.

Os *filtros activos* utilizam para a sua implementação resistências, condensadores e amplificadores. Nestes não se utilizam, geralmente, bobines (indutâncias). Adaptam-se perfeitamente ao domínio das baixas e muito baixas frequências, estando a sua utilização em altas frequências limitada pelo comportamento dinâmico do amplificador operacional. Um amplificador operacional e as impedâncias associadas permitem realizar um filtro de ordem 1 ou 2. A junção em cascata de células deste tipo permite à priori a realização de filtros de qualquer ordem k .

Na figura 4.11 são representadas diversas estruturas utilizadas para a realização de células passa-baixo de segunda ordem. A função de transferência ou ganho $G(p)$ de uma célula passa-baixo de segunda ordem tem uma expressão geral da forma:

$$G(p) = \frac{G_0}{A(p)} = \frac{G_0}{\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2 + \frac{1}{Q} \cdot \frac{p}{\omega_0} + 1} \quad (p = j\omega) \quad [4.9]$$

Sendo G_0 o ganho estático, ω_0 a pulsação de captação e Q o coeficiente de qualidade, sendo estes determinados pelas resistências e condensadores utilizados. A estabilidade das suas

características exige a utilização de componentes em que as derivas, térmicas em particular, sejam mínimas: resistências em película metálica, condensadores em polímero dieléctrico.

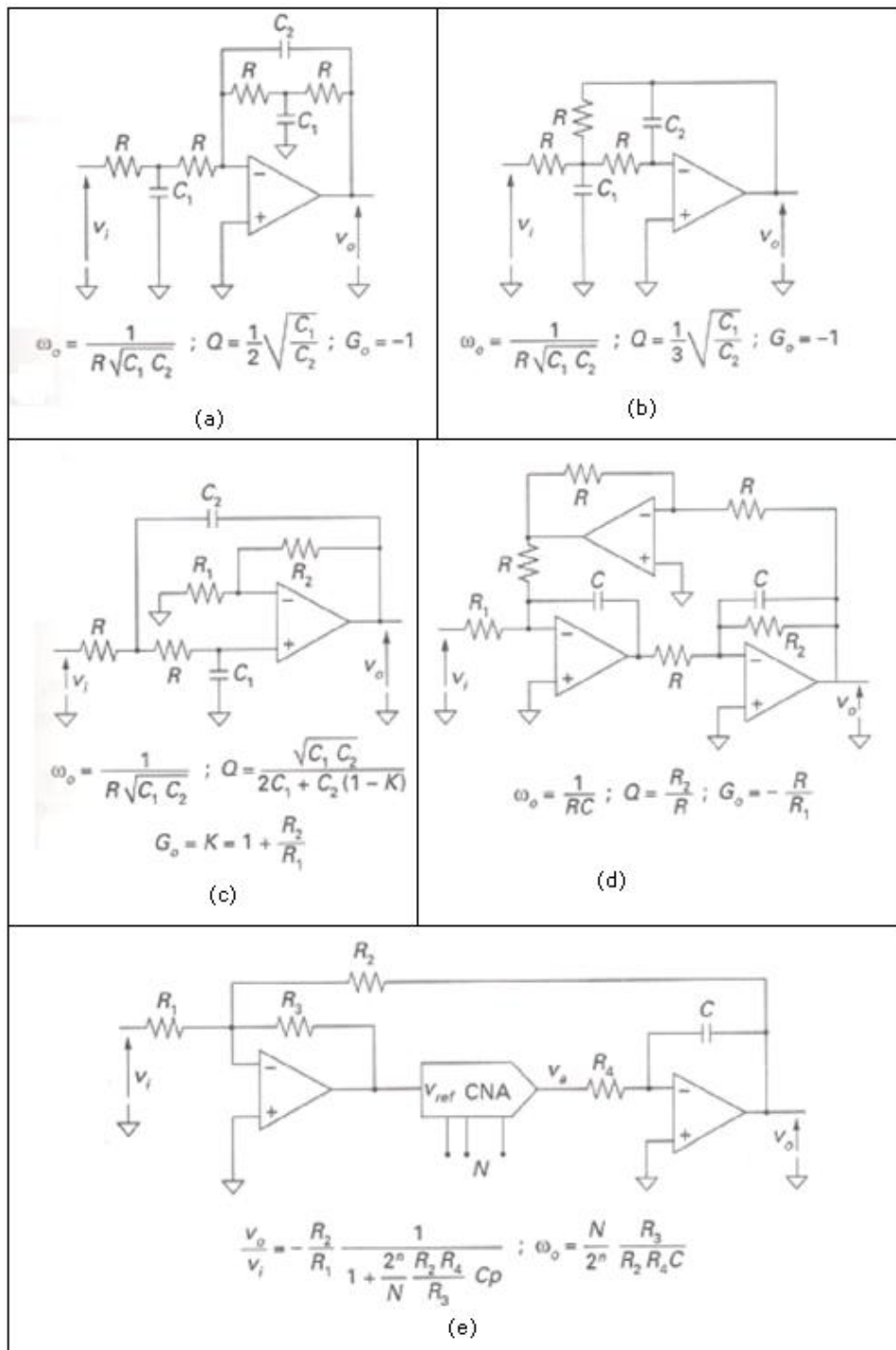


Figura 4.11 – Estruturas de filtros activos passa-baixo: a) de contra-reação simples; b) de contra-reação múltipla; c) de amplificador de ganho controlado (Sallen Key); d) de estado variável; e) de comando numérico.

As características de uma célula passa-baixo, em particular a pulsação de captação ω_0 , podem em princípio ser alteradas pela comutação de resistências ou condensadores, mas o número de componentes a comutar torna-se especialmente importante à medida que a ordem do filtro aumenta. A pulsação de captação pode então ser seleccionada numericamente por uma palavra binária N de n bits, permitindo a escolha de uma pulsação entre 2^n : a realização exige a utilização de conversores numéricos analógicos (figura 4.11 e).

Os *filtros de condensadores comutados* simulam as resistências dos filtros com apoio dos condensadores comutados, sendo a sua montagem *standard* representada na figura 4.12 a.

Na posição 1 do comutador, o condensador C_0 transporta a carga: $Q_1=C_0.v_1$; na posição 2, a carga transportada é $Q_2=C_0.v_2$. Quando o comutador passa da posição 1 para a posição 2, a carga transferida de 1 para 2 é:

$$\Delta Q = C_0 \cdot (v_1 - v_2)$$

O comutador ao efectuar f_c comutações por segundo, a carga transferida, ou seja, a corrente I que passa de 1 para 2, tem a expressão:

$$I = \Delta Q \cdot f_c = C_0 \cdot f_c \cdot (v_1 - v_2)$$

Esta montagem é equivalente a uma resistência $R = \frac{1}{C_0 \cdot f_c}$.

A resistência R , associada ao condensador C_1 (figura 4.12 b), define uma frequência própria f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R C_1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{C_0}{C_1} \cdot f_c \quad [4.10]$$

Os filtros de condensadores comutados têm geralmente a estrutura de filtros com estados variáveis (figura 4.11 b), sendo as resistências dos integradores realizadas por condensadores comutados.

A expressão de f_0 põe em evidência o interesse desta montagem:

- facilidade de regulação da frequência de corte f_0 na média da sua frequência de comutação f_c ;
- estabilidade do funcionamento devido a C_0 e C_1 serem da mesma tecnologia, geralmente integrados, o seu comportamento é relativamente independente das derivas individuais.

A razão f_c/f_0 tem, de acordo com as montagens, valores de 50 a 100. A frequência de comutação f_c é limitada inferiormente devido às correntes remanescentes dos interruptores que, em períodos T_c longos, tendem a perturbar de forma considerável a carga do

condensador; do mesmo modo, para valores altos de f_c , é a constante de tempo de carga e descarga do condensador C_0 que limita a precisão do filtro.

Do facto de se utilizar um relógio com uma frequência f_c para gerar os sinais de comando dos comutadores, há o risco de haver à saída do filtro uma perturbação com essa frequência.

Por outro lado, o filtro com condensadores comutados efectua uma amostragem do sinal com uma frequência f_c , havendo risco de afastamento de sinais parasitas do espectro útil. Se por exemplo $f_c = 100$ kHz em presença de uma perturbação de frequência $f_p = 99$ kHz, a frequência parasita devolve $f_c - f_p = 1$ kHz, que é susceptível de alterar o espectro útil do sinal tratado. Caso se verifique uma situação destas, a utilização de um simples filtro RC, anterior a um filtro de condensadores comutados, arrasta normalmente a um enfraquecimento suficiente da perturbação de frequência f_p , para a amplitude da perturbação que não afecta o espectro útil.

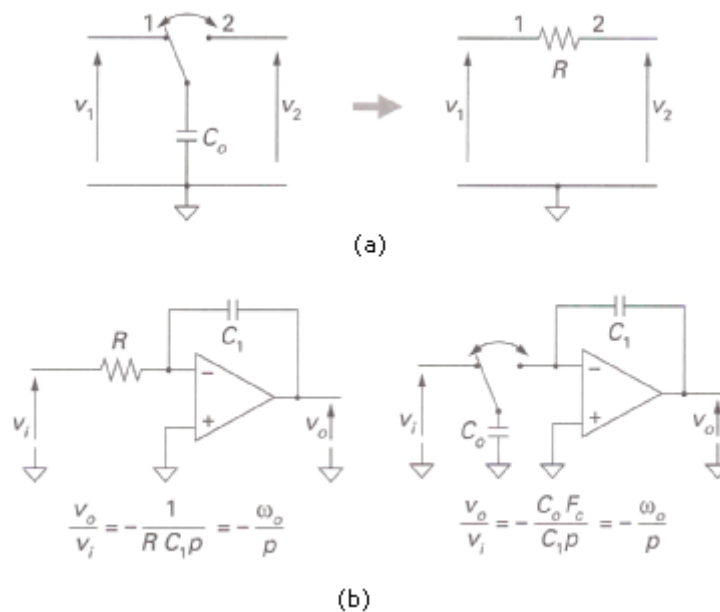


Figura 4.12 – Filtro de condensadores comutados: a) princípio de simulação de uma resistência por condensador comutado; b) integrador clássico e seu equivalente de condensador comutado.

4.2.2. Condições impostas e parâmetros do filtro

Os parâmetros do filtro – ordem k e frequência f_0 , limitadora da banda passante – podem ser determinados a partir de condições impostas:

- uma condição sobre a regularidade da banda passante;
- uma condição sobre o enfraquecimento na banda atenuada.

4.2.2.1. Condição relativa à banda passante

De modo a evitar uma deformação do sinal útil na banda passante, não é necessário que a atenuação das diversas frequências que o constituem seja muito diferente. Seja ε_1 a variação relativa máxima tolerável do ganho do filtro no espectro útil. A redução do ganho é tanto mais importante a uma frequência f_h quanto mais alto estiver o espectro útil, pelo que:

$$\frac{G(f_h)}{G_0} \geq 1 - \varepsilon_1 \text{ para: } \frac{G_0 - G(f_h)}{G_0} \leq \varepsilon_1 \text{ com } G(f) = \frac{G_0}{A(f)}$$

De onde:

$$A(f_h) \leq \frac{1}{1 - \varepsilon_1} \cong 1 + \varepsilon_1 \quad [4.11]$$

- caso filtro de *Butterworth*: a condição anterior escreve-se: $\sqrt{1 + \left(\frac{f_h}{f_0}\right)^{2k}} \leq 1 + \varepsilon_1$

De onde se retira:

$$\left(\frac{f_h}{f_0}\right)^{2k} \leq 2\varepsilon_1 \text{ para } f_h \ll f_0 \quad [4.12]$$

- caso de um filtro de *Chebyshev*. A condição [4.11] escreve-se:

$$\sqrt{1 + a^2 \cdot C_k^2} \leq 1 + \varepsilon_1 \text{ para a banda passante } -1 \leq C_k \leq 1$$

De onde se retira:

$$a \leq \sqrt{2\varepsilon_1}$$

4.2.2.2. Condição relativa à banda atenuada

Considere-se uma perturbação em que a amplitude é E_p e cuja frequência f_p é para além do espectro útil do sinal de medida. Impondo ao filtro uma redução da amplitude dessa perturbação na fracção ε_2 de amplitude E_s do sinal de medida de frequência f_s :

$$G(f_p) \cdot E_p \leq \varepsilon_2 G(f_s) \cdot E_s$$

Estando o sinal de medida na banda passante $G(f_s) \cong G_0$, a equação escreve-se da forma:

$$\frac{E_p}{A(f_p)} \leq \varepsilon_2 E_s \quad \text{sendo } A(f_p) \geq \frac{E_p}{E_s} \cdot \frac{1}{\varepsilon_2}$$

Em geral $E_p < E_s$, se bem que a inequação anterior pode ser substituída pela condição mais crítica:

$$A(f_p) \geq \frac{1}{\varepsilon_2} \quad [4.13]$$

No caso do filtro de *Butterworth*, a condição anterior escreve-se da forma:

$$\sqrt{1 + (f_p/f_0)^{2k}} \geq \frac{1}{\varepsilon_2} \quad \text{onde } f_p > f_0$$

Podendo-se assim deduzir:

$$(f_p/f_0)^{2k} \geq \frac{1}{\varepsilon_2^2} \quad [4.14]$$

4.2.2.3. Síntese. Caso do filtro de Butterworth

As relações [4.12] e [4.14] podem-se escrever:

$$(f_p/f_h)^{2k} \geq \frac{1}{2\varepsilon_1\varepsilon_2^2} \quad [4.15]$$

Esta última relação permite determinar a ordem mínima k do filtro necessário para satisfazer as condições impostas:

$$k \geq \frac{-\lg(2\varepsilon_1\varepsilon_2^2)}{2\lg(f_p/f_h)} \quad [4.16]$$

Conhecendo k nas relações [4.12] e [4.14], permite determinar uma frequência de corte f_0 que deve satisfazer as duas desigualdades:

$$f_0 \geq \frac{f_h}{\sqrt[2k]{2\varepsilon_1}} \quad \text{e} \quad f_0 \leq f_p \cdot \sqrt[k]{\varepsilon_2}$$

4.2.3. Relação entre a ordem do filtro, precisão e frequência de amostragem

Seja um sinal parasita de frequência f_p superior à frequência de Nyquist $f_N = f_e / 2$, onde f_e representa a frequência de amostragem. Este sinal, caso não esteja filtrado, dará por réplica no espectro útil um sinal de frequência $f_e - f_p$ e de amplitude E_p .

Se antes da amostragem houver filtragem, a amplitude do sinal de frequência f_p será igual à fracção ε_2 do sinal útil desde que seja satisfeita a condição [4.13]:

$$A(f_p) \geq 1/\varepsilon_2$$

Que no caso do filtro de *Butterworth* tem a forma [6.62]:

$$(f_p/f_0)^{2k} \geq \frac{1}{\varepsilon_2^2}$$

Sabendo que $f_p > f_N$, a condição anterior será satisfeita se:

$$(f_N/f_0)^{2k} \geq \frac{1}{\varepsilon_2^2} \quad [4.17]$$

A condição [4.17] juntamente com a condição [4.12] permite verificar que:

$$(f_N/f_0)^{2k} \geq \frac{1}{2\varepsilon_1\varepsilon_2^2}$$

Sendo:

$$f_N \geq \frac{f_h}{\sqrt[2k]{2\varepsilon_1\varepsilon_2^2}} \quad \text{ou} \quad f_e \geq \frac{2f_h}{\sqrt[2k]{2\varepsilon_1\varepsilon_2^2}}$$

Sendo conhecido o valor f_h da frequência alta do espectro, os valores de ε_1 e ε_2 são fixados pelas condições de precisão analisadas; o valor mínimo da razão f_e/f_h não depende da ordem k do filtro – tabela 4.1. Esta razão diminui e pode ir até 2 (Teorema de *Shannon*) quando k aumenta e o filtro tenda para um filtro passa-baixo ideal ($k : \infty$).

Na prática, é necessário ter em conta que:

- uma frequência f_e elevada obriga a um conversor analógico numérico rápido, logo mais caro, e de velocidades de transmissão de dados elevada;
- a complexidade e logo o custo do filtro aumentam com k .

A escolha da ordem k do filtro resulta de um compromisso entre o abaixamento da frequência f_e que implica um crescimento de k e a menor complexidade do filtro que requer uma redução de k .

Tabela 4.1 – Razão f_e/f_h em função da ordem k do filtro e da precisão ε necessária ($\varepsilon=\varepsilon_1=\varepsilon_2$).

k	$\varepsilon = 10^{-1}$	$\varepsilon = 10^{-2}$	$\varepsilon = 10^{-3}$
1	45	1400	4500
2	9,5	54	298
3	5,6	17,5	56
4	4,3	10,2	24
5	3,7	7,5	14,8
6	3,3	6	10,6
7	3,1	5	8,3
8	2,9	4,6	7,0
9	2,8	4,1	6,0
10	2,7	3,8	5,4
...			
20	2,3	2,7	3,3
∞	2,0	2,0	2,0

4.3. Nota Conclusiva

Neste capítulo foram estudados os métodos e técnicas de minimização das perturbações que afectam os circuitos electrónicos, com vista a reduzir estes fenómenos que afectam os circuitos utilizados na máquina de ensaio de amortecedores.

Assim, está-se em condições de implementar os filtros adequados, e fazer alterações nos circuitos de instrumentação com vista à minimização do ruído e perturbações que afectam a qualidade dos sinais. Estas alterações serão apresentadas no capítulo seguinte.

Referências

- [1] G. Asch, *Acquisition de données – Du capteur à l'ordinateur*, Dunod, Paris – França, 1999.
- [2] H. W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, 2ª Edição, John Wiley & Sons, Inc, Nova Iorque – Estados Unidos da América, 1998.
- [3] M. Brown, M. Barnes, and G. Vijayaraghavan, *Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*, Elsevier, Oxford - Reino Unido, 2004.

Capítulo

5

Alterações ao Projecto Electrónico

A instrumentação anteriormente aplicada na máquina de ensaio de amortecedores não previa o ruído emitido pelas várias fontes utilizadas. Após o estudo realizado nos capítulos anteriores, serão desenvolvidos novos circuitos de instrumentação, com o objectivo de minimizar o ruído e perturbações existentes, e ainda para permitir implementar as normas de segurança na máquina, com vista à sua certificação. São ainda introduzidas novas funcionalidades a esta, para uma maior precisão dos resultados obtidos.

5.1. Revisão do Projecto Electrónico

O projecto electrónico apresentado em [1], realizado para a máquina de ensaio de amortecedores existente, consiste em várias etapas, começando com a selecção dos aparelhos electrónicos a usar, uns para medição de parâmetros, outros para controlo, explicação do seu funcionamento em geral, e da aplicação específica que têm na referida máquina, abordando-se ainda o microcontrolador usado.

Os equipamentos atrás referidos serão periféricos (de entrada e de saída) do microcontrolador, pois é este que controla o funcionamento de todo o sistema, recebendo dados do PC para realizar os ensaios, e devolvendo os valores que os aparelhos irão medir. Os programas, tanto de controlo do microcontrolador como do tratamento de dados são abordados no capítulo seguinte, pelo que neste capítulo presta-se mais atenção à ligação dos aparelhos ao microcontrolador (*hardware*), o que irá servir para entender o programa de controlo de dados, posteriormente descrito.

Foi projectada em [1] toda a instrumentação (*hardware*) usada para ligar todos os aparelhos ao microcontrolador, bem como as fontes de alimentação para todos os equipamentos electrónicos. Apresentou-se também o projecto da placa de circuito impresso, com todos os blocos de instrumentação necessários, sendo esta responsável por alimentar os aparelhos e acondicionar todos os sinais (analógicos e digitais) para entrar no microcontrolador.

Começando pelo variador electrónico de velocidade (VEV), o qual, como o próprio nome indica, tem como função controlar electronicamente a velocidade do motor, através do controlo da frequência a que este irá rodar, a sua selecção está directamente relacionada com a selecção do motor eléctrico, pois após dimensionado o motor, o seu fabricante (WEG) indica qual o variador de frequência a usar. Somente se pode escolher qual o tipo de controlo a usar, que pode ser de vários tipos, sendo o mais simples o HMI (*Human-Machine Interface*), em que o utilizador escolhe num *display* a frequência pretendida para o motor. Contudo, este método de controlo não é o mais apropriado, pois pretende-se que o utilizador da máquina controle os ensaios somente a partir do computador, simplesmente escrevendo os valores das velocidades a que pretende que o motor rode. Assim, teve de se optar por outro tipo de controlo, usando-se uma ligação para comunicação *série* RS-232 com o PC, sendo este um dispositivo opcional disponibilizado pela WEG. No entanto, como já foi referido, pretende-se que todo o sistema seja controlado por um microcontrolador, e não directamente pelo PC. Analisando as funções especiais do variador de frequência da WEG, verificou-se que este possui um módulo de controlo com ligação RS-232, sendo esta uma das ligações permitidas pelo microcontrolador MSP430 da *Texas Instruments*. Verificou-se que com este microcontrolador conseguia-se comunicar com o variador electrónico de frequência, sendo no entanto este tipo de comunicação algo complexa, requerendo um estudo aprofundado. Todo o estudo para controlar o VEV é apresentado em [1].

O microcontrolador utilizado no projecto foi o MSP430 F449 STK2 da *Texas Instruments*, visto permitir a comunicação com o variador de frequência através do protocolo *Modbus-RTU*, o que nem todos os microcontroladores permitem. Para além disso, apresenta ainda

outras vantagens importantes, como o facto de ter um consumo energético bastante reduzido, possuir conversores analógico digitais incorporados, o que foi bastante útil para medir o sinal da força, temporizadores internos (*timers*), que são necessários para medir a velocidade de rotação, pinos *IO*, fácil utilização, com programação em C++, ANSI C, entre outras, e ainda um baixo custo. Um kit de desenvolvimento para este microcontrolador é apresentado na figura 5.1 [2].

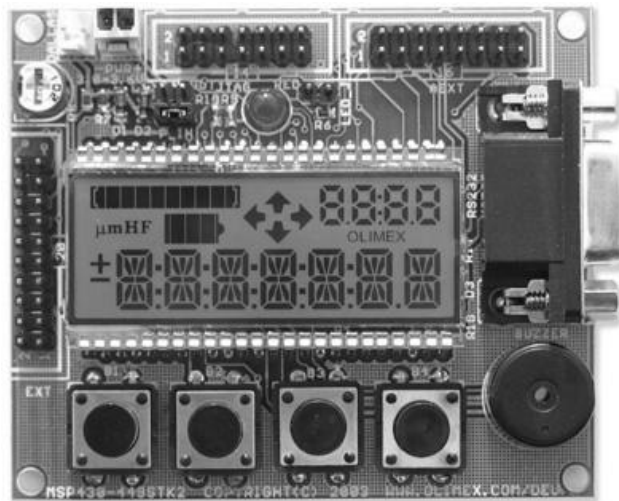


Figura 5.1 – Microcontrolador MSP430F449 STK2, da *Texas Instruments*.

Quanto aos aparelhos de medição usados, pretendia-se controlar a força realizada no amortecedor, a posição do veio do amortecedor (ou da suspensão), a velocidade de rotação do excêntrico e a velocidade linear do veio do amortecedor, para traçar o gráfico *Força-Velocidade* (velocidade esta que tanto pode ser linear, do veio do amortecedor em [mm/s], como rotacional, do excêntrico em [rpm]), e *Força-Posição* (posição do veio do amortecedor, em [mm], desde o curso mínimo até ao curso máximo).

Então, o primeiro dispositivo abordado no projecto foi um sensor de força, que deverá ser do tipo quantitativo (e não qualitativo, que só mede níveis de força). O sensor mais adequado para realizar as referidas medições da força é a célula de carga. O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência óhmica de um sensor denominado extensómetro (*strain gauge*), quando submetido a uma deformação. Utilizam-se normalmente em células de carga quatro extensómetros ligados entre si segundo uma ponte de *Wheatstone* e o desequilíbrio da mesma, em virtude da deformação dos extensómetros, é proporcional à força que a provoca. É através da medição deste desequilíbrio que se obtém o valor da força aplicada.

A selecção foi feita com base na capacidade nominal da célula, sensibilidade, precisão, formato, sinal transmitido, facilidade de controlo desse sinal, e claro, do seu preço. Assim, a célula de carga seleccionada é da marca VISHAY, modelo 616, e tem as seguintes características:

- célula de Carga *tensão-compressão*;
- capacidade nominal de 1000 [kg];
- aço Inoxidável;
- protecção IP67;
- circuito de 6 fios.

A imagem da célula de carga seleccionada está representada na figura 5.2. A sensibilidade desta célula de carga é de 2 [mV/V], com uma tolerância de 0,01% (alta precisão), tendo um formato em Z.

O valor da força é medido pela diferença entre as tensões das duas saídas da ponte de Wheatstone. Os dois fios de saída da ponte foram ligados a um andar amplificador, constituído por um amplificador de instrumentação, que compara os dois sinais, e amplifica o valor da diferença destes para um valor aceitável na entrada do microcontrolador.



Figura 5.2 – Célula de carga VISHAY, modelo 616.

Como a tensão de alimentação é de 10 [V], e a carga máxima é de 1000 [kg], significa que para os 1000 [kg] têm-se 20 [mV] de diferença de tensões à saída da ponte de Wheatstone. Devido às características do microcontrolador, o valor de saída do andar amplificador está compreendido entre 0 e 3 [V]. De modo a evitar alguma sobre tensão, reduz-se este valor para 2,8 [V], o qual já deve compreender valores de força entre -1000 e 1000 [kg], pelo que 0 [kg] corresponderão neste caso a 1,4 [V] à saída da ponte. O dimensionamento de todo este andar amplificador, e do *offset* de 1,4 [V] imposto, é apresentado em [1].

Em relação ao controlo da posição, foram estudados vários tipos de sensores que possibilitavam a realização desta medição. De todos, foi seleccionada o *encoder*. Este permite obter o ângulo de rotação usando discos com zonas que transmitem a luz, e zonas que absorvem a luz. Associando a estes discos sensores de presença ópticos, é possível, analisando o código obtido dos sensores, saber qual o ângulo de rotação em causa. A precisão da leitura depende do número de sensores de presença usados (*bits*).

Dos vários tipos de *encoder*, escolheu-se o incremental. Este é o tipo mais simples de *encoder*, e permite medir a posição, velocidade e sentido de rotação. Neste, são emitidos dois sinais em quadratura de fase (A e B) com uma frequência proporcional à velocidade de rotação do eixo do motor. Estes sinais são ondas quadradas desfasadas de 90°, de forma a que as transições positivas (0-1) de um dos sinais ocorra sempre que o outro sinal esteja a nível zero, enquanto que o outro sinal só realiza as suas transições positivas quando o primeiro estiver em nível 1. A ordem de transições de níveis ocorre em função do sentido de rotação. Por exemplo, num dos sentidos a onda A transita de 0 para 1 sempre que a onda B estiver em zero e, do mesmo modo, no outro sentido a onda B transita quando a onda A estiver em zero. Para detectar o sentido de rotação, basta esperar pela primeira transição positiva de um dos sinais e verificar o estado do outro sinal.

Pretende-se que o *encoder* seleccionado para realizar a medição da posição permita facilmente calcular a velocidade de rotação do excêntrico, de modo a que, medindo a posição do excêntrico a cada instante, e em função do curso que se esteja a ensaiar, se calcule a posição do veio do amortecedor, e a sua velocidade linear.

O *encoder* seleccionado está apresentado na figura 5.3, sendo este da marca Heidenhain, com um furo de 50 [mm], sendo a sua aplicação preferencial na coroa do excêntrico. Este é o furo máximo dos *encoders* consultados, pelo que teve de se realizar uma alteração significativa na máquina, para permitir a aplicação deste aparelho.



Figura 5.3 – *Encoder* incremental de 5000 impulsos.

O *encoder* seleccionado realiza 5000 pulsos durante um rotação (360°), disponibilizando uma resolução igual $360^\circ/5000 = 0,072$. A escolha deste componente foi efectuada com base no facto de o controlo de posição/velocidade baseado no *encoder* incremental poder ser bastante simples, visto se poder usar somente um dos sinais deste (pois o motor irá rodar sempre no mesmo sentido), que ao ser transmitido ao microcontrolador vai gerar impulsos para um temporizador, o que, conhecendo a base temporal, permite saber a posição a cada instante. O microcontrolador, com base nos impulsos recebidos, pode medir o tempo entre impulsos, calculando desta forma a velocidade “*instantânea*”.

Pretende-se saber a posição do excêntrico de grau a grau, ou seja, $1/0,072 \cong 14$. Então, de 14 em 14 impulsos, o microcontrolador irá contar uma posição, sabendo desde logo que o excêntrico se deslocou um grau, fazendo *reset* ao tempo. Na próxima vez que contar 14 impulsos do *encoder*, passou mais um grau, e pelo tempo que demorou desde a posição anterior, calcula a velocidade de rotação.

O *encoder* é alimentado a 5 [V], e pode gerar impulsos com um desfasamento de 90° (A e B), mais utilizados para determinar o sentido de rotação. No projecto isso não foi necessário, pelo que só utilizou somente um dos sinais do *encoder*, para calcular a posição e a velocidade. Contudo, como este é alimentado a 5 [V], os impulsos por ele gerados têm a mesma amplitude, pelo que se passou este valor para um valor inferior a 3 [V], devido às características dos portos do MSP430. Para acertar os sinais, ligou-se ainda o *encoder* a um *buffer* de modo a que os sinais fossem sempre 0 ou 1, eliminando qualquer outro tipo de sinal, resultante de oscilações do *encoder*, ou pulsos que não atinjam um determinado valor mínimo devido a eventuais anomalias.

O *encoder* gera impulsos que permitem calcular a posição, mas não permite indicar qual a posição zero. Para tal, foi utilizado um sensor de presença, de modo a detectar a posição zero, fazendo *reset* à posição, sendo também útil para contar o início e final de cada volta. O sensor escolhido para esta operação foi do tipo magnético (indutivo), que é alimentado por uma determinada tensão, e que funciona tipo um interruptor: enquanto não detecta a presença de um íman está aberto, ou seja, retorna 0 [V], e quando detecta a presença do referido material, fecha, devolvendo um valor de tensão correspondendo à sua tensão de alimentação. Este foi colocado numa posição fixa, e detecta o íman que estará colocado na posição zero do excêntrico, que é o ponto morto inferior (BDC) analisado no capítulo 1.

Com estes dois aparelhos conseguem-se determinar todas as posições do excêntrico, desde 0° a 360°, e o *encoder* seleccionado permite ao microcontrolador calcular a velocidade de rotação do excêntrico, estando assim definido o método de medição de grande parte dos parâmetros necessários a medir.

Quanto à instrumentação, esta visa ligar todos os aparelhos até aqui abordados ao microcontrolador. Cada aparelho funciona com uma determinada tensão de alimentação, bem como os circuitos integrados que irão tratar os sinais destes, pelo que se fizeram fontes de alimentação na própria placa de circuito impresso final, de modo a que somente com uma fonte de alimentação se obtivessem tensões e correntes que alimentam todos os equipamentos, incluindo o microcontrolador. Todos os circuitos de ligação dos aparelhos com o microcontrolador respeitam os limites de tensão e corrente dos portos deste, de modo a evitar a danificação deste aparelho, fundamental para controlar todos os processos realizados pela máquina.

Os blocos de instrumentação projectados são as ligações entre o MSP430 e o VEV, feita através de um MAX232, para uma porta série RS-232, a ligação entre o *encoder* e o MSP430, feita através de um *buffer*/CMOS e um divisor de tensão, a ligação entre o sensor magnético e o MSP430, somente para reduzir a corrente o máximo possível, e a ligação entre a célula de carga e o MSP430, que é constituída por um andar amplificador, e ainda um divisor de tensão

de modo a criar um *offset* na saída deste andar. O dimensionamento de todos estes blocos é apresentado em [1], bem como das várias fontes de alimentação.

O PCB final foi desenhado para ser o mais simples e reduzido possível, tendo ligações directas ao microcontrolador, de modo a usar este aparelho externamente, tudo dentro da mesma caixa.

Nesta placa foram englobados todos os circuitos projectados na parte de instrumentação, bem como todas as fontes de alimentação projectadas, tendo um conversor DC-DC, que a partir de uma fonte de tensão externa converte os valores de tensão de alimentação para os valores necessários a todas as fontes de alimentação feitas neste PCB. Em relação aos pinos de saída e entrada desta placa, foram posicionados de modo a estarem facilmente acessíveis, e que tornem a própria placa o mais simples possível, reduzindo ao máximo o número de pistas e vias.

A placa desenvolvida está apresentada na figura 5.4.

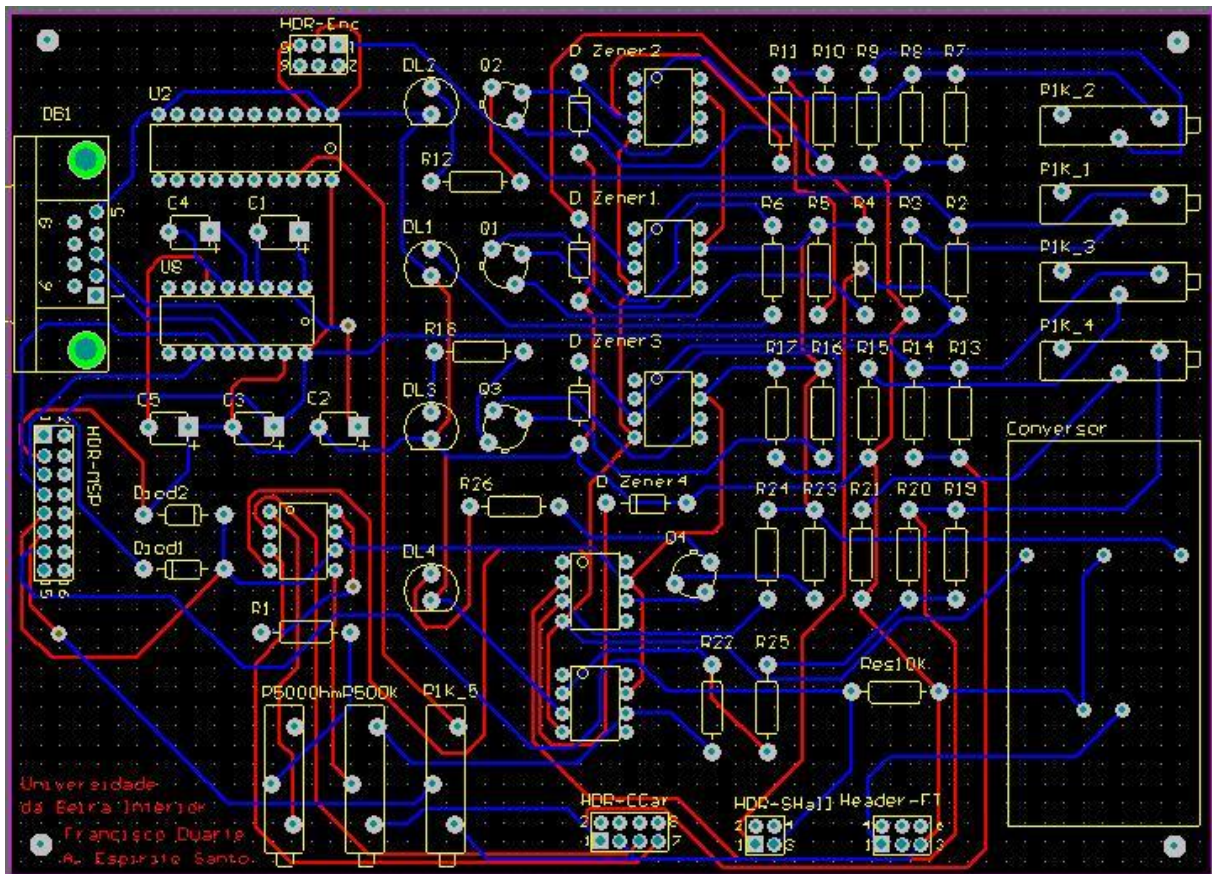


Figura 5.4 – Placa de circuito impresso, vista de cima.

Pretende-se agora em primeiro lugar aplicar todos os filtros necessários à redução do ruído, a começar pelo VEV, que é a maior fonte de ruído existente na máquina desenvolvida, passando pela fonte de alimentação, até chegar à placa electrónica, englobando todos os

sensores e aparelhos de medida. Para a aplicação dos referidos filtros será tido em conta o estudo apresentado no capítulo anterior.

Depois, pretendem-se realizar alterações no projecto electrónico, ao nível da instrumentação, alterando também a parte de componentes electrónicos, prevendo a introdução de novos sensores.

Para terminar, será apresentada uma nova ligação do MSP ao PC, alterando a ligação série existente por uma ligação USB, visto ser este o tipo de comunicação mais utilizado actualmente.

5.2. Tratamento do Ruído do VEV

Os inversores WEG da série CFW-08 foram projectados considerando todos os aspectos de segurança e de compatibilidade electromagnética (EMC). Estes não possuem nenhuma função intrínseca quando não ligados com outros componentes, como por exemplo, um motor eléctrico. Por essa razão, o VEV não possui a marca CE para indicar a conformidade com a directiva de compatibilidade electromagnética. Assim, a WEG transmite ao utilizador a responsabilidade pela compatibilidade electromagnética de toda a instalação, incluindo a implementação dos filtros e das medidas de EMC sugeridas por si, de modo ao VEV respeitar os requisitos da Directiva de Compatibilidade Electromagnética (EMC Directive 89/336/EEC), conforme definido pela norma de produto EN61800-3 – “Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems”, norma específica para accionamentos de velocidade variável.

Foram realizados estudos acerca das perturbações de VEV's, e de modos de filtrar essas perturbações, sendo usados como base deste estudo as referências [3] e [4]. Este estudo foi complementado com a consulta do manual [5], de onde se recolheu informação relativa aos filtros já desenvolvidos para o VEV usado.

A conformidade de toda a série CFW-08 está baseada em testes de modelos representativos, tendo a WEG desenvolvido os filtros necessários de modo a reduzir ao máximo o ruído emitido por este aparelho.

O VEV emite um ruído fortemente electromagnético (emissão radiada), mas também perturba a rede por ruído transmitido de modo galvânico (emissão conduzida). Torna-se assim necessário filtrar a ligação da rede com o VEV, e ainda do VEV para o motor.

Segundo a WEG, o modelo CFW080130T3848PSZ produz níveis de emissão conduzida de classe B, e níveis de emissão radiada da classe A1. Os inversores com nível de emissão conduzida classe B devem ser montados dentro de um painel metálico de modo a que as emissões radiadas estejam dentro dos limites para ambiente residencial e distribuição restrita.

Os filtros recomendados para este modelo de VEV são um filtro externo FN3258-16-45, para colocar entre a rede (após o disjuntor) e o VEV, e um indutor de modo comum (“CM choke”) na entrada do filtro. A ligação destes filtros ao VEV é apresentada na figura 5.5.

Para que a instalação seja feita de forma adequada, devem ser respeitados os seguintes aspectos:

- o cabo do motor deve ser blindado ou instalado dentro de uma grelha de protecção equivalente. A malha do cabo blindado deve ser ligada à terra nos dois lados (VEV e motor);
- os cabos de controlo e sinal (caso se apliquem) devem ser blindados ou instalados dentro de uma grelha metálica equivalente;
- o inversor e o filtro externo devem ser montados próximos sobre uma chapa metálica comum. Deve ser garantida uma boa ligação eléctrica entre o dissipador do inversor, a carcaça metálica do filtro e a chapa de montagem;
- a fiação entre o filtro e o inversor deve ser a mais curta possível;
- a blindagem dos cabos deve ser solidamente ligada à chapa de montagem, utilizando braçadeiras metálicas;
- deve ser usada fiação curta para ligar o filtro externo ou o inversor à terra. Quando se usa filtro externo, somente o filtro (entrada) se deve ligar à terra – a ligação de terra do inversor é feita pela chapa de montagem;
- deve-se ligar a chapa de montagem à terra utilizando uma braçadeira o mais curta possível, devido a esta ter uma menos impedância a altas frequências.

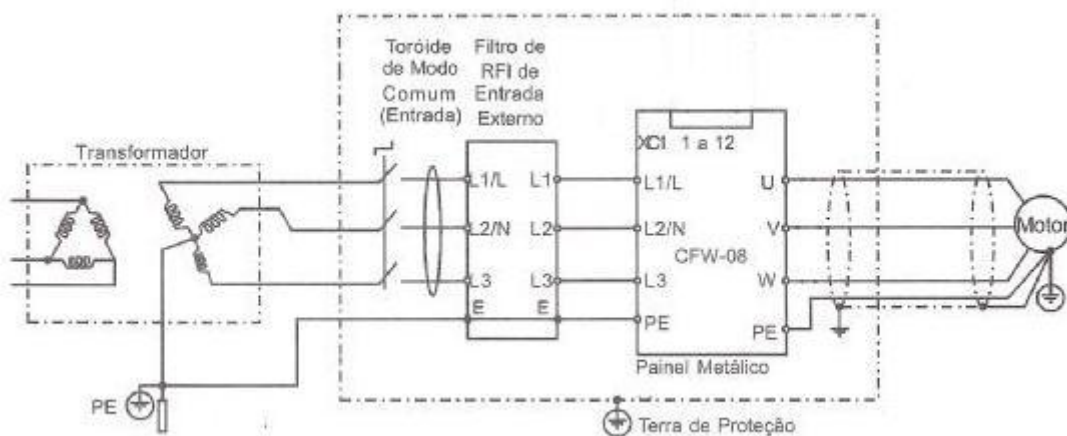


Figura 5.5 – Ligação dos filtros de EMC ao VEV – condição geral.

5.3. Tratamento do Ruído da Fonte de Alimentação

Os circuitos electrónicos usados necessitam de uma alimentação de +15 [V], 0 [V] e -15 [V], em modo contínuo (DC). Estas tensões são fornecidas através de um conversor DC-DC que deve ser alimentado com uma tensão entre 9 e 36 [V], também em modo contínuo. O conversor seleccionado é da marca TRACO POWER, modelo TEN 20, e as suas características são apresentadas em [6].

Para alimentar este conversor, é necessário usar uma fonte de alimentação que converta os 230 [V] AC da rede de distribuição monofásica para uma tensão que se enquadre na gama desejada, em modo contínuo. Da folha de dados do conversor seleccionado, verifica-se que a tensão adequada será de 24 [V], pelo que a fonte de alimentação deverá converter 230 [V] AC para 24 [V] DC.

A fonte de alimentação básica é constituída por 4 sectores [7]:

- transformador – Transforma a tensão AC e corrente de entrada para um valor utilizável em AC.
- ponte rectificadora – Rectifica os pulsos de modo a produzir uma saída polarizada DC.
- filtragem – Filtra a tensão tornando a corrente contínua.
- regulação – Regula a saída de modo a ter uma tensão constante.

Transformador

A relação do transformador é dada pela expressão $V_p/V_s = N_p/N_s$, em que V_p representa a tensão de entrada (no primário), V_s representa a tensão de saída (no secundário), N_p representa o número de espiras no primário e N_s representa o número de espiras no secundário. De referir que a potência de saída é igual à potência de entrada, considerando-se assim que $V_s \times I_s = V_p \times I_p$, com I_s a representar a corrente no secundário, e I_p a corrente no primário. Na figura 5.6 a [7] está representado esquematicamente um transformador, e na figura 5.6 b [7] o andamento da tensão em função do tempo.

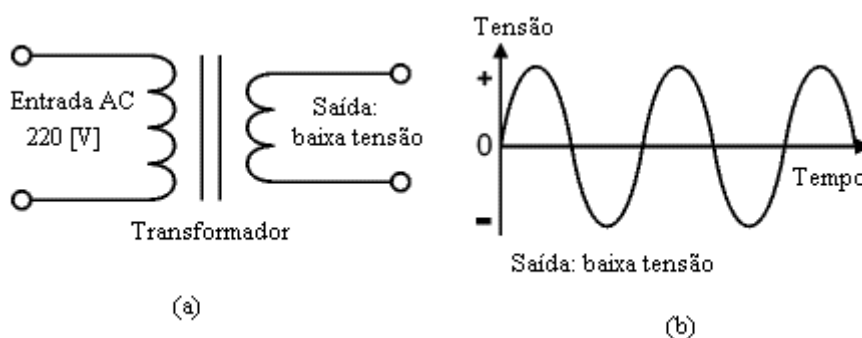


Figura 5.6 – a) Esquema de um transformador; b) Evolução da tensão no tempo.

Rectificação

Existem várias formas de ligar díodos de modo a criar um rectificador e converter AC para DC. A ponte rectificadora é o mais importante e o que produz uma rectificação de onda completa. Um rectificador de onda completa pode ser feito a partir de apenas dois díodos, mas este método raramente é usado uma vez que os díodos são extremamente baratos. Um único díodo pode ser utilizado como rectificador mas só usa o positivo (+) do AC, produzindo apenas meia onda em DC.

Uma ponte rectificadora usa a onda AC (tanto a secção positiva como a negativa). 1,4 [V] perde-se na ponte, porque cada um dos díodos rectificadores perde 0,7 [V] (queda de tensão numa junção PN de silício) na condução e há sempre dois díodos em condução. As pontes rectificadoras são classificadas pela corrente máxima e a tensão inversa máxima que podem suportar. Na figura 5.7 [7] está representada uma ponte rectificadora à saída de um transformador, em que após a tensão ter sido transformada para o valor desejado, ainda em AC, esta é rectificada, passando a ter valores só positivos.

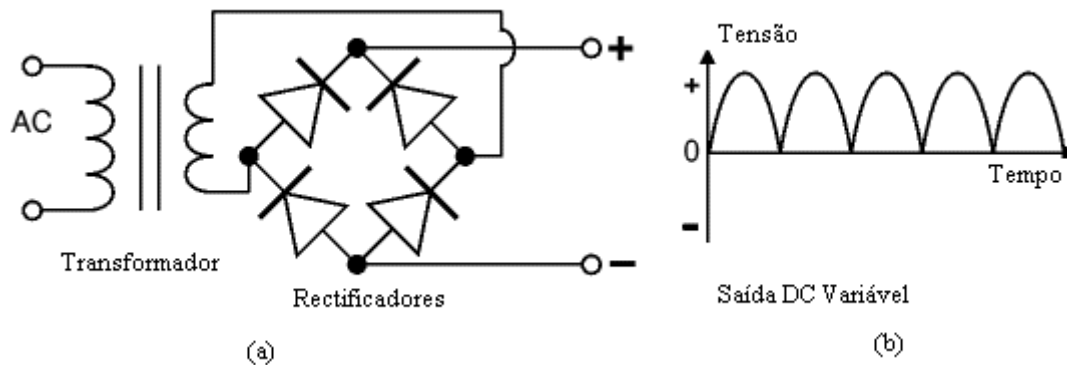


Figura 5.7 – a) Esquema de um transformador com ponte rectificadora; b) Evolução da tensão no tempo.

Filtragem

A filtragem é feita por um condensador electrolítico de grande valor ligado à saída DC para agir como um reservatório, fornecendo corrente para a saída quando a tensão DC varia no rectificador. A figura 5.8 [7] mostra a tensão não filtrada (linha a tracejado) e a DC suavizada (linha sólida). O condensador descarrega rapidamente perto do pico da variável DC.

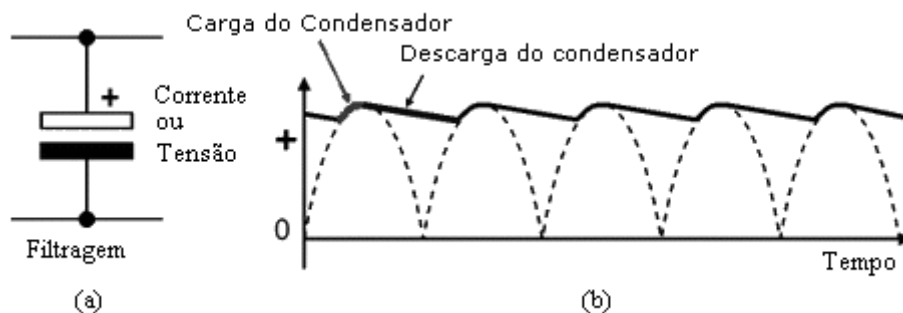


Figura 5.8 – a) Condensador Electrolítico; b) Evolução da tensão no tempo.

Note-se que a filtragem aumenta significativamente a tensão média DC para o valor pico ($1,4 \times$ valor RMS). Por exemplo, 6 [V] RMS AC (saída do transformador) são rectificadas em onda completa, ficam em 4.6 [V] DC RMS (1.4 [V] perdem-se na ponte rectificadora), mas com a filtragem esta tensão aumenta o pico para $1,4 \times 4,6 = 6.4$ [V].

A filtragem não é perfeita devido à tensão do condensador cair um pouco nas descargas, dando uma pequena ondulação de tensão (*Ripple*). Para muitos circuitos, uma ondulação (*Ripple*) de 10% do valor de tensão é satisfatória. A equação seguinte fornece o valor exigido para a filtragem do condensador. Quanto maior o condensador menor a ondulação.

$$C = \frac{5 \times I_o}{V_s \times f} \quad [5.1]$$

Sendo C o valor do condensador, ou a capacidade de filtragem (em *Faradays*, [F]), I_o a corrente de saída em [A], V_s a tensão de entrada em [V] (este é o valor de pico de tensão não filtrada em DC), e f a frequência AC, em Hertz, [Hz].

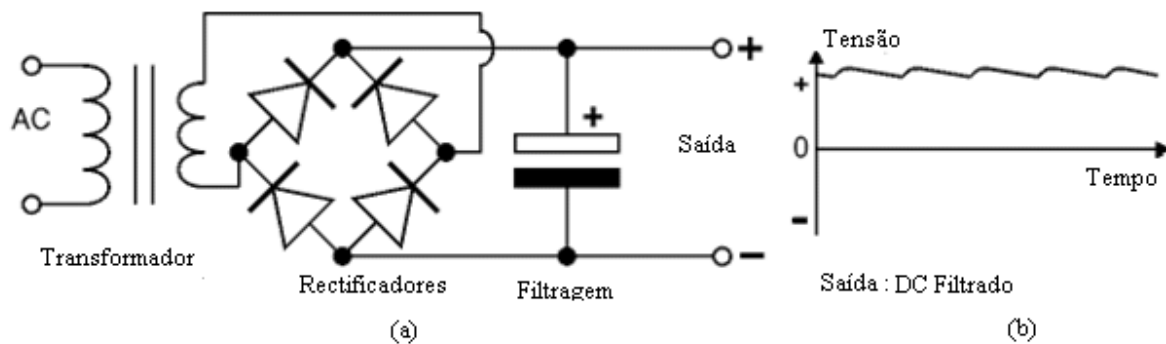


Figura 5.9 – a) Esquema de um transformador com ponte rectificadora e filtro; b) Evolução da tensão no tempo.

A ondulação é consideravelmente reduzida pela existência de dois condensadores, e a característica de regulação de tensão em relação à corrente de carga é semelhante à do filtro puramente capacitivo.

Regulação

Existem circuitos integrados reguladores com valores fixos (normalmente 5, 12 e 15 [V]) ou tensão de saída variável. São classificados pela corrente máxima que deixam passar. Reguladores de tensão negativa também estão disponíveis, principalmente para o uso em fontes duplas. A maioria dos reguladores inclui protecção automática de excesso de consumo (protecção de sobrecarga) e sobreaquecimento (protecção térmica).

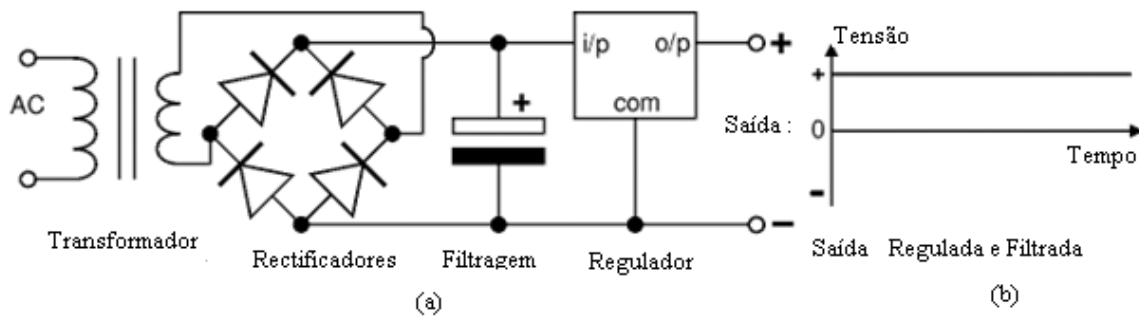


Figura 5.10 – a) Esquema de uma fonte de alimentação completa; b) Evolução da tensão no tempo.

Se a tensão da rede variar, a saída da fonte também varia, qualquer que seja o filtro usado. Transformadores, indutores e díodos polarizados directamente não têm resistência eléctrica nula e, portanto, a tensão da fonte muda sempre com a variação da corrente da carga. Se o circuito alimentado exigir uma tensão razoavelmente constante, um simples filtro não poderá garantir isso.

Na Figura 5.11 [8], é apresentada uma das primeiras técnicas usadas para a estabilização da fonte. Um componente activo (transistor) é inserido em série com a carga. O díodo zenner fornece uma tensão de referência constante dentro da faixa de variação prevista. Essa tensão (constante) e a de saída (supostamente variável) são aplicadas num circuito controlador, que faz a comparação de ambas e polariza a base do transistor. Se, por exemplo, a corrente da carga aumenta, a tensão de saída tende a diminuir e o circuito de controlo ajusta a polarização da base do transistor, fazendo-o conduzir mais e, portanto, restabelecendo o valor anterior.

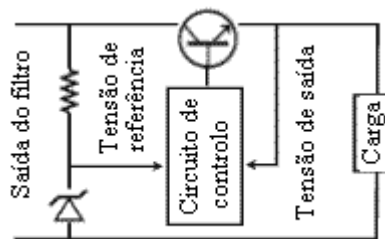


Figura 5.11 – Técnica para estabilização da fonte.

Assim, o esquema da fonte de alimentação devidamente estabilizada e regulável é apresentado na figura 5.12 [8]. Nesta, T1, D1, D2 e C1 formam o conjunto transformador, rectificador de onda completa e filtro capacitivo. Q6 é o transistor de potência que controla a saída da fonte. A polarização da sua base é controlada por Q5, de baixa potência como os restantes. Q3 e Q4 formam um amplificador diferencial que recebe a tensão da saída e a de referência da série de zenners D3, D4 e D5. O colector de Q3 actua na base de Q5, fazendo a estabilização da tensão de saída, que pode ser ajustada pelo potenciómetro R3. Q2 recebe a queda de tensão em R13

(resistência de baixo valor, em série com a carga) e, juntamente com Q1, faz uma espécie de limitação de corrente, que pode ser ajustada por R6.

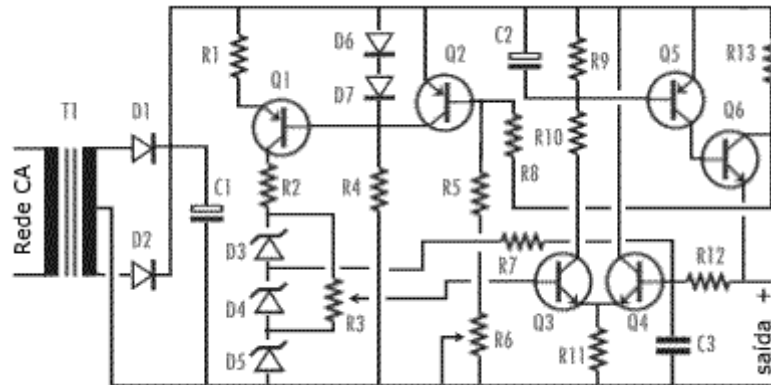


Figura 5.12 – Esquema de uma fonte de alimentação regulada e estabilizada.

Deste modo consegue-se ter uma tensão de 24 [V] DC à saída da fonte de alimentação, devidamente filtrada e estabilizada, para alimentar o conversor DC-DC atrás referido, o qual faz parte do circuito electrónico da máquina. Para eliminar perturbações galvânicas deve ainda ter-se o cuidado de usar fios devidamente blindados entre a rede e a fonte, e entre a fonte e o circuito, ligando a ponta da blindagem à linha de terra (na ponta da alimentação), à chapa da fonte de alimentação (na fonte de alimentação, em ambos os cabos), e ainda onde está introduzida a placa electrónica, no lado desta.

A fonte de alimentação seleccionada é da marca Traco Power, e está representada na figura 5.13, tendo as seguintes características:

- tensão de entrada: 85 - 264 [V] AC;
- tensão de saída: 24 [V] DC;
- corrente de saída: 2,5 [A];
- potência de saída: 60 [W];
- ripple: <50 [mVpp];
- eficiência: 88%;
- filtro EMI embutido;
- protecção contra curto-circuito e sobre-carga;
- circuito de partida com limitador de tensão de pico;

Conclui-se assim que a fonte de alimentação para além de fornecer a tensão desejada em DC, já tem o filtro desejado embutido, possui uma alta eficiência e um baixo valor de *ripple*, pelo que cumpre todos os objectivos desejados.

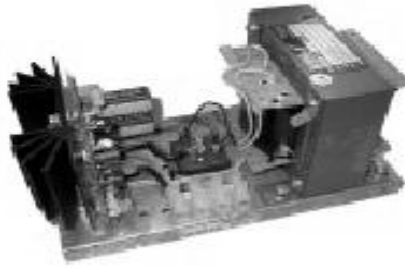


Figura 5.13 – Representação da fonte de alimentação seleccionada.

5.4. Tratamento do Ruído – Aplicação de Filtros

Após realizado o tratamento do ruído nas duas principais fontes de perturbações, que são o VEV e a fonte de alimentação do circuito electrónico, resta abordar o tratamento de ruído a realizar sobre os componentes electrónicos na placa de circuito impresso, onde estão todos os circuitos da instrumentação da máquina, e ainda referir alguns conselhos para os fios a utilizar, e ligações da blindagem destes.

Começando pelo primeiro nível da instrumentação, referente às fontes de alimentação introduzidas na placa, para fornecer diferentes níveis de tensão aos vários integrados, sensores e aparelhos de medida, a maior parte do ruído e perturbações foram já eliminados com a introdução de uma fonte de alimentação principal devidamente filtrada. Contudo, há ainda aspectos que se podem melhorar nestas fontes, nomeadamente nos amplificadores operacionais que as constituem.

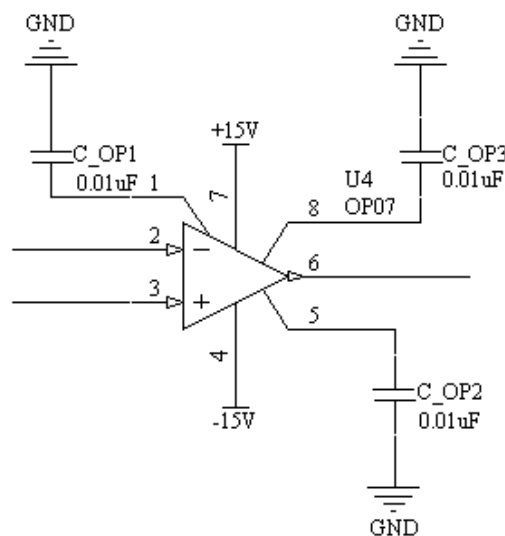


Figura 5.14 – Condensadores que ligam os pinos do OP07 a *ground*, minimizando o ruído.

Nestes amplificadores, normalmente deixam-se os pinos 1, 5 e 8 sem qualquer ligação, visto não se ter em conta problemas de ruído. De modo a assegurar um *offset* nulo da tensão de saída destes amplificadores, estes pinos devem ser ligados a *ground*, através de condensadores de 10 [nF], como apresentado na figura 5.14.

Estes condensadores servem para evitar que os pinos não utilizados do amplificador operacional OP07 (que normalmente ficam “no ar”, ou seja, sem estar ligados a nada) sejam ligados directamente à linha de terra (*ground*), suportando ainda alguma perturbação que possa advir desta linha.

Quanto aos sensores (o sensor magnético, e os novos sensores a introduzir), as ligações destes são completamente alteradas, de modo a evitar os problemas de ruído verificados com a utilização da máquina de ensaio de amortecedores.

No projecto inicial, foi colocada somente uma resistência, e posteriormente um condensador em paralelo com esta, entre o sensor e *ground*, para baixar a corrente. Com o ruído existente no circuito electrónico, verificou-se que quando o sensor detectava a presença do íman, a tensão que devolvia não tinha uma forma de onda quadrada, mas estava dividida em vários picos, fazendo com que em vez de ser contada uma volta do excêntrico, por vezes fossem contadas várias voltas de uma só vez. Com a introdução do condensador, conseguiu-se melhorar este problema, estabilizando o sinal.

Após o estudo feito no capítulo anterior, verifica-se que para este tipo de problema, a solução mais adequada passa por usar uma ligação optoelectrónica, ligando o sensor a um LED, e um fotodetector que recebe a luz emitida pelo LED, ligado ao MSP. Deste modo, cada vez que o sensor detectar o íman (no caso do sensor do excêntrico), o LED acende, o fotodetector recebe a luz e transmite a informação ao porto do MSP.

Para tal, usa-se um TLP521 da Toshiba, que é um integrado com um fototransistor opto-acoplado a um LED, estando disponível uma versão com dois circuitos destes, num só, como mostrado na figura 5.15.

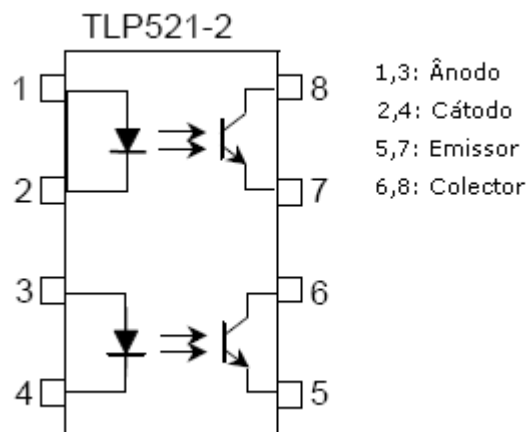


Figura 5.15 – Representação interna do TLP521 da Toshiba.

No ponto seguinte será apresentado o dimensionamento e implementação das ligações deste integrado.

Nas alimentações dos vários integrados deve ter-se o cuidado de estabilizar as tensões, colocando sempre nestas um condensador entre a tensão de alimentação e *ground*, por forma a evitar oscilações no valor da tensão de alimentação.

Para tal, seleccionou-se um condensador de 0,1 [µF], que é colocado como apresentado na figura 5.16.

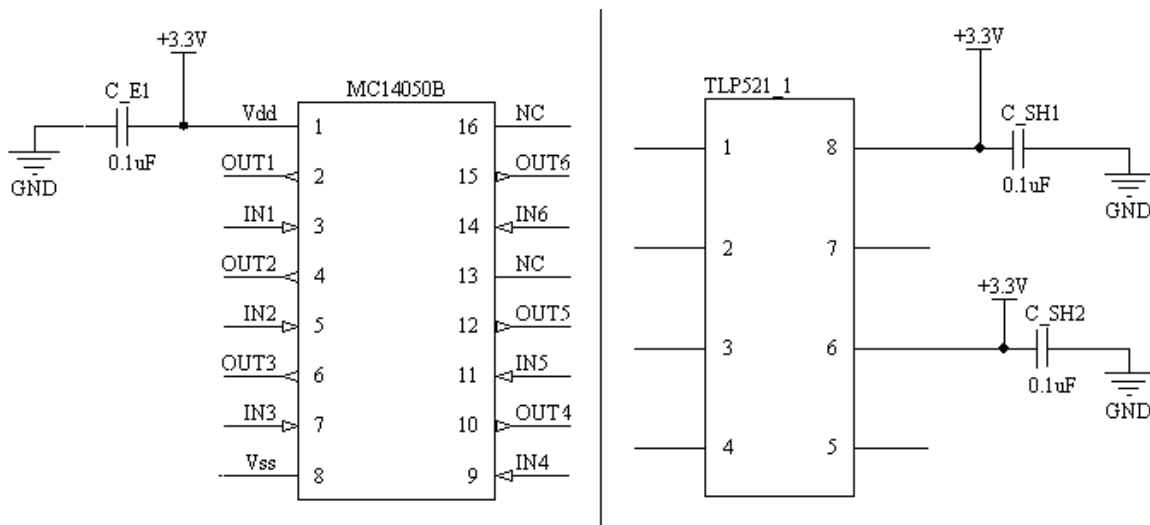


Figura 5.16 – Representação da aplicação de um condensador entre a alimentação e *ground*.

Quanto à ligação da célula de carga com o amplificador de instrumentação, deve ser o ponto de maior atenção no que respeita a filtros na placa electrónica, pois este é o aparelho que realiza as principais medições da máquina, devendo ser o ruído existente no seu sinal reduzido a um mínimo possível. Assim, e com base na matéria estudada no capítulo anterior, na parte referente à aplicação de filtros em amplificadores de instrumentação, deve-se colocar um filtro activo em cada uma das entradas deste amplificador, e outro à saída, devidamente dimensionados para a frequência de corte pretendida.

Como a frequência da célula de carga nunca é superior a 10 [Hz], considera-se este o máximo admissível. Introduzindo um factor de segurança de 3, considera-se uma frequência de corte igual a 30 [Hz]. Assim, e introduzindo filtros activos em ambas as entradas do amplificador de instrumentação, tem-se que:

$$2\pi f_c = \frac{1}{RC} \Leftrightarrow R = \frac{1}{30\pi \times C} \quad [5.2]$$

Para um condensador com um valor igual a 1 [µF], tem-se uma resistência igual a 53 [kΩ].

Na saída, definindo uma frequência de corte igual a 40 [Hz], e aplicando a mesma expressão, para um condensador com igual valor, tem-se uma resistência de 3,9 [k Ω].

Quanto à blindagem da célula de carga, deve ser ligada como indicado na referência [9], o que neste caso equivale a estar ligada ao *ground* da fonte de alimentação.

5.5. Alterações na Instrumentação

Como já foi visto no ponto 5.1, a placa electrónica usada na máquina de ensaio de amortecedores, compreende os seguintes circuitos:

- fonte de alimentação de 3,3 [V];
- fonte de alimentação de 5 [V];
- fonte de alimentação de 10 [V];
- fonte de alimentação de -10 [V];
- ligação do MSP430 ao VEV;
- ligação da célula de carga ao MSP430;
- ligação sensor ao MSP430;
- ligação do *encoder* ao MSP430.

As fontes de alimentação são alimentadas pelo conversor DC-DC, que lhes fornece as tensões de +15 [V], 0 [V] e -15 [V], tendo depois cada uma delas a função de converter a tensão de alimentação para a respectiva tensão de saída referida. Estas constituem o primeiro bloco da placa electrónica, após o conversor DC-DC.

Após estas, estão os circuitos de transmissão de sinal, proveniente de sensores, a transportar para o MSP, ou vindos do MSP, a transmitir para o VEV. A primeira alteração a realizar na placa electrónica consiste em alterar o circuito de ligação do *encoder* com o MSP. Apesar de um dos objectivos deste trabalho ser alterar o programa de controlo, de modo a este trabalhar sem recorrer ao *encoder* para gerar os impulsos, isso não impede de a placa estar preparada para receber este aparelho, para a eventualidade de o programa não funcionar tão bem como com o *encoder*. Assim, é eliminado o *buffer* 74HC244 da placa electrónica, passando a utilizar-se o *buffer* MC14050B, do fabricante *ON Semiconductor*. Este *buffer* permite a ligação de uma determinada tensão de referência, enquanto o sinal de entrada pode ter valores de tensão diferentes. O sinal de saída, tem sempre um valor de tensão igual ao valor da tensão de referência. Como o valor dos sinais do *encoder* têm 5 [V], e os pinos do MSP só admitem tensões até 3,3 [V], este *buffer* mostra-se ideal para esta aplicação.

Como este componente é introduzido no circuito com a finalidade de prever uma eventual necessidade de recorrer ao *encoder* para gerar os pulsos no *timer* do microcontrolador, então também se prevê desde já a recepção de dois sinais do *encoder*, em vez de um, como anteriormente. Assim, a *header* de ligação do *encoder* com a placa electrónica deve ter 4

pinos: um para os 5 [V] de alimentação do *encoder*, um para *ground*, e dois para receber sinais do referido aparelho – U_{a1} e U_{a2} – que são transmitidos ao *buffer* atrás mencionado.

O *buffer* é alimentado a 3,3 [V], e transmite os sinais aos portos P1.5 e P1.4 do microcontrolador, que são respectivamente do *timer A* e do *timer B*.

Todas as ligações deste integrado estão apresentadas na figura 5.17.

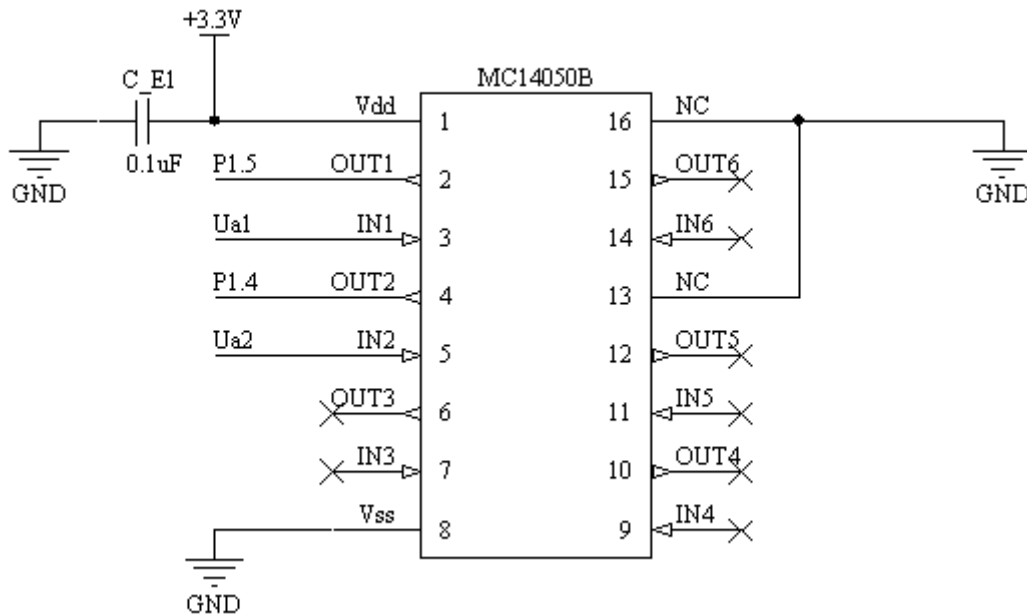


Figura 5.17 – Buffer de ligação do *encoder* com o MSP430.

A ligação do MSP com o VEV mantém-se, sendo feita através da passagem do sinal do MSP por um MAX232CPE, que aumenta a amplitude do sinal do MSP de 3 [V] para os +-12 [V] exigidos pelo VEV.

Quanto à ligação da célula de carga com o MSP, em que os sinais provenientes deste sensor passam por um amplificador de instrumentação, e são filtrados como já foi atrás referido, será agora introduzido outro componente na placa, que irá servir para filtrar, amplificar e comparar o sinal, possuindo ainda um ADC de 16 *bits* interno, comunicando no modo SPI. Trata-se de um AD7705, da *Analog Devices*, e é ideal para o tipo de operação realizado pela célula de carga, para comunicar com um microcontrolador.

Contudo, não se retira a solução inicial do INA 114 da placa, tendo assim a possibilidade de optar por uma destas soluções. Para tal, a *header* de ligação da célula de carga com a placa electrónica deve permitir a comutação entre os seus pinos, através de *jumpers*, de modo a que a célula de carga ligue a determinados pinos, e depois esses pinos sejam ligados aos pinos pretendidos, que liguem ou ao INA 114, ou ao AD7705.

Ainda no caso de se optar pelo INA 114, este deve permitir usar dois ganhos: um para o ensaio de amortecedores (forças de -1000 a 1000 [kg.f]), outro para ensaiar suspensões (forças de -500 a 500 [kg.f]). Para tal, usa-se um *multiplexer* analógico (ADG508), no qual são ligadas duas resistências variáveis (cada uma dando um ganho diferente ao amplificador de instrumentação); este tem uma só saída, e a entrada é seleccionada pelo microcontrolador: o pino 1 do porto 6 está ligado ao pino 1 do ADG508, e caso esteja a nível lógico alto é seleccionada uma entrada, caso esteja a nível baixo, é seleccionada a outra.

As ligações de ambos os circuitos estão representadas nas figuras 5.18 e 5.19.

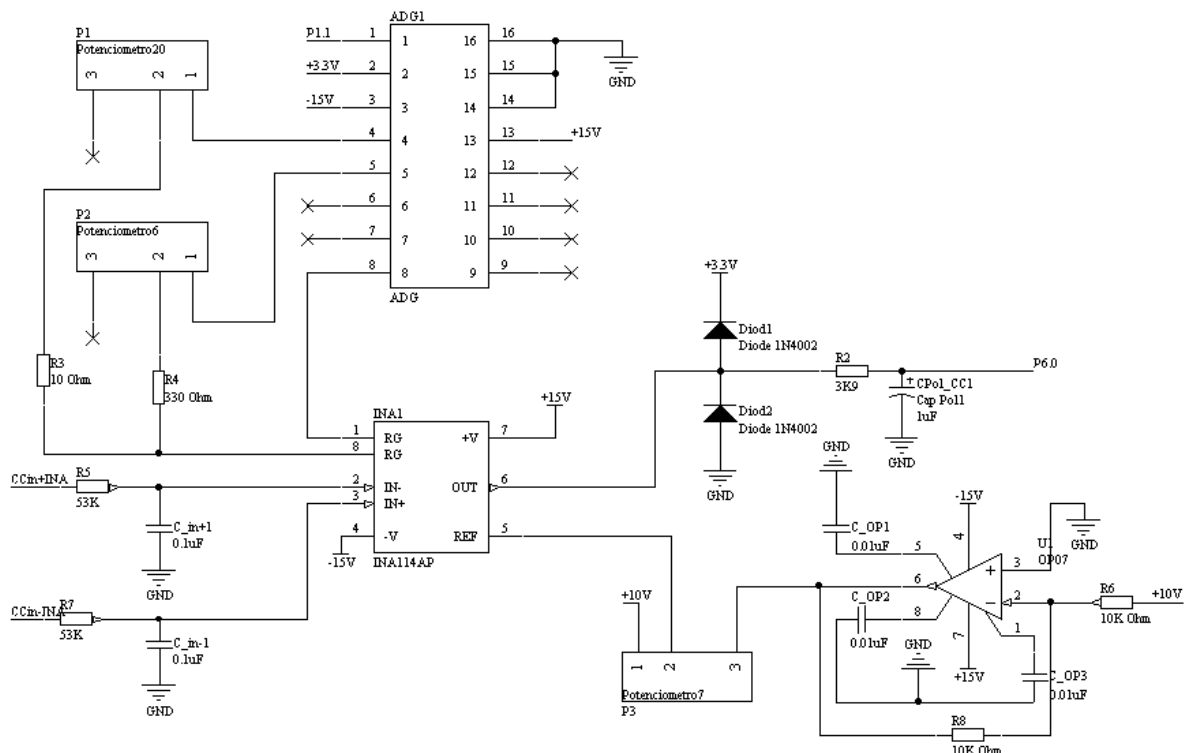


Figura 5.18 – Ligação da célula de carga com o MSP, através do INA 114.

Na figura 5.18 pode-se identificar o INA114, estando ligadas a este as duas saídas da célula de carga (pinos 2 e 3), devidamente filtradas, a referência no pino 5 (com uma resistência variável, com +10 [V] vindos da respectiva fonte ligados a uma ponta, e -10 [V] à saída de um andar inversor ligado na outra ponta, ajustando-se a tensão desejada à saída do pino central), o ganho é ligado entre o pino 1 e 8. Verifica-se que existem duas resistências de ganho ligadas ao pino 8 do INA, que estão ligadas ao *multiplexer* ADG508, estando a saída deste ligada ao pino 1 do INA. A saída do INA, que fornece o valor da tensão correspondente à força medida na célula de carga, é devidamente filtrada, seguindo o sinal para um pino de uma *header* que irá ser ligado ao pino 6.0 do MSP.

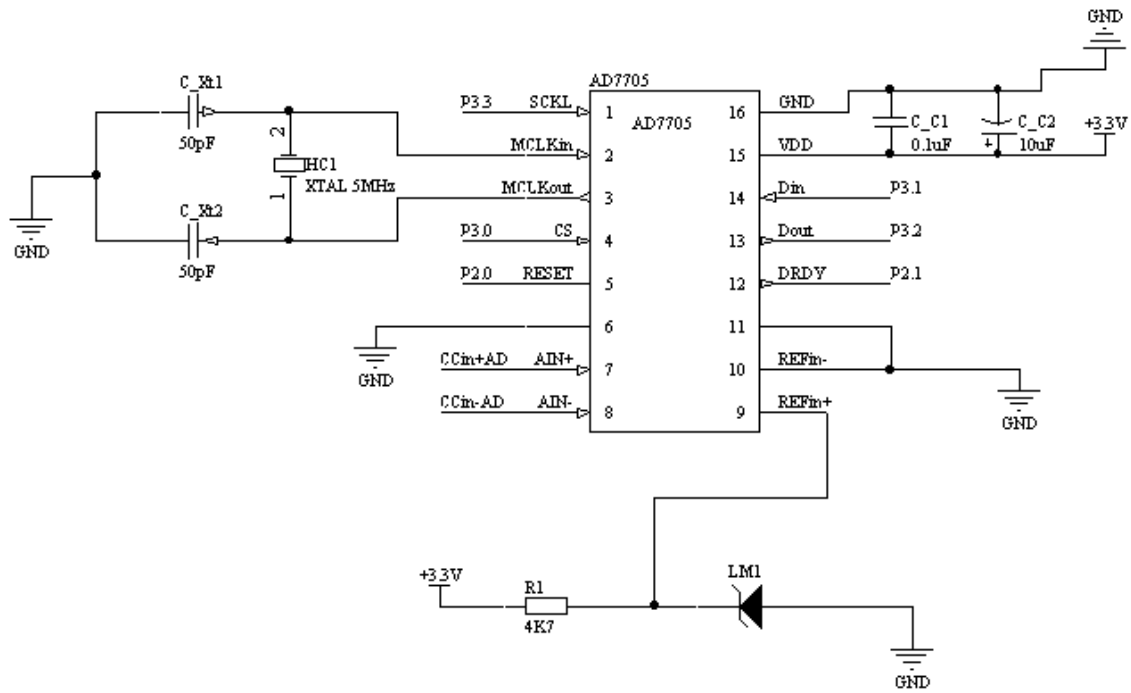


Figura 5.19 – Ligação da célula de carga com o MSP, através do AD7705.

Em relação aos sensores, para além do sensor de presença já aplicado para detectar as voltas do excêntrico, e de modo a respeitar as normas de segurança de um equipamento industrial, dois novos sensores serão acrescentados: um a colocar numa porta de segurança que feche o acesso à zona do excêntrico e da biela, e outro a colocar numa protecção a colocar na zona do amortecedor. Ambos os sensores são de presença, e somente quando ambos assinalarem que as portas estão fechadas, ou seja, estiverem à condução (pois são NO – normalmente abertos), é que o programa pode correr. Estes serão ligados ao TLP521 já abordado. Uma representação da ligação entre os sensores e o MSP, é apresentada na figura 5.20.

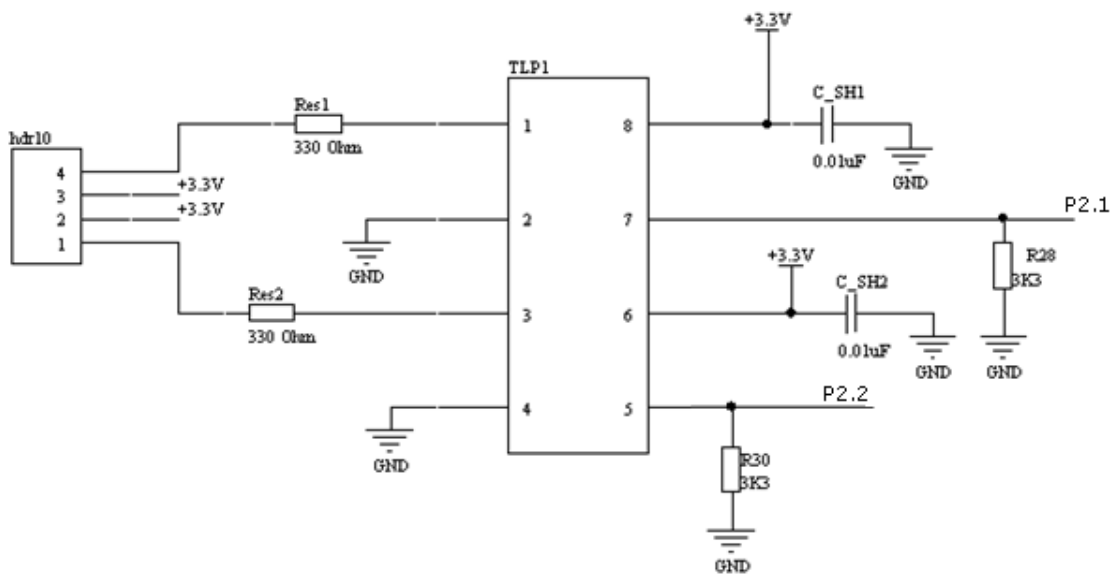


Figura 5.20 – Ligação dos sensores de posição com o MSP, através do TLP521.

Novamente prevendo a possibilidade de se querer futuramente ligar mais algum sensor na máquina, será contemplado mais uma ligação ao TLP521, e deste para o MSP, e ainda duas ligações do MSP ao TLP521, e deste para *headers*, podendo servir por exemplo para acender luzes de emergência.

Assim, tem-se um total de 3 *headers* de quatro ligações (uma para os sensores das portas, uma para o sensor do excêntrico e para outro sensor que se pretenda futuramente aplicar, e uma para duas saídas), e três TLP521 (com dois circuitos cada um).

Cumprindo as indicações da folha de dados do TLP521, em relação às correntes que devem circular nos LED's e nos fototransistores, foram dimensionadas as resistências aplicadas, considerando as tensões aplicadas na sua entrada.

As ligações dos sensores de posição estão apresentadas na figura 5.20, funcionando o circuito da seguinte forma: quando o sensor não detecta nada, a saída está a nível lógico 0, estando ligada a *ground*; quando o sensor detecta, e entra à condução, o LED no interior do integrado acende, sendo esta luz detectada pelo fototransistor, passando a haver na saída nível lógico 1, ou seja, passa a transmitir 3,3 [V].

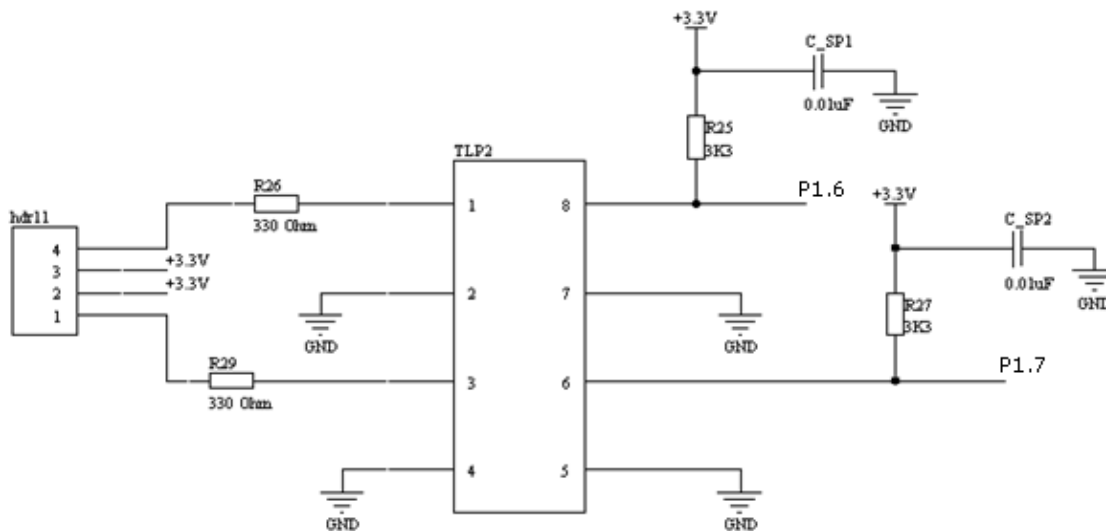


Figura 5.21 – Ligação dos sensores de presença com o MSP, através do TLP521.

No caso dos sensores de presença (caso dos sensores das portas), a ligação é ligeiramente diferente, estando estes a nível lógico 1 (conduzem os 3,3 [V]) no caso de nada detectarem, e estão a nível 0 (ligação a *ground*) no caso de estarem à condução. Esta ligação está representada na figura 5.21.

Finalmente, quanto às saídas do MSP, para a ligação de qualquer componente de baixo consumo energético, como um LED de sinalização de emergência, por exemplo, esta é feita também com um TLP521. O funcionamento é neste caso o seguinte: quando o pino de saída do MSP está a nível lógico 0, este não conduz, estando a *header* ligada a *ground*; quando o pino do MSP passa a nível 1 (saída de 3,3 [V]), o LED acende, entrando o fototransistor à

condução, havendo na *header* uma diferença de potencial que activa o dispositivo a ela ligado. Estas ligações são apresentadas na figura 5.22.

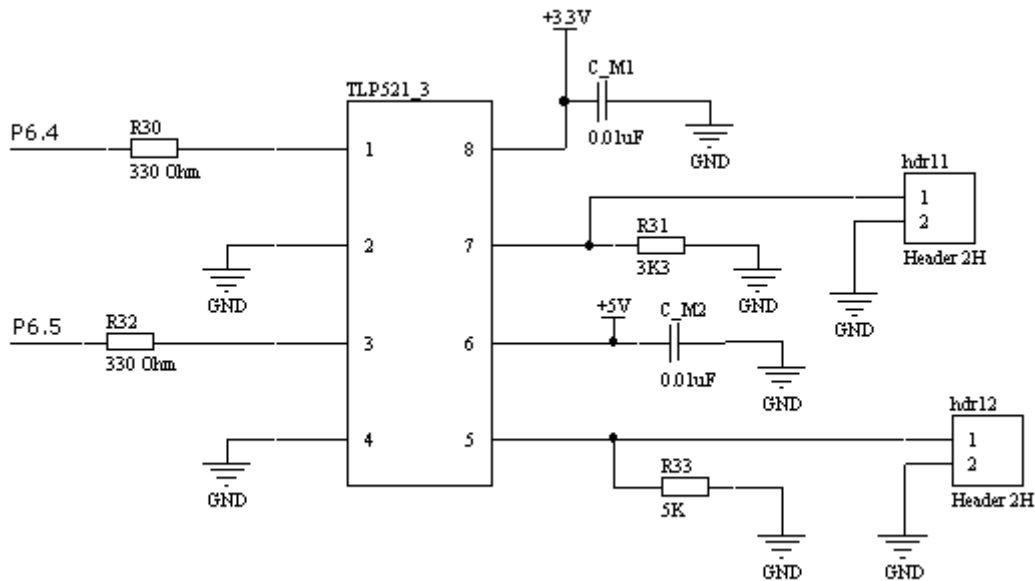


Figura 5.22 – Ligação do MSP com outros componentes, através do TLP521.

5.6. Nova Placa de Circuito Impresso

Redimensionados todos os circuitos de instrumentação, devido ao aumento do número de componentes do circuito, decidiu-se separar estes em duas placas de circuito impresso (*PCB*), onde se façam as ligações dos aparelhos (*VEV*, *encoder*, célula de carga e sensores) por meio de fichas (*headers*), e do microcontrolador MSP430 (ligações aos portos necessários) numa das placas, e as ligações da alimentação de +24 [V] e GND, que irá ligar ao conversor DC-DC, na outra placa.

Começando pela placa onde liga a fonte de alimentação, pretende-se ter num dos cantos do *PCB* a entrada da alimentação atrás referida, através de uma ficha de 2 ligações, que irá ligar a um conversor DC-DC. Deste conversor irão sair as tensões de alimentação das várias fontes, que devem assim ficar junto do conversor. As saídas destas fontes são ligadas a uma ficha de 6 saídas, que irá assim fornecer todas as tensões de alimentação necessárias para a placa onde está feita a instrumentação que liga os vários aparelhos ao MSP430, que tem uma ficha igual, recebendo as tensões de 3,3 [V], 5 [V], 10 [V], +15 [V], -15 [V] e *ground*.

Na segunda placa, onde ligam os vários aparelhos electrónicos, são colocadas várias fichas (ou *headers*), uma para cada aparelho, mais algumas para ligar ao microcontrolador. Deste modo, para os componentes electrónicos, serão necessárias 7 fichas, com o seguinte número de ligações:

- 8 pinos para a célula de carga: um para fornecer os +10 [V], outro para fornecer o GND, dois para ligar as saídas da célula à placa, dois para ligar os pinos que recebem

os sinais da célula de carga ao INA114, e dois para ligar estes mesmos pinos ao AD7705 (estas ligações são opcionais, e feitas através de *jumpers*);

- 4 pinos para o *encoder*: dois para a alimentação deste (5 [V] e GND), um para receber o sinal U_{a1} , outro para receber o sinal U_{a2} , que irá ser ligado ao MC14050B;
- 4 pinos para dois sensores magnéticos, dois para alimentação com 3,3 [V], e dois para ligar as saídas destes;
- 4 pinos para dois sensores de presença, dois para alimentação com 3,3 [V], e dois para receber as saídas destes;
- 4 pinos para duas saídas, um para alimentação com 3,3 [V], um para alimentação com 5 [V], e dois para ligação da linha de terra;
- *Header* DB-9, para ligação da porta RS-232 do VEV com a placa.

Para ligação com o MSP430 é ainda necessária uma *header* com 8 pinos, e três com 4 pinos:

- 8 pinos: um para ligação da célula de carga (saída do INA114, ao pino 6.0), para a ligação do AD7705 aos pinos 2.0, 2.1, 3.0, 3.1, 3.2 e 3.3, e ainda para a ligação do pino 1.1 ao *multiplexer*;
- 4 pinos: dois para alimentação do MSP (3,3 [V] e GND), dois para ligação das saídas 6.5 e 6.6;
- 4 pinos: dois para ligação do *encoder* (pinos 1.4 e 1.5), dois para ligação do TX e RX (pinos 2.4 e 2.5);
- 4 pinos: para ligação dos sensores aos pinos 1.1, 2.2, 2.3 e 6.4.

É ainda necessário usar uma *header* com duas filas de 4 pinos, para ligar dois pinos ao MSP com a informação 0 ou 1: ligação aos pinos 6.2 e 6.3 do MSP, para indicar se é usado o INA114 ou o AD7705, e se é usado *encoder* ou não, para medir a posição. A ligação é feita como apresentado na figura 5.23. Colocando um *jumper*, caso este ligue o pino 1 e 2 desta *header*, o pino 6.2 do MSP irá ficar a nível alto, e caso ligue o pino 3 e 4, o mesmo porto do MSP ficará a nível baixo. O mesmo acontece para os outros pinos da *header*. Para efeitos de programação, se o pino 6.2 estiver a nível baixo significa que será o INA a medir a força, e se estiver a nível alto será o AD7705; já o pino 6.3, se estiver a nível baixo indicará ao programa que não será o *encoder* a medir a posição, caso esteja a nível alto indica que será este aparelho a medir a posição.

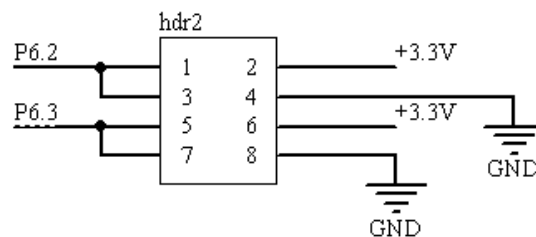


Figura 5.23 – *Header* para definição do estado dos portos P6.2 e P6.3 do MSP.

Quanto às placas propriamente ditas, os componentes devem ser dispostos sobre estas de modo a simplificá-las o máximo possível, com o menor número de vias possível. Assim, os vários blocos foram colocados sempre o mais próximo possível das fichas de ligação com os aparelhos que iriam ligar ao respectivo bloco. A placa número 1, com as fontes de alimentação, vista de cima, está representada na figura 5.24. A placa número 2, com os vários circuitos de instrumentação já referidos ao longo do trabalho, está representada na figura 5.25.

As pistas foram feitas tendo em consideração os seguintes aspectos:

- passagem pela parte de baixo da placa, sempre que possível, para evitar o seu contacto com os vários elementos soldados em cima da placa;
- passagem sempre que possível por fora dos *integrados*, para facilitar a soldagem destes na placa;
- fichas nas bordas da placa, para facilitar a ligação dos aparelhos à placa.

Todos os componentes são do tipo *through-hole*, sendo todos os *integrados* do tipo DIP, montados em furos feitos na placa, e soldados a esta, devendo sempre ser garantido o contacto com as pistas às quais devem estar ligados. As pistas têm uma largura de 0,5 [mm], e os furos a fazer no interior das circunferências um diâmetro de 1 [mm], tendo as circunferências (sem cobre) um diâmetro de 2 [mm].

A placa com os circuitos de instrumentação (número 2) será colocada por cima da placa com os circuitos das alimentações (número 1), pelo que deverá ter 4 furos que permitam a ligação do MSP com esta placa.

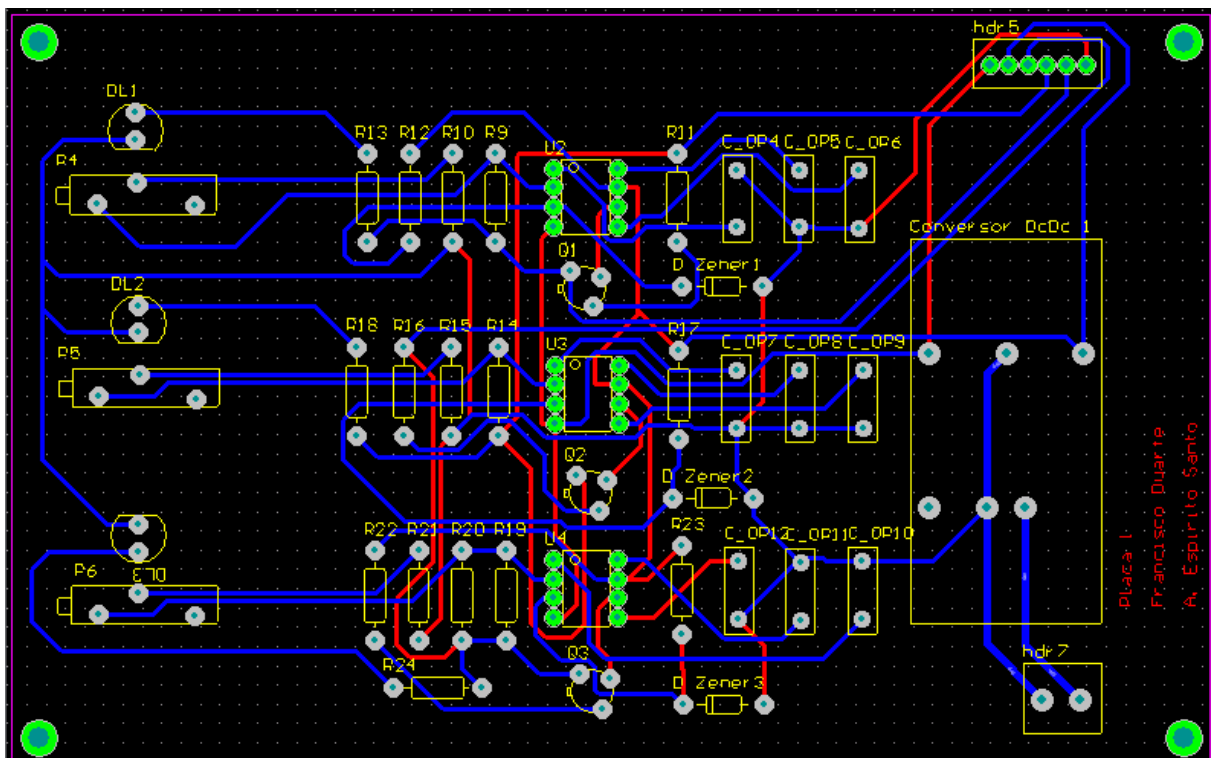


Figura 5.24 – Componentes e ligações da placa de circuito impresso número 1, vista de cima.

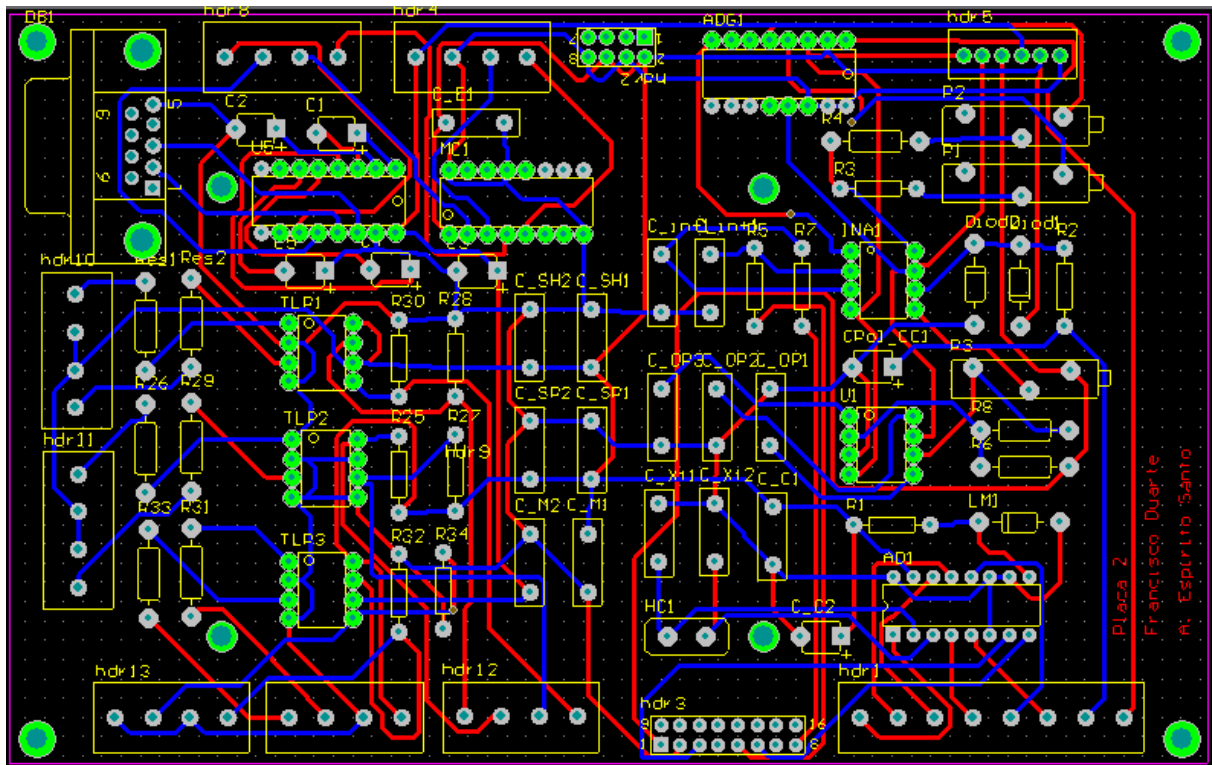


Figura 5.25 – Componentes e ligações da placa de circuito impresso número 2, vista de cima.

Nos cantos das placas são feitos 4 furos com um diâmetro de 4 [mm] por onde irão passar os parafusos de ligação das placas entre si, e a uma caixa apropriada para a ligar à estrutura da máquina.

5.7. Ligação do MSP com o PC

Anteriormente, a ligação do microcontrolador MSP430 da *Texas Instruments* com o PC era feita entre a UART1 do MSP, que estava ligada a uma porta RS232, com uma porta COM do PC, ou seja, uma ligação série RS232. Contudo, verifica-se que actualmente este tipo de comunicação está a entrar em desuso, estando-se a generalizar a adopção da ligação USB.

A ligação USB comporta-se como um barramento *master-slave*, onde o *master* é o USB *host* (que neste caso é o computador), que recebe a informação da ligação (ou desligação) dos vários dispositivos, inicia o processo de enumeração e controla todas as transacções de dados no barramento. Tem também a função de examinar o estado de cada periférico. Os periféricos são *slaves* no barramento, podendo ser de dois tipos:

- funcionais: como teclados, rato, ou neste caso, o microcontrolador;
- hubs: servem para a ligação de outros dispositivos.

O USB pode funcionar em dois modos distintos, nos quais difere a velocidade com que os dados são transmitidos [10]:

- *full-speed*: permite uma velocidade de 12 [Mbps];
- *low-speed*: permite uma velocidade de 1,5 [Mbps].

Este protocolo permite o tráfego de dados em duas direcções:

- *downstream*: dados circulam do *host* para o periférico;
- *upstream*: dados circulam do periférico para o *host*.

O cabo USB é composto por 4 fios e uma malha para eliminação de ruídos simples. Desses, dois são fios que transportam energia para alimentar dispositivos, e dois para transferência de dados. O cabo USB usa cores padrão para os fios, sendo o fio vermelho chamado de *Vbus* (5 [V]), ou seja, é o fio positivo de fornecimento de energia, e o fio de cor preta o GND (0 [V]), sendo este o pino de ligação de terra. Os outros dois fios, D+ e D-, são usados para transmissão de dados entre o *host* e os periféricos (ou a *hub*) através da variação de sinais, diferindo entre eles a velocidade da transmissão: D+ é usado para transferência de dados a 12 [Mbps], e D- a 1,5 [Mbps]. Todos os sinais de dados circulam apenas por estes dois fios, utilizando a codificação NRZI (*Non Return to Zero Inverted*), ou seja, o bit 1 é codificado através de uma transição, ocorrendo esta de maior tensão para menor, ou também o oposto, da menor para a maior. Já o bit 0 é codificado sem haver transição. Durante o intervalo de um bit, a tensão é constante.

Por norma, as duas extremidades de um cabo USB são diferentes, e não comutáveis, o que permite a transmissão bidireccional e evita confusões nas ligações dos cabos.

Para realizar a transferência de dados entre o *PC* e o *MSP*, foi então escolhido um dispositivo da *FTDI Chip*, o *EVAL232*, que é um conversor USB – RS232. Este módulo é constituído por uma porta RS232, um chip FT232R, um chip SP213EHCA, e uma porta USB.

A grande vantagem de usar este circuito é que o chip FT232R, da *FTDI Chip*, já tem todo o protocolo USB carregado, não sendo necessário instalá-lo no microcontrolador, sendo somente necessário instalar as suas *drivers*, disponibilizadas gratuitamente em [11].

O *EVAL232* completo é apresentado na figura 5.26 [11]. As principais vantagens da utilização desta solução são:

- um único chip controla transferências tanto USB como série;
- a UART suporta 7 e 8 bits de dados, e tem 1 ou 2 stop bits, podendo-se seleccionar a paridade desejada;
- taxa de transferência de dados entre 300 e 1 [Mbps], para RS232;
- compatível com USB 1.1 e 2.0;
- baixa tensão de alimentação entre 3,3 e 5,25 [V] – alimentado pelo PC;
- tem integrada uma memória EEPROM externa opcional, podendo ser programada via USB;
- modos de transferência USB Bulk e Isossíncrono.

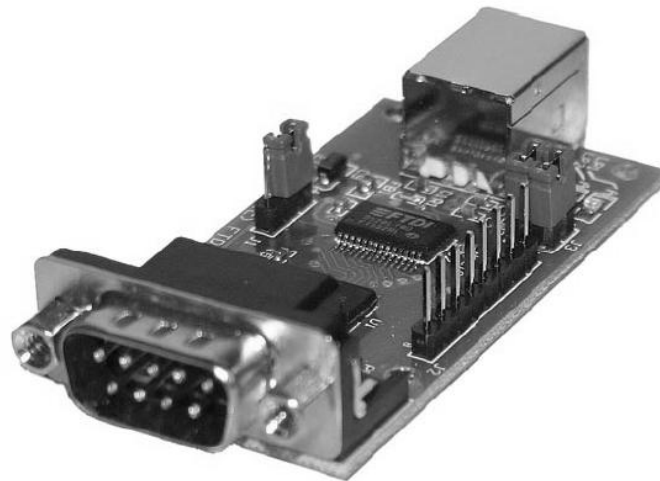


Figura 5.26 – EVAL232, da FTDI Chip.

Finalmente, pode-se verificar na figura 5.27 a ligação do MSP com o EVAL232, e deste último com um cabo USB, pronto a ligar ao PC.

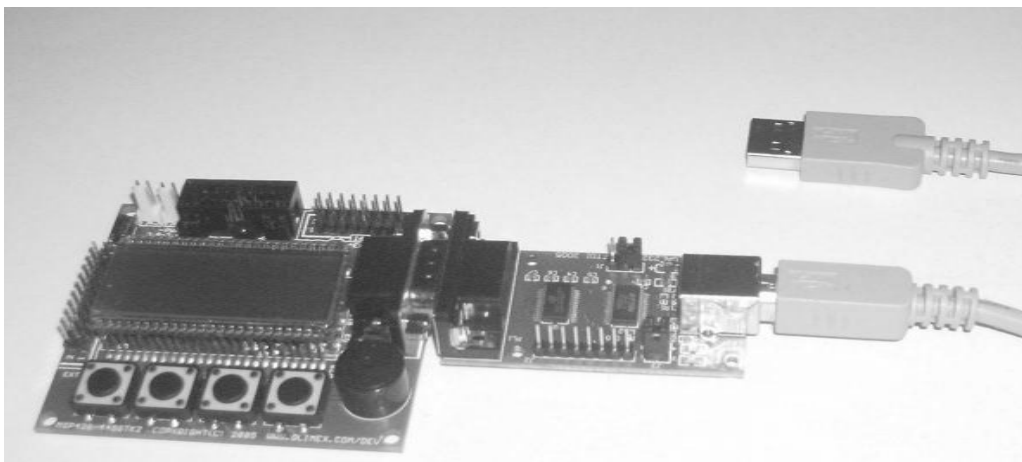


Figura 5.27 – Ligação do MSP com o EVAL232, e deste com um cabo USB.

5.8. Nota Conclusiva

Como conclusões deste capítulo, há a destacar a introdução dos filtros e componentes que permitem minimizar significativamente o ruído e perturbações eléctricas e electrónicas que existiam anteriormente, o que tinha repercussões directas nos resultados obtidos, e ainda no decorrer dos ensaios, e ainda a introdução de novos componentes para permitir a aplicação de novos sensores, que permitem evoluir a máquina em diversos aspectos.

Assim, verifica-se que nesta fase a máquina de ensaio de amortecedores está bastante mais avançada sob o ponto de vista electrónico, e com uma programação adequada, permitirá ao utilizador realizar ensaios com mais segurança, obter resultados mais credíveis e precisos, e

melhorar a máquina a nível mecânico (com a eliminação do *encoder*, e posterior alteração da posição do motor, reduzindo bastante as vibrações a elevadas velocidades).

A máquina fica assim também apta para a colocação de sensores nas portas de segurança, que será um requisito exigido nas normas de segurança analisadas mais à frente, pelo que permitirá através de programação que o ensaio seja parado caso uma porta seja aberta, e que os ensaios só possam ser iniciados com ambas as portas de segurança fechadas.

Com a ligação USB introduzida, a máquina fica adaptada aos computadores portáteis actuais, em que é generalizado o uso deste tipo de ligação, contribuindo assim para o objectivo da universalidade da máquina.

Referências

- [1] F. Duarte, “Máquina para ensaio de amortecedores,” Universidade da Beira Interior, Covilhã – Portugal, 2007.
- [2] Olimex, Development boards and tools, “MSP430-449STK2,” Janeiro 2008, <http://www.olimex.com/dev/index.html>.
- [3] I. Takashi and H. Kanazawa, “Active EMI Filter for Switching Noise of High Frequency Inverters,” *IEEE*, pp331-334, 1997.
- [4] S. Igarashi, S. Takizawa, and K. Kuroki, “Analysis and Reduction of Radiated EMI Noise from Converter Systems,” *Electric Engineering in Japan*, Vol. 130, N°1, pp757-766, 2000.
- [5] Catálogo nº0899.5241 P/9, Série CFW-08, CFW08 Vector Inverter, Manual do Usuário – Inversor de Frequência, WEG, 2006.
- [6] Traco Power, “DC/DC Converters – TEN 20WIN Series, 20 Watt”, Março 2008, <http://www.tracopower.com>.
- [7] Electrónica, “Fontes de Alimentação – Principio de Funcionamento”, Março 2008, <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/202/37/>.
- [8] MSPC Informações Técnicas, “Fontes de Alimentação I-10,” Março 2008, http://www.mspc.eng.br/electrn/fontes_110.shtml.
- [9] G. Asch, *Acquisition de données – Du capteur à l’ordinateur*, Dunod, Paris – França, 1999.
- [10] Universal Serial Bus, “USB Info, Frequently Asked Questions,” Janeiro 2008, <http://www.usb.org/about/faq/>.
- [11] FTDI Chip, “FTDI Evaluation kits – FT232R Modules - EVAL232,” Janeiro 2008, <http://www.ftdichip.com/Products/EvaluationKits/EVAL232R.htm>.

Capítulo

6

Programa de Interface Utilizador-Máquina

Para uma simples utilização da máquina de ensaio de amortecedores, pretende-se desenvolver uma aplicação informática que realize o interface entre o utilizador e a máquina, em que sejam escolhidos no ecrã do PC os dados dos ensaios, e após pressionar um botão, todo o ensaio decorra automaticamente, sendo fornecidos no final os gráficos finais do ensaio. Após esta aplicação ser desenvolvida, terá ainda de se desenvolver um novo programa para o microcontrolador, que receba os dados do ensaio escolhidos pelo utilizador, que os processe e controle o ensaio, e no final deste envie os resultados para o PC na forma pretendida.

6.1. Introdução ao Programa de Interface

Uma das principais características e vantagens da máquina de ensaio de amortecedores desenvolvida é a de permitir ensaiar este tipo de equipamentos com vários cursos de ensaio, e a várias velocidades. Quanto ao curso de ensaio, esse pode ser alterado mecanicamente; porém, as velocidades de ensaio, só podem ser controladas através do VEV, o qual está ligado ao MSP430, que por sua vez é controlado pelo computador.

No trabalho anteriormente realizado eram enviados os bytes referentes a cada velocidade num pacote de dados, para o MSP430, o que fazia com que o utilizador tivesse de primeiro definir as velocidades que queria ensaiar, a ordem destas, depois associar um byte a cada velocidade seleccionada, escrever o pacote de dados numa janela do computador (em bytes hexadecimais), e enviar o pacote de dados para o microcontrolador. O processo de recepção de dados era semelhante, em que todos os bytes eram recebidos num pacote, sendo necessário guardar esse pacote de dados, importá-lo para outro programa, e aí tratar os dados, de modo a obter os gráficos *força-velocidade* e *força-posição*.

Verifica-se assim que o processo anterior para realizar os ensaios, sob o ponto de vista do utilizador, era bastante complexo, e trabalhoso, não sendo o conceito de interface utilizador-máquina muito simples.

Assim, neste capítulo será desenvolvido um programa para o utilizador interagir com a máquina de ensaio de amortecedores, em que o utilizador tem somente de seleccionar os dados do ensaio numa janela, clicar no botão OK, e todo o processo de conversão para bytes, colocação dos bytes num pacote de dados, envio para o MSP430, recepção dos dados do ensaio, tratamento destes e criação dos gráficos, se processará automaticamente, sem qualquer acção por parte do utilizador. Para tal vai ser usado o conceito de programação orientada a objectos, OOP.

A aplicação a utilizar será o *Visual C# 2005 Express Edition* da Microsoft, que permite o desenvolvimento de programas numa linguagem de programação sofisticada, e a plataforma .NET, uma tecnologia da Microsoft sobre a qual os programas desenvolvidos para o Windows são executados.

Este tipo de aplicação permite desenvolver programas adicionando controlos a uma janela, especificando as suas propriedades e acções sobre esses controlos, e escrevendo linhas de código para implementar as funcionalidades. Esta característica evidencia aquilo que se designa desenvolvimento rápido de aplicações.

A linguagem de programação é C#, baseada principalmente no C++, mas que inclui aspectos de várias outras linguagens de programação, nomeadamente Delphi, Visual Basic e Java.

Uma grande vantagem de utilizar esta aplicação é que esta é disponibilizada pela Microsoft gratuitamente, podendo ser utilizada por qualquer programador, e por qualquer utilizador sem qualquer tipo de custos, podendo-se assim desenvolver programas de forma livre.

O Visual C# possui algumas características que visam ajudar o programador a desenvolver aplicações de forma simples e rápida, sendo de seguida apresentadas as principais [1]:

- *IntelliSense* – tecnologia que disponibiliza sugestões de sintaxe e permite indentar e completar palavras de forma automática;
- editar e continuar – permite fazer alterações ao código do programa durante o *debug* deste, e continuar a sua execução, já com as alterações realizadas, sem parar a execução do programa;
- fragmentos de código (*code Snippets*) – são fragmentos de código reutilizáveis que aumentam a produtividade e reduzem o número de erros do programa, pois mostram a forma recomendada de realizar tarefas;
- listagem de erros e avisos – são lançados alertas com os erros de programação, à medida que o código vai sendo escrito, permitindo ao programador corrigir esses erros na hora;
- comentários XML – permite a adição de comentários no código em formato XML que podem ser facilmente extraídos e convertidos em documentação;
- renomear – permite alterar o nome dos identificadores utilizados no código, como por exemplo variáveis, métodos e propriedades;
- modelos de itens novos – são disponibilizados alguns modelos de itens de modo a que possa ser mais produtivo o desenvolvimento de aplicações;
- controlos novos – são disponibilizados muitos controlos, através dos quais serão construídas aplicações com uma interface gráfica rica e profissional, estando estes agrupados numa Toolbox;
- *Smart Tags* – uma grande parte dos controlos inclui uma pequena imagem que permite o acesso rápido às acções mais comuns sobre esse controlo;
- integração com o SQL server – permite criar bases de dados e tabelas, inserir dados e consultar esses dados, sem ser necessário sair do ambiente de desenvolvimento.

Verifica-se assim que com esta aplicação estão reunidas as condições para criar um ambiente gráfico com que qualquer utilizador seja capaz de interagir facilmente, que é o principal objectivo da criação deste programa.

Pretende-se que o programa funcione do seguinte modo:

- Parte 1 – Selecção e envio de dados: ao abrir o programa irá aparecer uma janela com vários campos, onde se seleccionam os parâmetros do ensaio. Esta janela tem ainda o botão limpar, para apagar todos os campos, e o botão enviar, para confirmar todos os valores seleccionados e envia-los para o microcontrolador, de modo a iniciar o ensaio;
- Parte 2 – Recepção e tratamento de dados: os dados referentes às medições realizadas pelos aparelhos da máquina serão recebidos no *PC*, guardados em ficheiros de texto, e tratados dentro do programa, de forma automática, sem requerer acções por parte do utilizador, nem abrir qualquer janela;
- Parte 3 – Apresentação de gráficos: com os dados recebidos, e já com estes devidamente tratados, serão feitos os gráficos *força-velocidade* e *força-posição*, os

quais são apresentados numa nova janela. Para um ensaio, serão apresentadas tantas curvas quantas velocidades forem ensaiadas;

- Opções do programa: O programa dará ainda diversas opções ao utilizador, como guardar e abrir os dados de um ensaio ou os gráficos obtidos, calibrar a célula de carga, abrir o manual do utilizador, ou solicitar ajuda ao fabricante.

6.2. Descrição do programa de interface

O fluxograma do programa de interface utilizador-máquina é apresentado na figura 6.1.

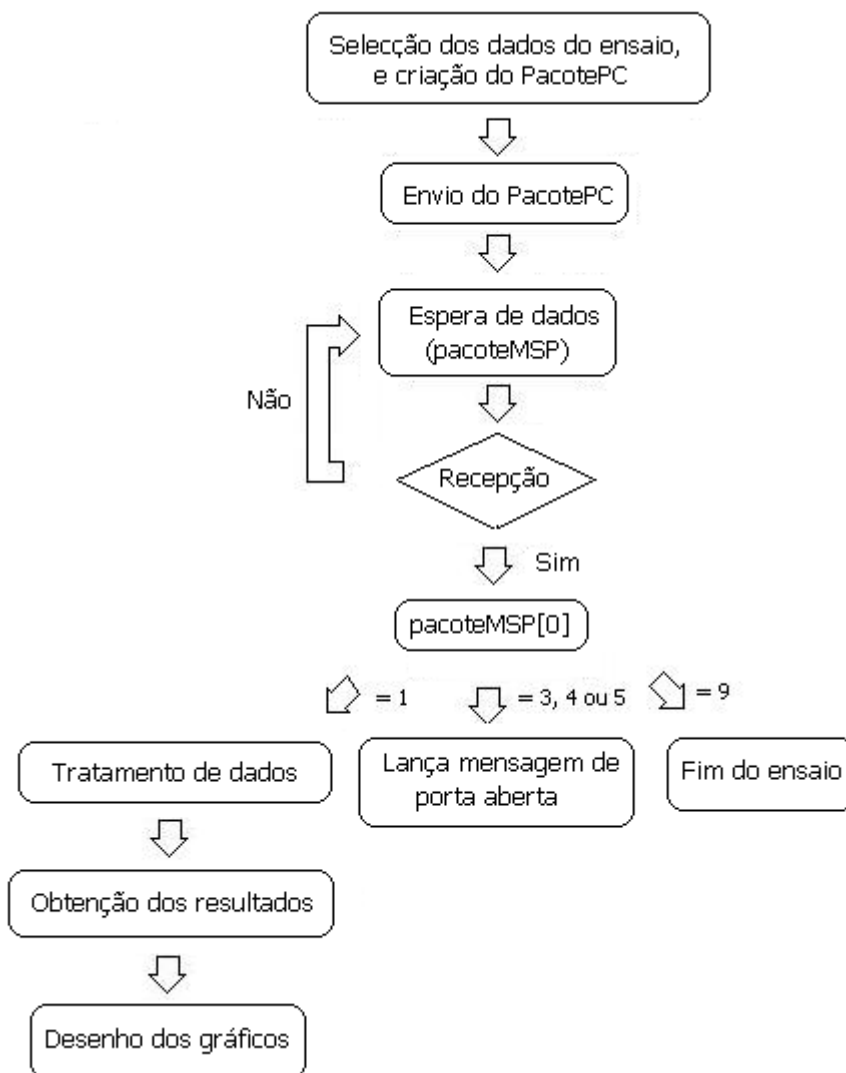


Figura 6.1 – Fluxograma do programa de interface utilizador-máquina.

De seguida será apresentado e explicado todo o programa, como funciona e como foi desenvolvido, de modo a que no final do capítulo se consiga compreender os vários passos do seu desenvolvimento.

6.2.1. Selecção de dados

A primeira parte do programa consiste em seleccionar os dados do ensaio que se pretende realizar, usando-se para tal uma janela (*form*) com vários campos: um para inserir o nome do ensaio, um para seleccionar o tipo de equipamento, outro para definir o curso de ensaio, outro para definir o número de voltas em cada velocidade, outro para definir o número de velocidades do ensaio, e finalmente os vários campos para escolher as velocidades do ensaio. Somente quando todos os campos estiverem preenchidos, será possível enviá-los para o microcontrolador, dando início ao ensaio.

Ao abrir o programa, a janela que irá aparecer ao utilizador é apresentada na figura 6.2.

Figura 6.2 – Janela inicial do programa, para selecção e envio dos dados do ensaio.

Esta janela é constituída pelos seguintes elementos, e respectivas propriedades:

- caixa de texto *txtNome* – caixa de texto onde será inserido o nome do ensaio;
- caixa para selecção do equipamento – permite seleccionar uma das duas opções disponibilizadas (*Amortecedor* ou *Suspensão*);

- caixa de texto *txtCurso* – permite seleccionar um e só um dos valores disponibilizados (40, 50, 60, ..., 170, 180), referente ao curso a ensaiar;
- caixa de texto *txtNvoltas* – permite seleccionar um e um só valor para o número de voltas em cada velocidade (10, 15, 20, 25, 30, 40 e 50);
- caixa de texto *Nvelocidades* – permite seleccionar um e um só número de velocidades a ensaiar (de 1 a 10);
- caixas de texto *vell ... vell0* – permitem seleccionar um e um só valor por caixa, da velocidade que se pretende ensaiar. Só ficam disponíveis as caixas das velocidades que o utilizador pretender ensaiar, seleccionadas na caixa de texto *txtNvelocidades*.
- botão *OK* – ao pressionar, lança uma mensagem ao utilizador, alertando para algum campo que falte preencher, ou perguntando se pretende iniciar o ensaio com os dados introduzidos;
- botão *Limpar* – ao pressionar, limpa todas as caixas de texto da janela;
- barra de menus – disponibiliza ao utilizador várias opções: *Ficheiro*, para abrir ou guardar os valores referentes aos dados, ou ainda para iniciar um novo ensaio ou sair do actual; *Gráficos*, que permite abrir ou guardar os gráficos finais; *Relatórios*, para gerar relatórios dos ensaios; *Manual do utilizador*, para abrir o referido manual; *Calibração*, para calibrar a célula de carga; e *Ajuda*, para obter o contacto do fabricante.

Ao abrir o programa de interface, o utilizador deverá começar por escrever o nome que deseja atribuir ao ensaio, no campo “Nome do ensaio”. Este é o único campo em que o utilizador poderá escrever, sendo todos os outros de selecção de opções. O texto escrito será guardado na variável *txtNome*, que é definida como um *string*.

Os campos que se seguem servem para seleccionar os dados do ensaio a realizar, e destinam-se à criação de um pacote de dados a enviar pelo computador, para o microcontrolador: o *pacotePC*. Este pacote tem 15 bytes, sendo de seguida abordados um a um.

Após preenchido o campo do nome do ensaio, deve ser seleccionado o equipamento que se vai ensaiar: *Amortecedor* ou *Suspensão*; com a selecção do equipamento, será colocado na segunda posição do pacote de dados a enviar pelo PC o valor: 01 (para amortecedor) ou 02 (para suspensão), sendo esta selecção importante para definir o ganho da célula de carga, visto a gama de forças realizadas pelos equipamentos ser diferente. Esse ganho será definido posteriormente pelo MSP, após análise do segundo byte do pacote recebido, sendo essa definição abordada mais à frente.

No campo do “curso de ensaio” deve-se seleccionar o curso que se vai ensaiar, mas este servirá somente para a criação dos gráficos, ou seja, não entra no pacote de dados a enviar para o MSP. Estão disponíveis todos os cursos que a máquina permite ensaiar, devendo assim o utilizador seleccionar aquele que irá ser testado (de 40 a 180 [mm]).

No campo relativo ao “número de voltas”, deverá ser seleccionada uma das opções disponíveis de voltas por velocidade: 10, 15, 20, 25, 30, 40 ou 50. O valor seleccionado será

guardado como uma *string* (*txtNvolta*), e convertido depois para um inteiro (*int*), que será colocado na terceira posição do *pacotePC*, com valores de 01 a 07, correspondente às velocidades de 10 a 50, respectivamente.

Quanto ao número de velocidades, é seleccionado no campo com o mesmo nome, e pode ser de 1 a 10. Este irá ser colocado na quarta posição do *pacotePC*, também com um valor de 1 a 10, e a sua selecção irá influir noutros pontos do programa: consoante o número seleccionado neste campo, irão ser disponibilizados os devidos campos das velocidades (de 1 até ao número seleccionado), sendo as restantes (do número seleccionado até 10) colocadas imediatamente a 00. Também no microcontrolador esse valor irá servir para marcar o final do ensaio, pois quando o número de velocidades ensaiadas for igual ao valor deste parâmetro, será dada a indicação que após o ensaio dessa velocidade, é enviada a ordem de paragem ao motor, e consequentemente o ensaio é terminado.

Depois devem-se preencher os campos das velocidades a ensaiar, escolhendo-se os valores pretendidos, em [rpm], sendo disponibilizadas para escolha velocidades desde 40 a 230 [rpm], com intervalos de 10 [rpm] entre elas, perfazendo um total de 20 opções. Estes valores serão colocados entre as posições 5 e 14 do *pacotePC*, com valores entre 0 (para o caso da velocidade ser igual a 0, nos campos não disponíveis) e 20 (para a velocidade mais elevada, correspondente a 240 [rpm]).

O primeiro valor do *pacotePC* é definido somente quando se pressiona o botão *OK* (que só permite enviar os dados após todos os campos estarem devidamente preenchidos). Caso se confirme o envio de dados, é colocado o valor 01 nesta posição do pacote.

Ainda antes do envio dos dados será definido o byte da última posição do *pacotePC*, que consiste num XOR de todos os bytes do pacote, servindo assim como um byte de confirmação, a usar pelo microcontrolador, para confirmar que todos os bytes enviados pelo *PC* foram recebidos.

Curso [mm]

Núm

Número de Velocidades

40
50
60
70
80
90
100

Figura 6.3 – Selecção do curso de ensaio.

De referir novamente que o utilizador só terá de escrever no campo *Nome do Ensaio*, pois os restantes são de selecção. Assim, quando pretender seleccionar o curso, por exemplo, ao clicar sobre o campo correspondente a este parâmetro, irão ser disponibilizados todos os valores possíveis dos cursos, devendo o utilizador somente escolher aquele que vai testar, como representado na figura 6.3.

Outro aspecto a realçar é o facto de o botão *OK* só permitir realmente iniciar um ensaio caso estejam todos os campos preenchidos; caso contrário será dada a indicação ao utilizador que deverá preencher todos os campos antes de iniciar o ensaio, como apresentado na figura 6.4.

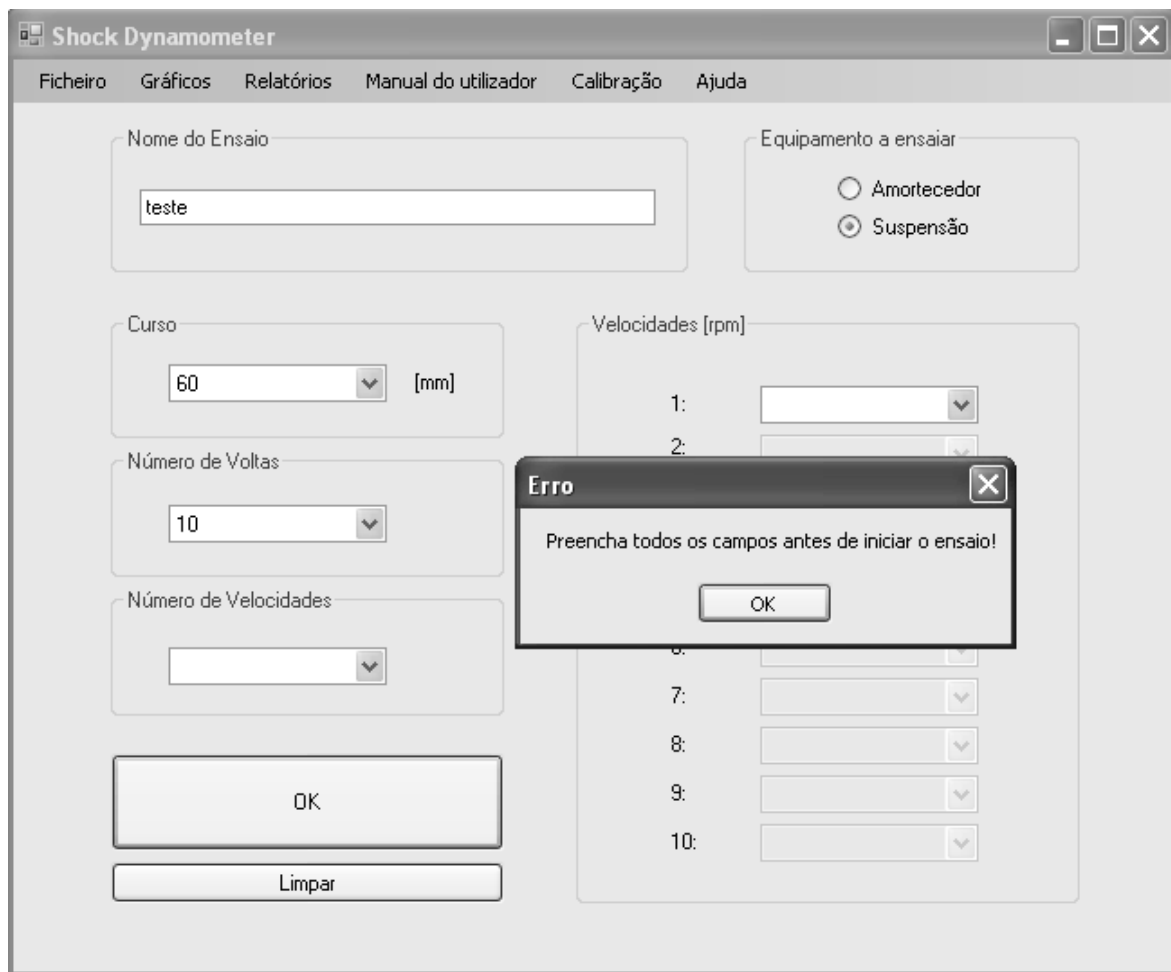


Figura 6.4 – Mensagem de erro caso o utilizador pretenda iniciar o ensaio sem preencher todos os campos.

O botão de limpar, faz com que todas as caixas de texto (*textBox's*) sejam limpas, limpando assim os valores de todas as variáveis, com a excepção do número de velocidades a ensaiar, que é colocado a 1, de modo a ficar disponibilizada a caixa da primeira velocidade. As restantes, são colocadas a zero, sendo disponibilizadas depois aquelas que o utilizador pretender ensaiar.

Resumindo, a constituição do *pacotePC* é apresentada na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Constituição do *pacotePC*.

Posição	Descrição	Valores
<i>pacotePC</i> [0]	Acção a realizar	01 a 05
<i>pacotePC</i> [1]	Equipamento a ensaiar	01 ou 02
<i>pacotePC</i> [2]	Número de voltas por velocidade	01 a 07
<i>pacotePC</i> [3]	Número de velocidades e ensaiar	01 a 10
<i>pacotePC</i> [4]	Valor da primeira velocidade	01 a 20
<i>pacotePC</i> [5]	Valor da segunda velocidade	00 a 20
<i>pacotePC</i> [6]	Valor da terceira velocidade	00 a 20
<i>pacotePC</i> [7]	Valor da quarta velocidade	00 a 20
<i>pacotePC</i> [8]	Valor da quinta velocidade	00 a 20
<i>pacotePC</i> [9]	Valor da sexta velocidade	00 a 20
<i>pacotePC</i> [10]	Valor da sétima velocidade	00 a 20
<i>pacotePC</i> [11]	Valor da oitava velocidade	00 a 20
<i>pacotePC</i> [12]	Valor da nona velocidade	00 a 20
<i>pacotePC</i> [13]	Valor da décima velocidade	00 a 20
<i>pacotePC</i> [14]	<i>Checksum</i>	00 a 256

Em relação ao primeiro byte do pacote de dados a enviar, só ainda foi referido que será igual a 1 quando se confirma o envio de dados. Para este e outros valores, é apresentado na tabela 6.2 o significado de cada um.

Tabela 6.2 – Significado do primeiro byte do *pacotePC*.

Byte	Acção
01	Início de ensaio
02	Cancelar ensaio
03	Início de calibração

6.2.2. Envio de dados

Por questões de clareza e segurança, é lançada uma mensagem ao utilizador, após pressionar o botão *OK*, se pretende mesmo iniciar o ensaio com os dados introduzidos. Somente se o utilizador confirmar, é que o pacote de dados é enviado para o MSP, iniciando-se de seguida o ensaio.

Para isto ser possível, foi introduzida no programa uma porta COM, e definida de acordo com as características da porta COM do MSP, ou seja, com uma taxa de transmissão de dados de 9600 [bits/s], caracteres de 8 bits, paridade par e um stop bit.

Assim, ao clicar no botão *OK*, e confirmar os dados a enviar, habilita-se a porta COM, selecciona-se e envia-se o pacote de dados *pacotePC*, com um offset de 0 bytes, e o tamanho do pacote de dados completo, e fecha-se novamente a porta COM, como apresentado a seguir:

```
usb.Open();
usb.Write(pacotePC, 0, pacotePC.Length);
usb.Close();
```

Está assim concluído o processo de envio de dados para o microcontrolador, cabendo depois a este analisá-los e realizar os ensaios de acordo com os dados desse pacote.

De seguida é definido o *form* dos gráficos, aberta a respectiva janela, passando o programa para a o código dessa janela, que é abordado de seguida.

6.2.3. Definição do *form* gráficos. Recepção e tratamento de dados

Ao abrir a janela de gráficos, apresentada na figura 6.5, é definida a matriz *resultadoFinal*, onde serão escritos todos os resultados dos ensaios, após os dados serem recebidos e tratados. Esta é definida com 10 linhas, e com 1086 colunas, sendo cada uma das linhas para cada velocidade ensaiada, e nas colunas são escritos os vários parâmetros, apresentados na tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Parâmetros das colunas da matriz *resultadoFinal*.

Coluna	Parâmetro
0	Número da velocidade
1	Velocidade [rpm]
2	Pré-carga [kg.f]
3	Tempo de uma rotação
4 – 363	Força 1 -360 [kg.f]
364	Força mínima [kg.f]
365	Força máxima [kg.f]
366 – 725	Velocidade linear 1 – 360 [mm/s]
726 – 1085	Posição linear 1 – 360 [mm]

Serão assim calculados pelo programa 360 valores de força, posição linear, e velocidade linear, correspondendo aos 360 valores medidos pelo MSP para o ensaio de uma velocidade, sendo o método para realizar o cálculo apresentado mais à frente.

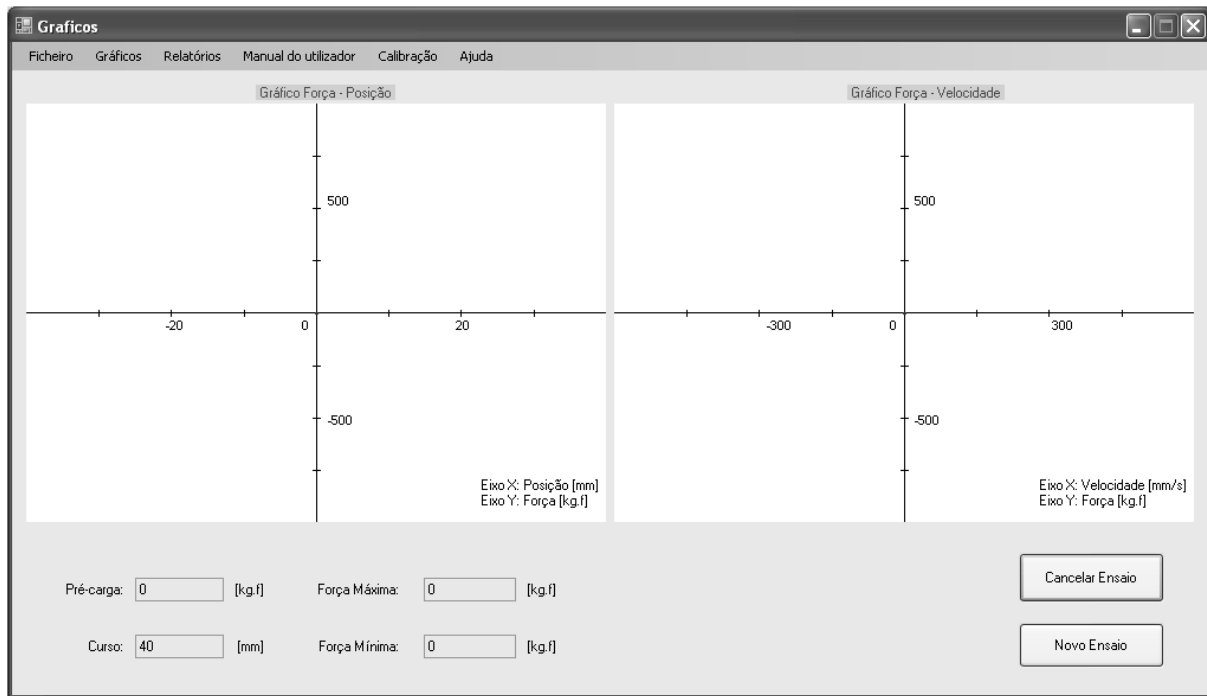


Figura 6.5 – Janela de gráficos (antes de preenchida).

Os gráficos que se pretendem apresentar são *força-posição* e *força-velocidade*, pelo que se definirá três vectores para cada velocidade, a partir da matriz com os resultados:

- o vector *yy*, correspondente à força, que irá ter os valores da matriz *resultadoFinal* entre as posições 4 e 363;
- o vector *xx*, correspondente à posição, que irá ter os valores da matriz *resultadoFinal* entre as posições 726 e 1085;
- o vector *zz*, correspondente à velocidade linear, que irá ter os valores da matriz *resultadoFinal* entre as posições 366 e 725;

O programa define logo no início os eixos X e Y a apresentar nos gráficos, e todos os gráficos em simultâneo. Como a matriz *resultadoFinal* é inicializada a zero, todos os vectores *xx*, *yy* e *zz* (10 de cada, um por velocidade) são inicializados a zero, aparecendo então um único ponto a vermelho em ambos os gráficos, em [0,0].

Para que sejam recebidos os dados do ensaio, e para que sejam também tratados e colocados os resultados na matriz *resultadoFinal*, são criadas as funções *recepcaoDados* e *tratamentoDados*.

A rotina *recepcaoDados* é habilitada cada vez que forem recebidos dados na porta COM, permitindo guardar os dados recebidos, e tratá-los de seguida, conforme o primeiro byte do pacote recebido. O procedimento é idêntico ao de envio, ou seja, em primeiro lugar é aberta a porta USB (ainda na função principal do programa), depois são lidos os bytes recebidos (neste caso, que estão no *buffer* dos dados que foram enviados para a porta USB), mas a porta COM é mantida aberta durante todo o programa, de modo a que a função *recepcaoDados* seja

habilitada cada vez que for recebido um pacote de dados nesta porta. Assim, a porta COM é fechada somente quando o ensaio é cancelado, ou terminado.

Os dados recebidos são guardados num pacote de dados, denominado de *pacoteMSP*, que tem um tamanho de 369 bytes, com a constituição apresentada de seguida.

O primeiro byte (*pacoteMsp[0]*) é sempre referente a uma mensagem a passar do MSP ao PC. Os valores que este pode ter e aquilo que o PC irá fazer, estão apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Significado do primeiro byte do *pacoteMSP*.

Byte	Acção
01	Início de ensaio
03	Porta de cima aberta
04	Porta de baixo aberta
05	Portas abertas
07	Calibração
09	Fim do ensaio

O segundo byte (*pacoteMsp[1]*) é referente ao número de velocidades que são ensaiadas no ensaio em curso, que pode ser de 1 a 10;

O terceiro byte (*pacoteMsp[2]*) é referente ao número da velocidade a que o pacote de dados corresponde, podendo assim ser de 1 a 10;

O quarto byte (*pacoteMsp[3]*) é referente ao valor da velocidade a que o pacote de dados corresponde, podendo ser de 1 a 20, correspondendo a velocidades entre 40 e 230 [rpm];

O quinto byte (*pacoteMsp[4]*) serve para informar o programa se foi ou não utilizado *encoder* para medição da posição do excêntrico: se este for igual a 01 foi utilizado *encoder*, se for igual a 02 significa que esse aparelho não foi utilizado;

O sexto byte (*pacoteMsp[5]*) serve para informar o programa se a medição da força foi feita pelo ADC do microcontrolador, ou por um ADC externo (AD7705): se for igual a 06 foi utilizado o ADC do MSP, se for igual a 07 foi utilizado um ADC externo;

O sétimo byte (*pacoteMsp[6]*) é referente à pré-carga, medida pela célula de carga no início do ensaio, quando a biela se encontra no ponto morto inferior do excêntrico. Este byte é correspondente a um valor de tensão, sendo posteriormente tratado para passar a um valor de força.

O oitavo byte (*pacoteMsp[7]*) é referente a um valor de tempo. Caso a medição do tempo tenha sido feita com o *encoder*, este corresponde ao tempo que o excêntrico demora a percorrer 1,008°. Caso não se tenha utilizado o *encoder*, este é o tempo que o excêntrico demora a fazer uma volta completa. O valor desta posição deverá ser tratado de modo a obter a velocidade de rotação do excêntrico;

Entre os bytes 9 e 368 (*pacoteMsp[8] – pacoteMsp[367]*) são colocados os valores da força exercida em cada grau, tendo-se assim 360 valores de força, isto para o caso da medição da posição ter sido feita sem *encoder*. Caso este tenha sido utilizado, só se terão 357 valores de força, sendo os últimos três bytes colocados a zero.

O byte 369 (*pacoteMsp[368]*) irá conter um *checksum*, que consiste num *XOR* (ou exclusivo) feito a todos os bytes deste pacote, ainda no MSP, que servirá para o PC confirmar que os bytes recebidos são os mesmos que foram enviados.

É recebido um pacote por cada velocidade ensaiada, pelo que serão recebidos até 10 pacotes de dados por ensaio, no caso de este decorrer normalmente. Caso uma porta de segurança (ou mesmo as duas) seja aberta, é recebido um pacote de dados somente com a primeira posição a dar essa informação, com um dos bytes reservado para o efeito. O programa irá nesse caso informar o utilizador desse facto, apresentando uma mensagem como a da figura 6.6 (caso de ambas as portas estarem abertas).

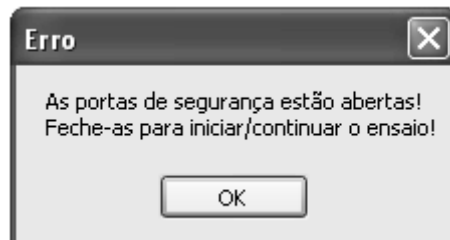


Figura 6.6 – Mensagem de erro caso as portas de segurança estejam (ou sejam) abertas.

No final de todas as velocidades serem ensaiadas, o MSP envia também um pacote de dados só com o primeiro byte a dar a informação de fim de ensaio, como referido na tabela 6.4. Resumindo, a constituição do *pacoteMSP* é apresentada na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Constituição do *pacoteMSP*.

Posição	Descrição	Valores
<i>pacoteMSP[0]</i>	Acção a realizar	01 a 09
<i>pacoteMSP[1]</i>	Número de velocidades ensaiadas	01 a 10
<i>pacoteMSP [2]</i>	Número da velocidade ensaiada	01 a 10
<i>pacoteMSP [3]</i>	Valor da velocidade ensaiada	40 a 230
<i>pacoteMSP [4]</i>	Informação da medição de tempos	01 ou 02
<i>pacoteMSP [5]</i>	Informação da medição de força	01 ou 02
<i>pacoteMSP [6]</i>	Pré-carga	00 a 256
<i>pacoteMSP [7]</i>	Tempo	00 a 256
<i>pacoteMSP [8 - 367]</i>	Força na posição 1 – 360	00 a 256
<i>pacoteMSP [368]</i>	<i>Checksum</i>	00 a 256

Após receber o pacote de dados do MSP, o programa vai realizar uma acção em função do valor do primeiro byte: se este for igual a 01, o programa segue para a rotina *tratamentoDados*, onde é feito todo o tratamento dos dados. Caso este valor seja igual a 03, 04 ou 05, é lançada uma janela de aviso a informar que uma ou as duas portas estão abertas.

Na rotina *tratamentoDados*, começa por se definir uma matriz *resultados*, que é idêntica à matriz *resultadoFinal*, com a diferença dos seus valores serem do tipo *double* (valores reais de precisão dupla), enquanto que na segunda serem do tipo *float* (valores reais de precisão simples), seguindo-se a definição das várias variáveis, em função dos bytes do *pacoteMSP*. Estas são apresentadas na tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Variáveis associadas aos dados do *pacoteMSP*.

Posição	Variável
<i>pacoteMSP[1]</i>	<i>nVelocidades</i>
<i>pacoteMSP [2]</i>	<i>numeroVel</i>
<i>pacoteMSP [3]</i>	<i>velocidadeRpm</i>
<i>pacoteMSP [4]</i>	<i>encoder</i>
<i>pacoteMSP [5]</i>	<i>ccarga</i>
<i>pacoteMSP [6]</i>	<i>preCarga1</i>
<i>pacoteMSP [7]</i>	<i>tempo</i>
<i>pacoteMSP[368]</i>	<i>bcc</i>

A primeira acção propriamente dita consiste em guardar o número da velocidade ensaiada e o valor desta na matriz *resultados*, nas posições 0 e 1, respectivamente, da linha correspondente ao número da velocidade (linha *numero da velocidade* – 1).

Começando por calcular a pré-carga, é usada a seguinte expressão:

```
preCarga = (preCarga1 - 128) * mult - 128;
```

Onde *mult* é o factor de multiplicação, que depende do equipamento de ensaio, ou seja, do ganho aplicado ao amplificador de instrumentação onde está ligada a célula de carga (INA114). Assim, impõem-se as condições:

```
if(equipamento == "Amortecedor") mult = 1000;
if(equipamento == "Suspensao") mult = 500;
```

Isto porque quando o equipamento a ensaiar é um amortecedor, a escala da força é de -1000 até +1000 [kg.f], e quando o equipamento é uma suspensão, a escala é de -500 a +500 [kg.f], e como os valores recebidos são de 0 a 255, correspondendo o 0 ao valor mínimo da escala da força, e 255 ao valor máximo da mesma escala, ao aplicar a equação anterior consegue-se converter o valor recebido (de 0 a 255) num valor de força (de -1000 a +1000, ou de -500 a +500 [kg.f]).

Assim que se calcula esta variável, o seu valor é logo guardado na matriz *resultados*, na posição 2 da linha correspondente. Com esta definida, pode-se calcular o vector força, começando por definir o vector *forca1*, constituído pelos dados do *pacoteMsp*, entre as posições 8 e 367. Depois, calcula-se o vector da força através da seguinte expressão:

```
forca2[] = (forca1[gm] - 128) * mult / 128;
forca[] = forca2[gm] - preCarga;
```

O factor de multiplicação *mult* volta a ser o usado no cálculo da pré-carga, definido em função do equipamento, e para o cálculo do valor correcto da força, desconta-se ao valor medido o valor da pré-carga, por ser um valor “residual”, afectando todos os valores medidos no ensaio.

Os valores do vector *forca* correspondentes às 360 forças de uma volta são guardados na matriz *resultados*, entre as posições 4 e 363, da linha correspondente à velocidade ensaiada.

Calculam-se depois os valores máximo e mínimo da força, ficando estes guardados nas variáveis *forcaMin* e *forcaMax*, sendo também guardados na matriz *resultados*, nas posições 364 e 365, respectivamente.

Para definir os vectores posição e velocidade, é necessário saber se foi utilizado ou não o *encoder*, utilizando-se para tal o valor da variável com o mesmo nome. Caso se tenha utilizado este equipamento, a expressão a aplicar é:

```
for (int po = 1; po <= 357; po++)
{
    int ps = po - 1;
    posicao[ps] = po;
}

for (int pi = 358; pi <= 360; pi++)
{
    int pca = pi - 1;
    posicao[pca] = 0;
}
```

Pode-se verificar da expressão anterior que, caso se utilize o *encoder*, o vector posição terá somente 357 pontos, sendo as últimas três posições do vector igualadas a zero. Caso não seja utilizado este equipamento, este vector é definido da seguinte forma:

```
for (int po = 1; po <= 360; po++)
{
    int ps = po - 1;
    posicao[ps] = po;
}
```

Neste caso, o vector *posicao* tem 360 posições, preenchidas de 1 a 360.

Como calculado em [2], a velocidade linear da biela superior, logo, a velocidade linear do veio do amortecedor, em [mm/s], é dada por:

$$V_1 = R_2 \cdot \omega_2 \cdot \text{sen}(\theta_2) + R_3 \cdot \omega_3 \cdot \text{sin}(\theta_3) \quad [6.1]$$

Para se obter a posição do veio do amortecedor a cada instante, sabendo o curso ensaiado, convertem-se os valores da posição do excêntrico em valores de deslocamento linear, aplicando a expressão:

$$R_1 = R_2 \cdot \text{sen}\theta_2 + R_3 \cdot \text{sen}\theta_3 \quad [6.2]$$

É feito depois o tratamento dos dados com vista à obtenção dos valores das variáveis que figuram nas expressões anteriores. Para tal, aplicam-se as seguintes expressões:

```
raio = curso/2;
r2 = raio
r3 = 300
teta2grau = posicao
teta2 = posicao*pi/180
teta3 = asin(r2*sin(teta2)/r3)
omega2 = velocidaderpm*2*pi/60
omega3 = omega2*r2*cos(teta2)/(r3*cos(teta3))
```

Com estes parâmetros calculados, chega-se à velocidade linear, em [mm/s], dada por:

```
velocidadeLin[] = r2*omega2*Sin(teta2[]) + omega3[]*r3*Sin(teta3[])
```

Já a posição, em [mm], é dada por:

```
posicaoLin[] = r2*Cos(teta2[]) + r3*Cos(teta3[])
```

Os valores dos vectores atrás apresentados são guardados na matriz *resultados*, nas devidas posições, apresentadas na tabela 6.3, da linha correspondente à velocidade ensaiada.

É guardado então um ficheiro de texto, com o nome do ensaio, o equipamento ensaiado, o curso, velocidade de rotação (em [rpm]), a pré-carga, com os vectores da força (em [kg.f]), velocidade linear (em [mm/s]) e posição linear (em [mm]), e ainda com a força máxima e mínima do ensaio.

Para finalizar a função *tratamentoDados*, é convertida a matriz *resultados*, do tipo *double*, para a matriz *resultadoFinal*, do tipo *float*, sendo esta devolvida à função *recepcaoDados*, que a devolve também à rotina principal, *Graficos*.

6.2.4. Apresentação de resultados

Com o procedimento descrito no ponto anterior, consegue-se que a matriz *resultadoFinal* seja actualizada a cada pacote de dados recebido, tendo esta os valores dos ensaios já na sua forma final, depois de todos os cálculos realizados, pelo que a rotina principal, *Graficos*, tem somente de desenhar os gráficos *força-posição* e *força-velocidade*, das 10 velocidades suportadas, para a matriz *resultadoFinal* actual.

Para tal, a rotina principal *Graficos* após definir os gráficos, os eixos e as escalas destes, chama as sub-rotinas *graficoXy* e *graficoZy*, através das expressões:

```
drawXy(g, panel1.Width, panel1.Height);
drawZy(g2, panel2.Width, panel2.Height);
```

Nestas, começa por se definir *g* e *g2*, que são respectivamente a área de gráficos 1 e 2, definindo-se de seguida o tamanho de cada gráfico.

Começando pela sub-rotina *graficoXy*, são definidas no início as variáveis *xmin*, *xmax*, *ymin* e *ymax*, com base nos valores do curso (eixo *x*) e força máxima (eixo *y*), e desenhados os pontos *x* e *y*, correspondendo aos 360 valores da posição (*x*) e da força (*y*), utilizando seguinte ciclo, para cada uma das velocidades ensaiadas:

```
for (int i = 0; i < xx.Length; i++)
{
    x = (xx[i] + (curso/2)) * w / (xmax - xmin);
    y = (-yy[i] + (ForcaMax / 2)) * h / (ymax - ymin);
    g.DrawEllipse(new Pen(Brushes.Blue), x - 1, y - 1, 2, 2);
    if (i > 0)
    { g.DrawLine(new Pen(Brushes.Blue), auxx, auxy, x, y); }
    auxx = x;
    auxy = y;
}
```

Este ciclo realiza-se entre os pontos 0 e 360 (comprimento do vector *xx*), e define um *x* e um *y*, através das expressões apresentadas, que não são somente uma igualdade entre *x* e uma dada posição do vector *xx*, de modo a adequar ao ponto correspondente da janela de gráficos. O mesmo ocorre para o ponto *y*. É desenhada uma circunferência em cada um dos 360 pontos, a azul, e os pontos são unidos por uma linha, também azul, isto para a primeira velocidade. Nas restantes, está atribuída uma cor diferente aos pontos e linha de cada velocidade ensaiada.

A sub-rotina *graficoZy* funciona exactamente do mesmo modo da apresentada anteriormente, usando-se os vectores *zz* em vez de *xx*, que correspondem aos valores da velocidade linear, em vez da posição linear.

Voltando à rotina principal *Graficos*, após chamadas as sub-rotinas que desenharam os gráficos, são apresentados no ecrã os valores do curso, pré-carga, força máxima e mínima, e também das escalas dos eixos *x* e *y* de cada gráfico. Para tal, é achada a força máxima e mínima, de todas as forças obtidas, sendo de seguidas colocadas na respectiva caixa de texto. A pré-carga

é colocada no ecrã através da segunda posição da matriz *resultadoFinal*, enquanto o curso é definido pela variável com o mesmo nome, seleccionada pelo utilizador logo no primeiro *form*.

Na figura 6.7 é apresentada a janela dos gráficos durante um ensaio, em que o curso ensaiado foi de 80 [mm], mostrando-se a imagem no instante após terem sido ensaiadas quatro velocidades. Analisando atentamente, verifica-se que cada uma das velocidades tem uma cor diferente, mas que é a mesma nos dois gráficos, podendo também observar-se um ponto vermelho no centro de cada um dos gráficos, resultante de todos os valores das restantes velocidades a ensaiar estarem a zero.

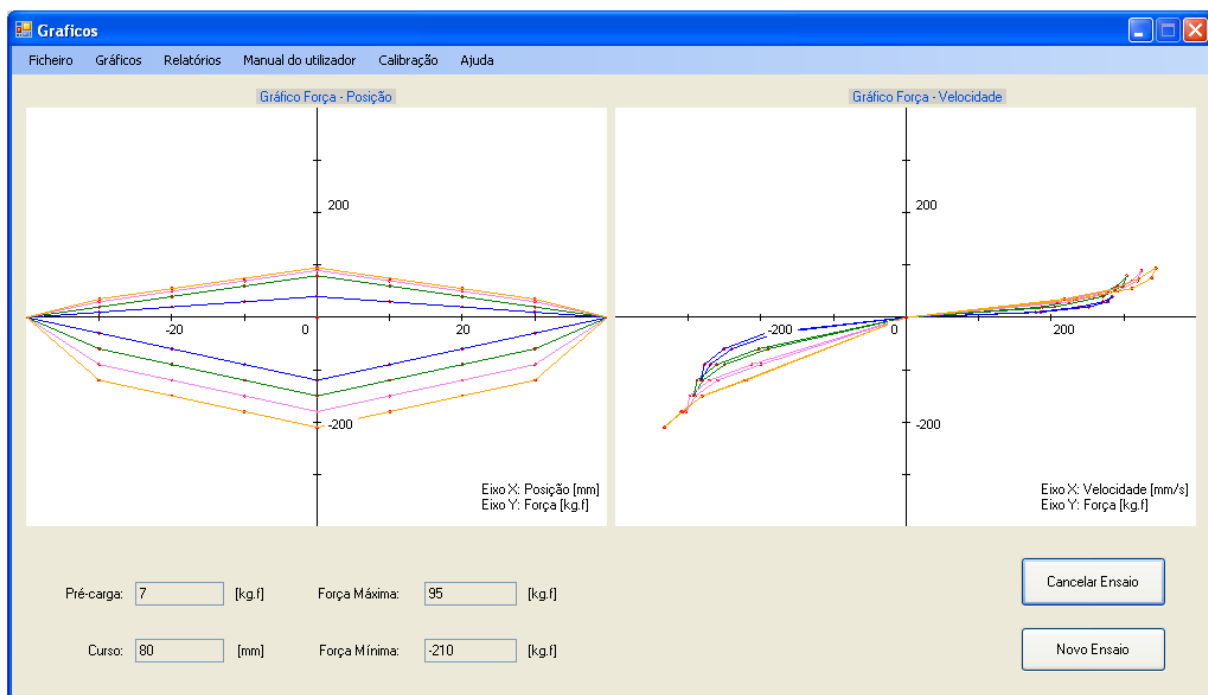


Figura 6.7 – Janela de gráficos durante um ensaio, após ensaiadas quatro velocidades.

São disponibilizados dois botões na janela dos gráficos: *Cancelar Ensaio* e *Novo Ensaio*. O primeiro permite cancelar um ensaio enquanto este ainda está a decorrer, enviando o programa um pacote de dados para o MSP (*pacoteMSP*), com o primeiro byte igual a 02. Desta forma, o motor irá parar, e o programa do MSP será abortado, voltando ao estado inicial de espera de um pacote de dados para iniciar um novo ensaio. Já o segundo botão, serve para após concluído um ensaio, o programa voltar para a janela inicial, fechando-se a janela dos gráficos, mas guardando ambos os gráficos final apresentados.

6.2.5. Opções da barra de ferramentas

Estão também disponíveis várias opções numa barra de menus, na parte superior da janela do programa. Estas estão divididas em 6 separadores, com os nomes *Ficheiro*, *Gráficos*, *Relatórios*, *Manual do Utilizador*, *Calibração* e *Ajuda*, como apresentado na figura 6.8.

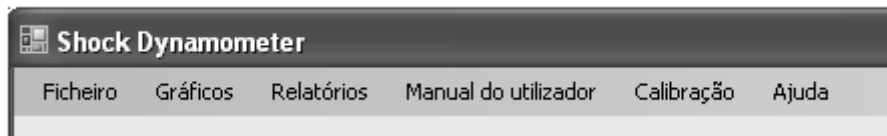


Figura 6.8 – Barra de menus.

A opção *Ficheiro*, quando aberta, disponibiliza ao utilizador quatro opções: *Novo*, *Abrir*, *Guardar* e *Sair*. A opção *Novo* serve para realizar um novo ensaio, e quando escolhida, verifica primeiro se houve alterações desde a última vez que o ensaio foi guardado, e caso tenha havido, pergunta ao utilizador se pretende mesmo iniciar um novo ensaio, alertando para que deve guardar primeiro os dados do ensaio em curso. A opção *Abrir* permite abrir os dados de um ensaio anteriormente realizado, num ficheiro de texto e a opção *Guardar* permite guardar os dados do ensaio num ficheiro de texto. Já a opção *Sair*, serve para fechar o programa.

Quanto ao menu *Gráficos*, este permite ao utilizador guardar, e abrir gráficos: seleccionado a opção *Guardar*, permite guardar os gráficos finais de um ensaio num ficheiro de imagem, enquanto que seleccionando a opção *Abrir* permite abrir gráficos guardados de outros ensaios.

A opção *Relatórios* tem a finalidade de, após um ensaio ter terminado, gerar o relatório desse ensaio, com os dados do ensaio (inseridos na primeira janela – nome, equipamento, curso, número de voltas por velocidade, número de velocidades e valores das velocidades), os resultados obtidos (valores da força, posição e velocidade) e gráficos obtidos.

Seleccionando a opção *Manual do Utilizador*, será indicado o local onde este está guardado no computador, em formato *pdf*, para que o utilizador o possa consultar. A janela apresentada, que contém essa informação, está apresentada na figura 6.9.

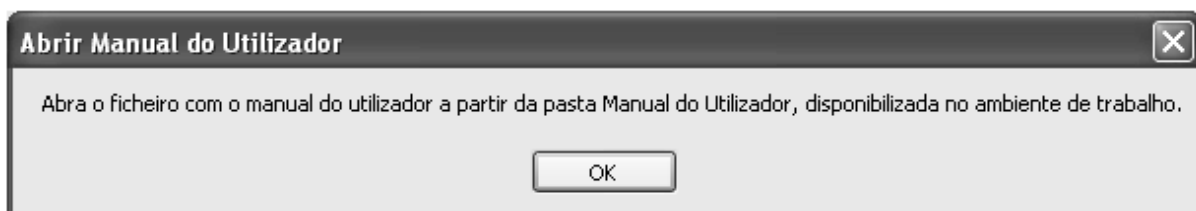


Figura 6.9 – Mensagem para abrir o manual do utilizador.

A opção *Calibração* permite realizar a operação de calibração da célula de carga. Ao ser seleccionada, é enviado um byte para o MSP ($pacotePC[0] = 03$), iniciando o processo de

calibração, e é aberta uma nova janela, com a opção do equipamento, uma caixa de texto para o utilizador preencher, outra para aparecer o valor obtido (após clicar no botão *Obter valor medido*), e quatro botões: um botão *Iniciar*, um botão *OK*, um botão *Terminar*, e um botão *Cancelar*, como apresentado na figura 6.10.

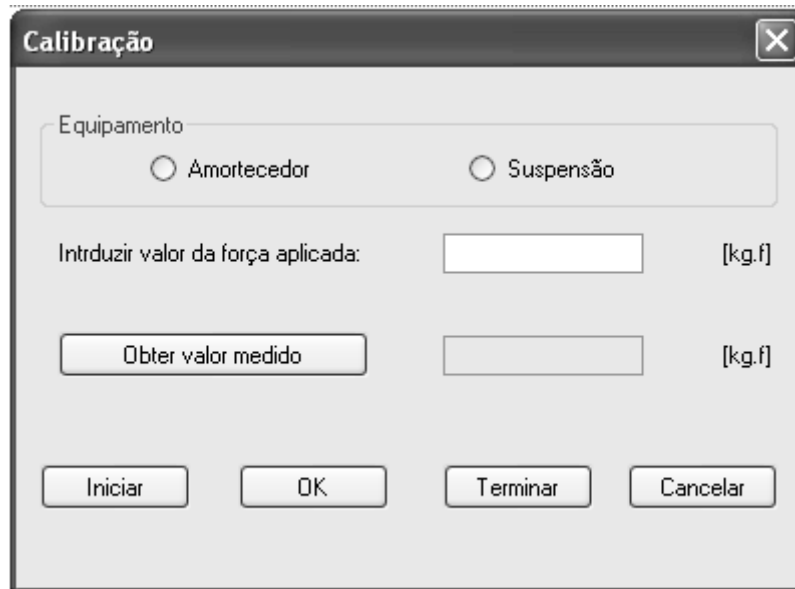


Figura 6.10 – Janela para calibração da célula de carga.

O processo de calibração é feito da seguinte forma:

- começa por se seleccionar o equipamento. Caso seja um amortecedor, é colocado na segunda posição do *pacotePC* o valor 01, e caso seja uma suspensão, é colocado o valor 02;
- de seguida, pressiona-se o botão *Iniciar*, sendo enviado o *pacotePC* para o MSP (como apresentado anteriormente, no envio do pacote de dados para realizar um ensaio), e o MSP envia o valor do ADC, quando nenhuma carga é aplicada à célula de carga, sendo guardado no *PC* esse valor como *preCarga*;
- é aplicada de seguida uma carga conhecida na célula de carga;
- na janela aberta de calibração, introduz-se o valor da força aplicada, em [kg.f]. De seguida, pressiona-se o botão *Obter valor medido*, sendo colocado o byte 01 na terceira posição do *pacotePC*, e enviado este pacote para o MSP. Esta acção serve para “pedir” ao MSP que meça a força e a envie para o PC;
- ao enviar o *pacotePC* para o MSP, o programa fica à espera de um pacote de dados deste, com o valor da força medida. Assim, após uma espera de dois segundos, é lido o *buffer* da porta USB, verificando o valor recebido pelo MSP. O valor recebido é colocado na caixa de texto em frente ao botão *Obter valor medido*;
- estando a primeira força medida, pressiona-se o botão *OK*. O valor da força aplicada é guardado num vector denominado *forcaPC*, neste caso na primeira posição, por ser a primeira força aplicada e o valor da força recebida é colocado num vector

denominado *forcaMsp* (também na primeira posição, por ser o primeiro recebido). As caixas de texto das forças são de seguida limpas;

- aplica-se uma nova carga à célula de carga, e volta a introduzir-se o valor dessa carga no respectivo campo do programa computacional;
- repete-se o processo, até terem sido introduzidos o maior número de cargas possíveis. Sugere-se que as cargas sejam aplicadas de 50 em 50 [kg], entre 50 e 1000 [kg], se possível, e que sejam do tipo à tracção e à compressão (obrigatório);
- no final, pressiona-se o botão *Terminar calibração*, sendo enviado o byte 05 na primeira posição do *pacotePC*, para o MSP terminar o processo de calibração. Já no PC, dá-se então início ao tratamento dos dados lidos e medidos.

Depois, o computador irá acertar os valores do vector *forcaPC* com os valores do vector *forcaMSP*, da seguinte forma:

- guarda o vector *forcaPC*, com os vários valores das forças introduzidas na caixa de texto da força aplicada;
- define e calcula o vector *forcaPC2*, usando os valores do vector *forcaMSP*, e aplicando a seguinte expressão

$$\text{forcaPC2}[] = (\text{forcaPC}[] - \text{preCarga}) * \text{mult} / \text{preCarga};$$

- é guardado um ficheiro de texto com os valores do *pacotePC* e do *pacotePC2*, que permite analisar as diferenças entre os valores reais da força aplicada e os valores calculados a partir dos valores medidos.
- é criado o vector *calibracao*, que calcula a diferença entre os dois vectores, permitindo calcular o erro de medição, que pode depois ser usado para corrigir a fórmula do cálculo da força, no tratamento de dados do programa principal.

Para terminar, a opção *Ajuda* permite ao utilizador obter informações do *software* e do seu fabricante, para o caso de ocorrência de algum problema, ou para esclarecer alguma dúvida relativa ao *software* ou à própria máquina. Ao ser seleccionada, é apresentada a janela da figura 6.11.

Todo este programa cumpre os objectivos propostos para um programa de interface entre o utilizador e a máquina de ensaio de amortecedores, mas de nada serve, se o microcontrolador não tiver um programa compatível com este. Assim, de seguida será apresentado o programa desenvolvido para o MSP430, que recebe e processa os dados enviados por este programa, e envia os dados dos ensaios realizados, para que este programa os possa tratar e criar os gráficos finais.

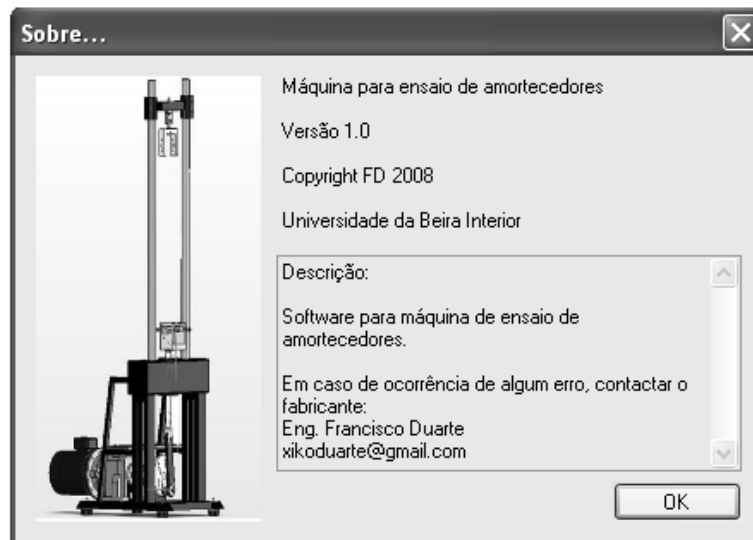


Figura 6.11 – Janela com informações sobre o *software* e o fabricante.

6.3. Alteração do Programa de controlo

6.3.1. Introdução ao programa de controlo do MSP430

O programa de controlo destina-se a controlar todos os processos e parâmetros dos ensaios, sendo implementado no microcontrolador MSP430F449. Este foi desenvolvido usando o *software IAR Embedded Workbench*, que é um ambiente de desenvolvimento integrado (Integrated Development Environment - IDE), permitindo o desenvolvimento e gestão completa de projectos e aplicações embebidas. A linguagem utilizado foi C/C++, e o modo de trabalhar com este *software* está descrito em [3] e [4].

O microcontrolador deve ser programado por forma a receber os dados dos ensaios a realizar, controlar estes ensaios, recolhendo novos dados das medições efectuadas pelos dispositivos electrónicos, e de seguida devolver estes ao PC, onde serão tratados.

O programa anteriormente desenvolvido recebe um vector de dados vindo do PC, o qual é formado somente pelo número de velocidades a ensaiar, números das frequências correspondentes às velocidades que se pretendem ensaiar (devidamente parametrizados), e ao *checksum* de todos os *bytes* enviados. Todos estes dados em valores hexadecimais.

Após o programa de controlo (MSP430) receber esses dados, começa por fazer o motor girar à velocidade correspondente à velocidade mínima até o sensor magnético detectar a passagem do excêntrico na posição zero. Quando esta passagem é detectada, o motor recebe uma ordem de paragem, e a célula de carga mede a força que está a ser aplicada nesta, correspondendo à pré-carga aplicada no amortecedor, sendo este valor colocado no início de um vector onde serão depois colocados os valores das medições dos aparelhos.

Após medida a pré-carga, o programa faz o motor girar à velocidade correspondente à primeira frequência enviada nos dados de entrada deste. Estabelece-se um número de voltas

(*nvolta*), de modo a definir quantas voltas deverá o excêntrico realizar até estabilizar a velocidade, sendo a medição dos valores da força e velocidade realizada somente após esse número de voltas ser atingido. O programa incrementa o número de voltas a cada impulso do sensor magnético.

Ao atingir o número de voltas definido no programa, todos os valores medidos pelo *encoder* e pela célula de carga são gravados no MSP430, sendo as medições realizadas a cada 1,008° do excêntrico, da seguinte forma:

- o *encoder* está ligado ao *timer A* do MSP430, activando este com os impulsos por ele gerados, 5000 a cada volta; o *timer A* gera uma interrupção a cada 14 pulsos do *encoder*, que correspondem a um deslocamento de 1,008° do excêntrico (logo, do *encoder*);
- o *timer B* está configurado como temporizador, e a cada interrupção do *timer A*, irá ser registado o tempo que passou desde a última interrupção, medido pelo *timer B*. Como se sabe que cada interrupção é gerada a cada 1,008°, consegue-se calcular a velocidade de rotação do excêntrico;
- cada interrupção do *timer A* irá também fazer recolher o valor do ADC12, correspondente ao valor da força medida pela célula de carga, após já estar convertido num valor digital (o ADC está sempre a converter os valores da tensão provenientes da célula de carga, mas esses valores só serão recolhidos a cada interrupção do *timer A*, correspondente a cada 1,008°);
- os valores são guardados num vector, dispostos da seguinte forma: o primeiro valor corresponde ao valor da pré-carga, o segundo valor corresponde ao tempo medido pelo *timer B*, correspondente à velocidade do *encoder* no primeiro ponto de medição (1,008°), o terceiro valor corresponde ao valor medido pela célula de carga, correspondente à força exercida no primeiro ponto de medição (1,008°), e depois, a partir daqui, o quarto, sexto, oitavo, etc (valores pares) correspondem aos valores da velocidade medida pelo *encoder*, mais propriamente ao valor do tempo medido pelo *timer B*, a cada 1,008°, e os valores ímpares correspondem aos valores medidos pela célula de carga a cada 1,008°;
- como $360^\circ/1,008^\circ$ é aproximadamente igual a 357, este será o valor de medições da força e da velocidade, pelo que o pacote de dados a enviar de volta para o *PC* terá um valor de pré-carga, 357 valores do ADC (correspondentes a forças), 357 valores de tempos (do *timer B*, correspondentes a velocidades), e um valor de *checksum*, ou seja, o pacote terá 716 bytes, para cada velocidade ensaiada.

A medição de todos os valores é feita ao atingir o número de voltas igual a *nvolta* (número máximo de voltas a cada velocidade), e após efectuar o registo dos valores num pacote de dados, o programa envia esses dados para o *PC*, e incrementa a velocidade de rotação do motor (variando a frequência do motor) para a velocidade seguinte do pacote de dados enviados do *PC* para o programa, seguindo-se sempre este processo até à última velocidade.

Na última velocidade, após ser atingida a *nvolta*, serem feitas todas as medições, e todos os valores serem guardados no pacote de dados a enviar para o *PC*, no final dessa volta os valores contidos no pacote são enviados para o *PC*, e o programa faz o motor parar, segundo uma rampa de desaceleração pré-definida nos parâmetros base do motor (igual a 40 segundos).

O número de pacotes de dados recebido pelo *PC* (enviados pelo MSP430) será então igual ao número de velocidades ensaiadas, e terão todos a mesma constituição, como atrás indicado. Estes pacotes são recebidos pelo mesmo programa que envia os dados para o MSP430, devendo os seus valores ser redireccionados para o programa de tratamento de dados.

Com o novo programa de interface utilizador-máquina, o vector de dados enviado para o MSP430 é diferente, contendo mais informação, e a informação anteriormente recebida encontra-se agora em posições diferentes dentro do vector, pelo que o novo programa terá de ser alterado desde o primeiro ponto, ou seja, desde a recepção dos dados.

Para medir a posição e velocidade, poderá ser usado na mesma a *encoder*, ou realizar este processo sem *encoder*. No caso de se pretender realizar ensaios sem o *encoder*, as interrupções do *Timer A* para realizar a aquisição de dados relativos à força medida pela célula de carga serão agora geradas em função da velocidade de ensaio. Para tal, calcula-se o tempo que o excêntrico demora a percorrer um grau (*tempoGrau*), dividindo por 360 o valor que este demora a percorrer uma volta. Par tal, utilizam-se as seguintes expressões:

$$tempoVolta[s] = \frac{60[s]}{vel [rpm]} \quad [6.3]$$

$$tempoGrau[\mu s] = \frac{tempoVolta[s] \times 10^6}{360} \quad [6.4]$$

Na tabela 6.7 é apresentado o tempo que o excêntrico demora a percorrer uma volta completa (360 graus), e o tempo que demora a percorrer um grau, para cada velocidade possível de ensaiar.

Assim, quando se usa o *encoder*, o *Timer A* do MSP conta os impulsos deste, e a cada 14, correspondentes a 1,008°, gera uma interrupção, sendo registado o valor do *Timer B* (correspondente à velocidade) e do *ADC* (correspondente à força). No caso em que não se utiliza o *encoder*, a interrupção é gerada a cada *tempoGrau*, correspondente a cada grau do excêntrico, sendo assim geradas 360 interrupções numa volta, e em cada interrupção é registado o valor do *Timer B* e do *ADC*.

Quanto à medição da força, o novo programa deve permitir que esta seja feita de dois modos: ou usando o INA114 ligado ao *ADC* do microcontrolador (pino 6.0), obtendo assim um valor hexadecimal relativo à tensão medida pela célula de carga (para cada interrupção do *Timer B*), ou através do AD7705, que é um *ADC* externo, que comunica com o MSP430 pelos pinos P3.0 a P3.3, no modo *SPI*, obtendo-se assim valores já em formato digital.

Tabela 6.7 – Relação entre a velocidade de rotação e o tempo esperado para uma volta do excêntrico.

Nº freq. [Hz]	vel. [rpm]	tempo [s]	<i>tempoGrau</i> [μ s]
<i>fmin</i>	30	2,000	5556
1	40	1,500	4167
2	50	1,200	3333
3	60	1,000	2778
4	70	0,857	2381
5	80	0,750	2083
6	90	0,667	1852
7	100	0,600	1667
8	110	0,545	1515
9	120	0,500	1389
10	130	0,461	1282
11	140	0,428	1190
12	150	0,400	1111
13	160	0,375	1042
14	170	0,353	980
15	180	0,333	926
16	190	0,316	877
17	200	0,300	833
18	210	0,286	794
19	220	0,273	758
20	225	0,267	741
<i>fmax</i>	230	0,261	725

Caso se continue a medir a força através do ADC do MSP, o INA114 passa a apresentar dois ganhos diferentes: um ganho de 80, para medir numa gama de -1000 a 1000 [kg], e um ganho de 160, para medir de -500 a 500 [kg]. O valor do ganho é definido pelo estado do pino 1.1: colocando este a nível baixo, o ganho é igual a 80 (ensaio de amortecedores), e a nível alto o ganho é igual a 180 (ensaio de suspensões).

O programa deve verificar sempre o estado dos pinos 2.2 e 2.3, que dão a informação das portas abertas ou fechadas, devendo-se ter em atenção para que o programa só permita os ensaios quando ambas as portas de segurança estiverem fechadas.

6.3.2. Fluxograma do programa de controlo

O funcionamento do programa de controlo de dados será da seguinte forma:

- é verificado em primeiro lugar o estado dos portos P6.2 e P6.3, de modo a definir como serão feitas as aquisições da força (se é lida pelo INA114 ou pelo AD7705) e

dos tempos (com ou sem *encoder*). São definidas as variáveis *infoCarga* e *infoEncoder*;

- é feita uma verificação das portas, em função do estado dos pinos P1.6 e P1.7: se estiverem a nível alto, estão abertas, logo o programa não pode arrancar, caso contrário, estão fechadas, e o programa pode seguir;
- o programa está sempre à espera de receber um pacote de dados do *PC*, com 15 bytes, com o tipo de equipamento a ensaiar (0 ou 1, para amortecedor ou suspensão), o valor correspondente ao número de voltas de cada velocidade (*nvolta*), número de velocidades a ensaiar (*numero_velocidades*), os valores correspondentes às frequências e enviar para o VEV (logo, das velocidades do motor), e ainda um *checksum*; este pacote chama-se *pacote_pc*, e é um *buffer* de dados enviados pelo *PC*;
- quando a UART1 do MSP recebe um pacote de dados, é analisado em primeiro lugar o primeiro byte desse pacote: se este for igual a 1, o programa irá correr a rotina *ensaio*, realizando normalmente o ensaio, se for igual a 3, o programa segue para a rotina *calibracao*, onde será feita a calibração da célula de carga, e se for igual a 2 o programa corre a rotina *reset_do_sistema*, que termina o ensaio e faz inicializa todas as variáveis;
- se o primeiro byte do pacote é igual a 1, o programa corre a rotina *ensaio()*, que apresenta como primeira condição para continuar, que as portas estejam fechadas, verificado novamente o estado das portas (pinos 1.6 e 1.7). Se alguma estiver aberta, é devolvido um pacote de dados para o *PC*, com o primeiro byte a dar essa indicação (como apresentado na tabela 5.4);
- caso as portas estejam fechadas, o programa lê o segundo byte do pacote de dados recebido: se este for 1, o equipamento a ensaiar é um amortecedor, pelo que o pino 1.1 deve ser colocado a nível baixo; se for 2, coloca-se o pino a nível alto, para o ganho do INA114 ser adequado a uma suspensão; Nesta fase, como se está a iniciar um ensaio, o primeiro byte do pacote de dados a enviar do MSP430 para o *PC*, denominado *pacote_micro* é igualado a 1. Em função do estado dos pinos 6.2 e 6.3, são também definidos os bytes da quinta e sexta posição deste pacote, que indicam se é usado ou não *encoder*, e se é usado o INA114 ou o AD7705 na medição da posição e da força, respectivamente;
- de seguida o programa aponta para a terceira posição do *pacote_pc*, e o valor deste byte representa o número de voltas por velocidade, pelo que a variável *nvolta* é igual ao valor do referido byte;
- o ponteiro do *pacote_pc* é incrementado, apontando para a quarta posição, cujo byte é associado à variável *nvelocidade*, sendo assim definida a ultima velocidade a ser ensaiada. Este valor é também colocado na segunda posição do *pacote_micro*;
- o ponteiro aponta de seguida para a primeira velocidade (número correspondente à frequência pretendida), e envia o valor da 1ª frequência para o VEV, através de *buffer* chamado *envia_byte_VEV*. São de seguida definidos os valores da terceira e quarta posições do *pacote_micro*, com o número da velocidade e o seu valor, respectivamente;

- depois, é enviada para o motor uma ordem de arranque, através do mesmo *buffer*, até o sensor de posição detectar a passagem do ponto zero do excêntrico.
- quando o sensor detecta a passagem do ponto zero, o programa faz o motor parar instantaneamente e recolhe o valor correspondente à força medida pela célula de carga (valor do ADC a ser utilizado), colocando este valor na sétima posição do *pacote_micro*;
- o motor recebe de seguida nova ordem de arranque, novamente para a primeira frequência do *pacote_pc*, realizando um número de voltas igual a *nvolta* (contadas pelo sensor de posição), sem alterar a velocidade, e o MSP não guarda nenhum valor no *pacote_micro* até atingir a *nvolta*;
- quando a contagem das voltas do excêntrico atinge um valor igual a *nvolta*, o MSP430 guarda os valores da força, que podem ser medidos pelo INA114 ou pelo AD7705, consoante definido pelo estado da variável *infoCarga*, a cada interrupção gerada pelo *timer A*. Como o *timer A* gera 357 (com *encoder*) ou 360 (sem *encoder*) interrupções ao longo de uma volta, serão guardados 357 ou 360 valores de força entre as posições 9 e 368 do *pacote_micro*, que deverão ser tratados posteriormente pelo *PC*. No final do pacote é feito um *checksum* para o *PC* assegurar a recepção de todos os valores enviados pelo MSP;
- na *nvolta* é ainda medido o tempo entre duas posições consecutivas (1,008° ou 1°, dependendo da utilização do *encoder*), sendo este valor colocado na oitava posição do *pacote_micro*;
- no final na *nvolta*, o *pacote_micro* é enviado para o *PC*, é feito um *reset* ao número de voltas contadas, e o ponteiro do *pacote_pc* passa a apontar para a velocidade seguinte, repetindo novamente todo o processo, até atingir a última velocidade;
- ao atingir a última velocidade, e realizar todo o processo, no final da *nvolta*, o programa envia o *pacote_micro* para o *PC*, envia uma ordem de paragem para o motor, e é feito o *reset_do_sistema*.

Então, o fluxograma que representa o funcionamento do programa de controlo de dados é apresentado nas figuras 6.12 e 6.13, para a definição da acção e o ensaio propriamente dito, respectivamente.

6.3.3. Descrição do programa desenvolvido

Como já foi atrás referido, o programa irá trabalhar com pacotes de dados: um de leitura, proveniente do *PC* (*pacote_PC*), onde estão indicados: a acção a realizar (1, 2 ou 3, para início de ensaio, calibração, ou fim de ensaio), o tipo de equipamento a ensaiar (1 ou 2, para amortecedor ou suspensão), número de voltas de cada velocidade (*nvolta*), número de velocidades a ensaiar (*numero_velocidades*), os números correspondentes às frequências a enviar ao VEV, e ainda um valor de *checksum*; outro pacote de escrita, que será enviado para o *PC* (*pacote_micro*), que será constituído por um vector com a indicação do significado do pacote (apresentado na tabela 6.4), do número de velocidades a ensaiar (de 1 a 10), a

velocidade a que o pacote se refere (de 1 a 10), informação se foi usado ou não *encoder*, e se foi usado um ADC externo ou não para medir a força, um valor de pré-carga (uma força), o tempo medido entre o início e o final de uma volta, seguindo-se 360 valores de força (medidos a cada grau do excêntrico, durante uma volta completa), mais o byte de *checksum*; o terceiro e último pacote é referente aos dados a enviar para o VEV, com as ordens de paragem, arranque, ou frequência a que o motor deve girar. Todos os pacotes têm no final um *byte checksum*, para garantir a recepção de todos os *bytes*.

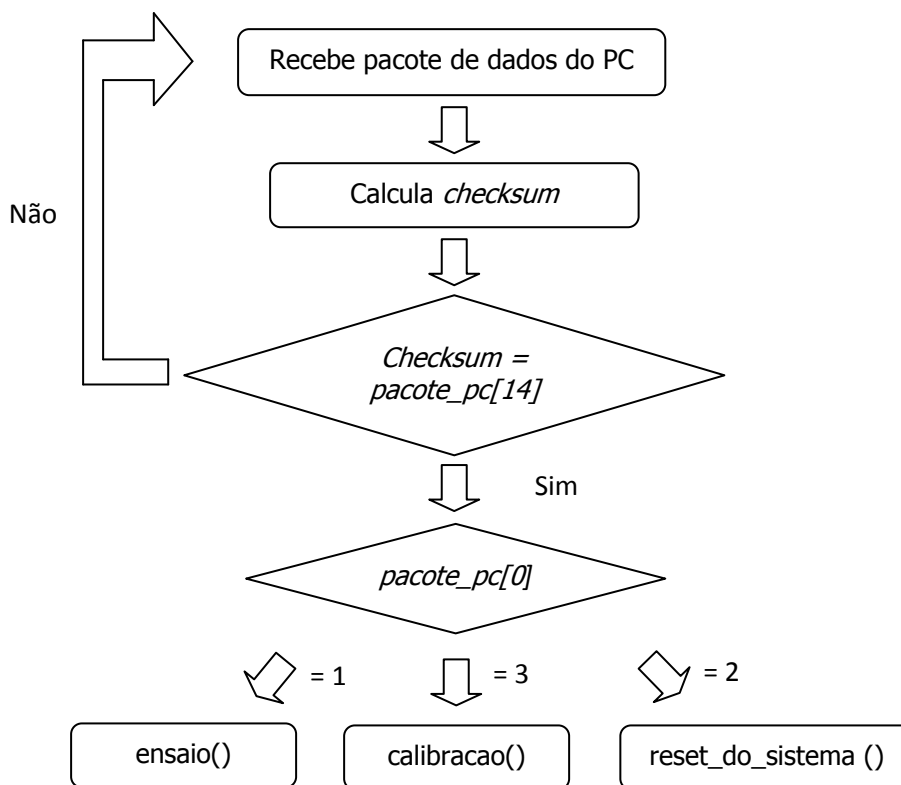


Figura 6.12 – Fluxograma do programa de controlo de dados.

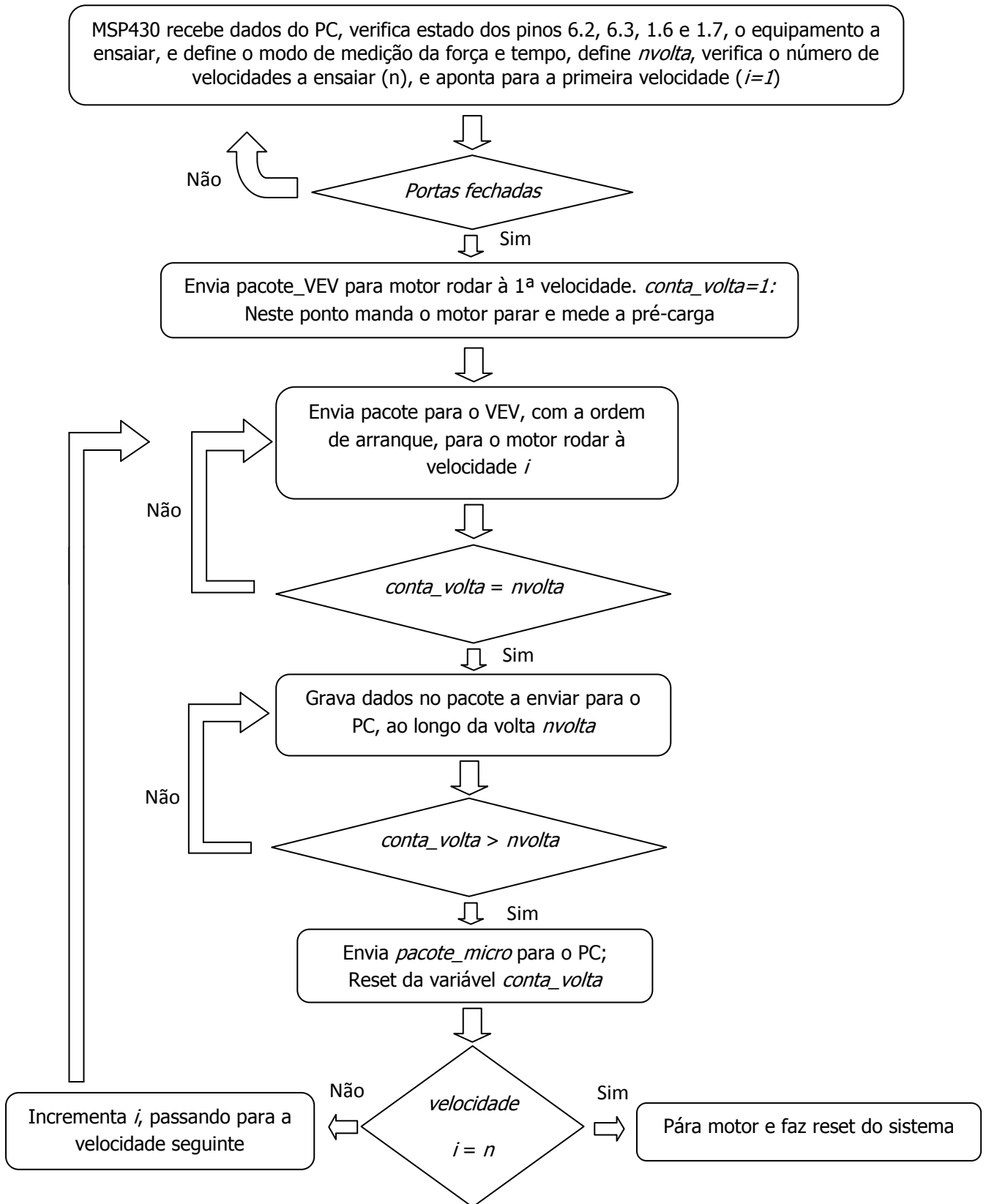


Figura 6.13 – Fluxograma da rotina *ensaio*.

Assim, as entradas do programa serão feitas através do *pacote_PC*, recebido pela USART1, com os valores dos parâmetros atrás indicados, sendo criado um *buffer* de dados, recebidos do PC. Este funciona da seguinte forma: quando é recebido pelo programa, um ponteiro aponta para a sua primeira posição, verificando qual a acção a realizar; caso seja para iniciar o ensaio, o programa aponta para a segunda posição do pacote de dados, associando o seu valor (1 ou 2) a um valor do ganho a enviar para o AD7705, e/ou ao estado do pino 6.1 (caso o valor dessa posição seja 1, o pino 6.1 é colocado a nível baixo, caso seja 2, é colocado a nível alto). De seguida, o ponteiro aponta para a terceira posição, definindo assim a variável *nvolta*: é associado um valor a um número de voltas, correspondendo 1 a 10 voltas, 2 a 15 voltas, 3 a 20 voltas, 4 a 25 voltas, 5 a 30 voltas, 6 a 40 voltas e 7 a 50 voltas; o ponteiro passa depois a apontar para a quarta posição, definindo o número de testes a realizar (*numero_velocidades*), ou seja, velocidades a ensaiar; seguidamente, o ponteiro passa a apontar para a quinta posição, sendo o seu valor correspondente à primeira velocidade a ensaiar; cada vez que o programa termina o ensaio de uma velocidade, este ponteiro move-se uma posição, passando a indicar para a velocidade seguinte a ensaiar. Quando atinge o *checksum*, ou quando o número da última velocidade ensaiada *i* for igual ao número de ensaios (*numero_velocidades*), já não há mais velocidades a ensaiar, pelo que o programa deve dar ordem ao motor para parar.

Em primeiro lugar, o programa irá verificar se as portas estão ambas fechadas. Isto é feito através da análise do estado dos pinos 6 e 7, do porto 1, que devem estar a nível baixo (zero), para indicar que ambas as portas estão fechadas. Todo o programa corre somente se esta condição se verificar. Caso um das portas (ou mesmo as duas) esteja aberta, é definido de imediato um pacote a enviar para o PC, com a informação de portas abertas, em que o primeiro byte é igual a 03 (porta de cima aberta), 04 (porta de baixo aberta) ou 05 (ambas as portas abertas). Verifica-se também no início o estado dos pinos P6.2 e P6.3, de modo a definir como serão feitas as medições dos tempos e forças, configurando as variáveis *infoCarga* e *infoEncoder*: quanto ao P6.2, caso esteja a 0, a força é lida pelo ADC do microcontrolador (P6.0), sendo a variável *infoCarga* colocada a 0, caso esteja a nível alto, a força é fornecida pelo ADC externo (AD7705), ficando *infoCarga* = 1; quanto ao P6.3, se estiver a nível 0, não será usado o *encoder* para gerar as interrupções do *Timer A*, ficando a variável *infoEncoder* = 0, enquanto se estiver a 1 será o *encoder* a gerar as referidas interrupções, ficando *infoEncoder* = 1.

No início, o programa tem as variáveis *nvolta* (número de voltas máximas do excêntrico, para cada velocidade) e *conta_volta* (número de voltas dadas pelo excêntrico, contadas pelo sensor de posição) iguais a zero. O ponteiro do *buffer* do pacote de dados enviados pelo PC começa por apontar para a primeira velocidade a ensaiar (5ª posição do pacote), definindo esta como a frequência a que o motor deve rodar, que é enviada para o VEV através do *pacote_VEV*. Este funciona também como um *buffer*, em que os vários bytes são enviados um a um, cujo envio é controlado por um ponteiro, que começa por apontar para o primeiro valor de um código correspondente a uma acção a realizar pelo motor (ou arranque, ou paragem, ou definição do valor da frequência do motor), enviando todos os bytes dessa acção com um ciclo de espera entre cada, de modo respeitar os intervalos de tempo do VEV. Este pacote é enviado através da USART0 do MSP430. Definida a primeira frequência a enviar ao VEV, segue-se uma

ordem de arranque, também enviada pelo *pacote_VEV*, incrementando-se logo de seguida a posição do ponteiro do *buffer* de dados enviados pelo *PC*.

Os ensaios serão feitos com o motor a girar a uma dada velocidade, durante um número de voltas recebido no *pacote_PC*, logo no início do programa (*nvolta*), durante o qual nenhum valor é apontado no pacote de dados a enviar para o *PC* (*pacote_micro*). As voltas são contadas pelo sensor de posição, ligado ao pino 2.2, que a cada passagem do ponto zero do excêntrico passa a nível alto, e incrementa o número de voltas (variável *conta_volta*). No início de cada ensaio e de cada velocidade, o número de voltas é igualado a zero, de modo a contar-se sempre desde o zero até ao valor definido.

Caso não se utilize o *encoder* para medir o tempo e a posição do excêntrico, é definida a variável *tempoGrau*, conforme a tabela 6.7, sendo esse o tempo de geração de interrupções do *Timer A*, na *nvolta*; caso se utilize *encoder*, a interrupção deste *Timer* é gerada a cada 14 pulsos, sendo medido na interrupção o valor do *Timer B*, correspondente à velocidade do excêntrico, sendo este valor guardado na oitava posição do *pacote_micro*.

Quando a variável *conta_volta* é igual a *nvolta*, é activada uma *flag* de aquisição, que recolhe os valores da força: dependendo da variável *infoCarga*, ou a partir do INA114 (P6.0), ou através do AD7705; estes valores são colocados no pacote a enviar para o *PC* (*pacote_micro*), usando o ponteiro do *buffer* desse pacote para os colocar nas posições desejadas, incrementando o ponteiro após guardar cada valor. Quando *conta_volta* é maior que *nvolta*, significa que acabou o ensaio da velocidade, sendo o *pacote_micro* enviado para o *PC*, através da *USART1*. A variável *conta_volta* é reinicializada, passando o ponteiro do *buffer* referente ao pacote de dados de entrada (*pacote_PC*) a apontar para a velocidade seguinte, enviando o valor desta para o *VEV*.

Quando o ponteiro do *buffer* do pacote de dados recebidos do *PC* aponta para o *checksum*, ou quando *numero_velocidades* é maior que o número da velocidade que se acabou de ensaiar, é enviada uma ordem de paragem para o motor (através do *pacote_VEV*), sendo feito um *reset* ao sistema. O *reset* consiste na reinicialização de todas as variáveis, e colocação dos ponteiros dos *buffers* na posição zero dos devidos pacotes de dados.

Quanto às definições do *MSP430*, para permitir a comunicação desejada com os vários aparelhos a este ligados, foram usadas a partir da referência [4], e são as seguintes:

- *USART0*, para comunicação com o *VEV*: habilitação dos pinos 4 e 5 do porto 2, correspondentes ao TX e RX da *USART0*; Habilitação desta *USART*, com caracteres de 7 bits, paridade ímpar; selecção do *SMclock* do *MSP430*, definindo este para trabalhar a 8 [MHz], com uma taxa de transmissão de dados de 9600 [bits/s];
- *USART1*, para comunicação com o *PC*: habilitação dos pinos 0 e 1 do porto 4, correspondentes ao TD e RX da *USART1*; Habilitação desta *USART*, com caracteres de 8 bits e paridade par; selecção do *SMclock* do *MSP430*, definindo este para trabalhar a 8 [MHz], com uma taxa de transmissão de dados de 9600 [bits/s];
- *Timer B* – definição deste como temporizador, funcionando a 1 [MHz], contando de forma contínua, desde 0 até ao seu máximo, reiniciando depois do zero;

- *Timer A* – Caso se use *encoder*: habilitação do pino 5 do porto 1 como entrada, onde se liga o *encoder*, sendo esta a entrada do *timer A*; a contagem é definida para ser progressiva, desde 0 até ao valor de TACCR0, que se define como TACCR0=14, de modo a gerar uma interrupção de 14 em 14 pulsos do *encoder*; Caso não se use *encoder*: definição do SMCLK como contador, dividindo o valor deste por 8 (para ficar a 1 [MHz]), e definição do TACCR0 (onde é gerada a interrupção) igual à variável *tempoGrau*, definida a cada velocidade;
- *ADC12* – habilitação do pino 0 do porto 6 como entrada, onde se irá ligar o sinal da célula de carga; conversões múltiplas, habilitando o modo de conversão repetitiva (*ADC* sempre a convergir os valores da célula de carga);
- *Portos I/O* – habilitação do pino 2 do porto 2, para entrada, onde irá ligar o sensor de posição do excêntrico, que irá por este pino a nível 1 cada vez que fechar. Habilitação dos pinos 1 e 2 do porto 2, para entrada, onde ligam os sensores das portas, que colocam o pino a nível 1 quando estas foram abertas; habilitação dos pinos 2 e 3 do porto 6, como entradas, onde se recebe a informação da utilização do *encoder* ou não, e se a força é medida com o INA114 ou com o AD7705; habilitação do pino 1 do porto 6, para saída, de modo a enviar 0 ou 1 para o *multiplexer*, definindo o ganho do INA114.
- *Portos Especiais*: habilitação do pino 1 do porto 2, para função especial (TB0), como entrada, onde irá ligar o sensor de posição do excêntrico, que irá por este pino a nível 1 cada vez que fechar.

O programa deve devolver ao *PC* o *pacote_micro*, enviado no final de cada *nvolta*, enviando tantos pacotes como velocidades foram testadas.

Quando é feita a calibração (primeiro byte do *pacote_pc* igual a 03), coloca-se o valor da posição 0 do *pacote_micro* igual a 7, e verifica-se em primeiro lugar o equipamento, de modo a definir o estado do pino 6.1, caso se use o *ADC* interno do MSP, ou então escolhe-se o ganho do *ADC* externo. De seguida, quando os valores das posições 2 e 3 do *pacote_pc* foram iguais a 1, é obtido o valor do *ADC*, colocando na posição 1 do *pacote_micro* esse valor, correspondente à força medida, e envia-se o referido pacote para o PC.

Quando o valor do *pacote_micro*[2] for igual a 2 ou 3, é feito *reset_do_sistema()*, saindo da rotina *calibracao()* sem devolver nenhum pacote ao PC, pois significa o fim deste processo.

A rotina *reset_do_sistema()* consiste numa reinicialização de todas as variáveis, colocação dos pacotes de dados a zero, envio de ordem de paragem para o motor, colocação dos ponteiros a apontar para as posições 0 de ambos os pacotes de dados, passando assim o programa ao estado inicial, como se nenhum ensaio tivesse sido iniciado.

6.4. Nota Conclusiva

Neste capítulo foram desenvolvidos dois programas: um para o *PC*, que permite ao utilizador seleccionar os dados dos ensaios, enviá-los para o microcontrolador, receber os valores medidos pelos vários equipamentos da máquina, tratar esses dados, e traçar os gráficos *força-posição* e *força-velocidade*, e outro para o microcontrolador, que permite comunicar com o programa do *PC*, e executar os ensaios de acordo com o pretendido pelo utilizador.

Para tal foram utilizados dois conceitos diferentes de programação: programação orientada a objectos (OOP), e programação em ambiente de desenvolvimento integrado (IDE). O primeiro foi utilizado no desenvolvimento do ambiente gráfico, enquanto o segundo serviu para programar o microcontrolador.

Pode-se concluir que a nível do programa de interface *utilizador-máquina*, todos os principais objectivos foram alcançados, conseguindo-se criar um programa de fácil utilização, em que o utilizador tem somente de escolher os valores do ensaio e facilmente enviá-los para o microcontrolador, clicando num botão, e de forma automática recebe os valores dos ensaios, vendo somente os gráficos de cada velocidade ensaiada aparecerem no ecrã, com o decorrer do ensaio. Neste programa, ficou somente a faltar a criação automática de relatórios.

Quanto ao programa do microcontrolador, conseguiram-se alcançar praticamente todos os objectivos, tendo-se desenvolvido um novo programa adequado ao programa do *PC*, e aos novos sensores, electrónica, e funcionalidades da máquina de ensaio de amortecedores. Ficou contudo por programar a medição da força com o *ADC* externo (AD7705).

No entanto, e após desenvolvidos ambos os programas e analisados os resultados obtidos, verifica-se que os objectivos propostos foram alcançados com bastante sucesso, conseguindo-se agora trabalhar com a máquina de ensaio de amortecedores de forma simples, guardando-se os valores dos ensaios (dados escolhidos e resultados), obtendo os gráficos de forma automática, e ainda calibrar a célula de carga.

Referências

- [1] V. Pereira, “O guia prático do Visual C# 2005 Express,” 1ª Edição, *Centro Atlântico*, Lisboa – Portugal, 2006.
- [2] F. Duarte, “Máquina para ensaio de amortecedores,” Universidade da Beira Interior, Covilhã – Portugal, 2007.
- [3] P. D. Gaspar, A. Espírito Santo, H. Santos, B. Ribeiro, “Manual de Microcontroladores MSP430,” Universidade da Beira Interior, Covilhã – Portugal, 2006.
- [4] F. Pereira, “Microcontroladores MSP430: Teórica e Prática,” 1ª Edição, *Editores Érica*, São Paulo – Brasil, 2005.

Capítulo

7

Certificação da Máquina

Para se proceder à certificação da máquina de ensaio de amortecedores, esta deve respeitar algumas normas, as quais devem ser identificadas, e estudadas as suas exigências. Com base nestas, é feito um estudo das alterações a realizar na máquina, de modo a ficar pronta para o processo de certificação. Como a máquina realiza medições de forças, é necessário ainda realizar a calibração do aparelho responsável por essas medições.

7.1. Introdução à Certificação da Máquina

Um dos objectivos deste trabalho consiste na certificação da máquina de ensaio de amortecedores desenvolvida. Para tal, neste capítulo serão inicialmente identificadas e estudadas as normas de segurança que se aplicam à máquina desenvolvida, de modo a realizar uma adequação dos conteúdos dessas normas à referida máquina, promovendo as alterações necessárias, sendo feita a devida análise de risco para avaliar a importância das alterações. Será também analisada a calibração da célula de carga, como elemento responsável pela obtenção dos valores das forças medidas e apresentadas nos resultados finais.

No projecto de uma máquina uma das principais dificuldades do projectista é definir o tipo de aspectos de segurança a implementar, devendo este analisar se as medidas de segurança a definir serão as mais adequadas. Para tal, existe um grande número de normas que definem metodologias que permitem definir num projecto o tipo de pormenores a ter em especial atenção. Porém, existem muitas vezes dificuldades em se identificar quais as normas que poderão ser adoptadas e aplicadas, como por exemplo na identificação das situações que possam colocar em risco a segurança do operador, ou ainda na definição das características a implementar para garantir a segurança deste.

Neste capítulo pretende-se apresentar uma metodologia para a integração da segurança no projecto da máquina de ensaio de amortecedores. Com base na metodologia definida, pretendem-se identificar os principais aspectos que deverão ser analisados, e porventura alterados no projecto da referida máquina.

A Directiva 98/37/CE de 22 de Junho, conhecida como Directiva Máquinas, “*estabelece as regras a que deve obedecer a colocação no mercado e a entrada em serviço das máquinas*” [1]. Nesta são estabelecidas as obrigações dos fabricantes, nomeadamente a implementação dos principais requisitos de segurança (previstos no anexo I desta directiva), e a constituição mínima obrigatória de um dossier técnico de fabrico da máquina, permitindo destacar a segurança implementada para proteger o utilizador e o equipamento. Todas as indicações desta directiva permitem no final de implementadas emitir a declaração CE de conformidade, e colocação da marcação CE na máquina em estudo.

Foi publicada a 17 de Maio de 2006 a Directiva 2006/42/CE, que revoga a Directiva 98/37/CE, devendo esta nova Directiva ser de aplicação obrigatória em Portugal a partir de 29 de Dezembro de 2009.

Numa qualquer máquina, caso não sejam adoptadas as devidas medidas de segurança, sempre que o fenómeno perigoso estiver presente, irá ocorrer um acidente. Portanto, num projecto de uma máquina deverão ser estabelecidos os limites de utilização desta, identificando-se de seguida os fenómenos considerados pelo projectista como perigosos, que possam por em risco a segurança do operador da mesma.

Ao identificar um fenómeno perigoso, deve-se quantificar o risco por este causado, e definir se é necessário realizar uma alteração de modo a reduzir esse risco, com base na análise

efectuada. De seguida é resumidamente apresentada a metodologia que deverá ser adoptada para a análise e respectiva redução do risco, de acordo com [2]:

Em primeiro lugar o projectista deve ter em conta as medidas de prevenção intrínseca, que são o mais importante passo na análise e redução do risco, sendo estas inerentes às características e constituição da máquina, permanecendo definitivas. O contrário não acontece com as medidas de protecção que podem falhar ou ser neutralizadas, ou com a informação para utilização contida na máquina ou no manual do utilizador, que pode não ser respeitada. As medidas de prevenção intrínseca consistem na minimização (e/ou eliminação) dos fenómenos perigosos e redução dos riscos, através de uma adequada selecção de características associadas ao projecto e fabrico da máquina e ao modo de interacção do utilizador com esta, que é a pessoa exposta ao efeito perigo. Exemplos de medidas de prevenção intrínseca são a implementação de um sistema automático de alimentação de modo a que o operador não tenha de actuar na zona perigosa, ou diminuir a força de actuação de uma máquina para um valor que não dê origem a um fenómeno perigoso.

Em segundo lugar devem ser implementadas medidas de protecção, de modo a impedir o acesso do operador à zona ou fenómeno perigoso. Como exemplo deste tipo de medidas podem-se referir a colocação de protectores (que podem ser fixos ou móveis), ou dispositivos de protecção como barreiras fotoeléctricas, que interrompam o funcionamento da máquina caso não sejam respeitos. Ao introduzir um dispositivo de segurança numa máquina, para além de se verificar se as características técnicas são adequadas, deve-se sempre garantir que o circuito de comando associado cumpre os requisitos de segurança aplicáveis.

O último pormenor a ter em consideração para a redução do risco é a definição de informação para utilização. Minimizam-se os riscos residuais, ou seja, aqueles que não puderam ser eliminados através das medidas de prevenção ou de protecção anteriormente definidas, definindo instruções de utilização, ou alertando os utilizadores para estes riscos residuais através de avisos colocados na própria máquina, ou ainda através de sinais acústicos ou visuais. Para garantir a segurança do operador, evitando a ocorrência de danos sobre ele próprio, este deverá cumprir as indicações fornecidas pelo projectista, adoptando procedimentos de trabalho seguros, utilizando o equipamento de protecção recomendado, etc.

Assim, fazendo uma análise de risco adequada ao modo de funcionamento da máquina, e enquadrada nos limites da utilização desta, dever-se-ão estudar quais as alterações necessárias de modo a minimizar os riscos apresentados.

No final do capítulo, e estudados todos os requisitos necessários à certificação da máquina de ensaio de amortecedores, serão então apresentados os meios de certificar esta máquina, como por exemplo os organismos com competências para o fazer, e referido tudo aquilo que será necessário apresentar para realizar a certificação. Todas as indicações apresentadas serão de acordo com as fornecidas pelos organismos responsáveis pela certificação de um equipamento deste tipo, pelo que após concluído o capítulo, dever-se-á estar em condições de realizar o processo de certificação da máquina de ensaio de amortecedores.

7.2. Normas de Segurança

As normas de segurança garantem que os produtos e serviços sejam apropriados para a finalidade prevista. O objectivo da normalização é o estabelecimento de soluções, por acordo das partes interessadas, para assuntos de índole repetitiva, tornando-se uma ferramenta fundamental na regulação dos agentes activos dos mercados, ao simplificar vários assuntos e clarificando ao legislador se é necessária regulamentação específica em matérias não abrangidas por normas.

Toda a norma é considerada uma referência de qualidade do mercado a que se destina, sendo por isso usada em processos de legislação, de certificação, de acreditação, de informação técnica, de metrologia, e até mesmo em relações comerciais Cliente – Fornecedor.

Das várias normas de segurança existentes, as que se aplicam directamente à máquina de ensaio de amortecedores são as Directivas Máquinas e EMC: a primeira diz respeito a todas as regras de segurança que uma máquina deve respeitar para poder ser certificada e colocada no mercado, e a segunda refere-se à compatibilidade electromagnética, que se aplica ao variador electrónico de velocidade usado, devendo este respeitar as disposições estabelecidas por essa directiva.

De seguida serão abordadas ambas as directivas, é feita a análise de risco segundo a Directiva Máquinas, e apresentadas as alterações feitas à máquina de modo a respeitar as directivas acima referidas.

7.2.1. Directiva Máquinas

A Directiva 98/37/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 de Junho de 1998 [1], é aplicável às máquinas e estabelece as exigências essenciais de segurança e de saúde que lhes dizem respeito e que devem respeitar, definidas no anexo I da mesma. Esta é conhecida como Directiva Máquinas.

Contudo, entrou em vigor em Junho de 2008 (e será obrigatória a partir de 29 de Dezembro de 2009) a Directiva 2006/42/CE de 17 de Maio [3], que vem revogar a Directiva 98/37/CE.

De referir desde já que esta directiva aplica-se à máquina de ensaio de amortecedores, a partir do momento em que se pretender introduzir esta no mercado, pois como citado na alínea h) do ponto 2 do artigo 1º, esta não se aplica a máquinas especialmente concebidas e construídas para efeitos de investigação para utilização temporária em laboratórios.

Todas as máquinas incluídas nesta directiva só podem ser colocadas no mercado e em serviço se não comprometerem a segurança e saúde das pessoas, devendo ser sujeitas a um controlo por parte de uma (ou mais) entidade definida por parte de cada estado membro. Após aprovada a máquina na inspecção, deverá ser colocada a marcação CE na mesma.

Caso a máquina respeite todas as exigências dispostas na Directiva Máquinas, os estados-membros na União Europeia não podem proibir a sua colocação no mercado e entrada em serviço no seu território, conforme estabelecido no artigo 4º da referida Directiva.

Para atestar a conformidade das máquinas e componentes de segurança com as disposições da directiva, o fabricante deve elaborar uma declaração CE de conformidade, cujos elementos são estabelecidos no anexo II da referência [1], e serão abordados posteriormente. Além disso, o fabricante deverá incluir na máquina a marcação CE.

Antes de incluir a máquina no mercado, deve-se [3]:

- certificar que a máquina cumpre os requisitos essenciais pertinentes em matéria de saúde e segurança, enunciados no anexo I da referência [3];
- certificar-se de que o processo técnico descrito na parte A do anexo VII de [3] está disponível;
- fornecer as informações necessárias à utilização da máquina, tais como o manual de instruções;
- efectuar os procedimentos de avaliação da conformidade adequados nos termos do artigo 12º de [3];
- elaborar a declaração CE de conformidade, nos termos da parte A do ponto 1 do anexo II de [3], e certificar-se que a mesma acompanha a máquina;
- colocar a marcação CE nos termos do artigo 16º de [3].

Caso a máquina seja abrangida por outra(s) directiva(s), com é o caso, deve ser referido se a máquina está de acordo com as devidas directivas.

Relativamente à marcação CE propriamente dita, é constituída pelas iniciais CE, e o anexo III da Directiva Máquinas indica o modelo a seguir. Esta deve ser colocada na máquina e forma visível, de acordo com o anexo I da referida directiva.

O artigo 12º da presente directiva [3] refere os procedimentos de avaliação da conformidade das máquinas. Este estabelece que para certificar a conformidade da máquina com o disposto na Directiva Máquinas, o fabricante aplica uma das seguintes condições [3]:

- sempre que a máquina não for abrangida pelo anexo IV, o fabricante aplica o procedimento de avaliação de conformidade com controlo interno de fabrico da máquina previsto no anexo VIII de [3];
- sempre que a máquina esteja referida no anexo IV e seja fabricada respeitando as normas harmonizadas referidas no n.º 2 do artigo 7.º de [3], e estas abrangem todos os requisitos essenciais pertinentes de saúde e de segurança, o fabricante ou o seu mandatário aplica um dos seguintes procedimentos: procedimento de avaliação da conformidade com controlo interno do fabrico da máquina, previsto no anexo VIII de [3]; procedimento de exame CE de tipo previsto no anexo IX, e ainda controlo interno do fabrico da máquina na fase de produção previsto no ponto 3 do anexo VIII de [3]; procedimento de garantia de qualidade total previsto no anexo X de [3];

- no caso de a máquina estar referida no anexo IV e ter sido fabricada não respeitando ou respeitando apenas parcialmente as normas harmonizadas referidas no n.º 2 do artigo 7.º, de as normas harmonizadas não abrangerem todos os requisitos essenciais pertinentes de saúde e de segurança ou de não existirem normas harmonizadas para a máquina em questão, o fabricante ou o seu mandatário aplica um dos seguintes procedimentos: procedimento de exame CE de tipo previsto no anexo IX, e ainda controlo interno do fabrico da máquina na fase de produção previsto no ponto 3 do anexo VIII de [3]; procedimento de garantia de qualidade total previsto no anexo X de [3].

No Anexo I da Directiva Máquinas são estabelecidas as exigências essenciais de segurança e de saúde relativas à concepção e ao fabrico de máquinas. Este estabelece que uma máquina deve ser projectada por forma a evitar a sua utilização anómala nos casos em que esta constitua fonte de risco, pelo que deverão ser respeitados certos critérios de modo a garantir a segurança dos seus utilizadores.

O primeiro critério a respeitar, é que as máquinas devem, de origem, estar aptas a cumprir a função a que se destinam e a ser objecto de regulação e manutenção sem expor a risco as pessoas com que elas trabalham quando tais operações forem realizadas, de acordo com as condições previstas pelo fabricante.

As medidas tomadas devem ter por objectivo eliminar (ou reduzir ao máximo) os riscos de acidente durante o tempo previsível de vida da máquina, incluindo as fases de montagem e desmontagem, inclusivamente nos casos em que tais riscos resultem de situações anómalas previsíveis, tomando as medidas de protecção necessárias em relação aos riscos que não possam ser eliminados.

É estabelecido que a máquina, ou cada um dos seus elementos deve poder ser movimentado, ou desmontado sem riscos, pelo que se deverá assegurar que esta possa ser desmontável e transportados os vários constituintes facilmente, e de modo a não colocar em risco os técnicos que efectuem as referidas operações.

Na concepção e fabrico da máquina, e na elaboração do manual do utilizador, deve-se considerar não só a utilização normal da máquina mas também a utilização que possa ser razoavelmente esperada, pelo que a máquina deve ser projectada de modo a evitar a sua utilização anómala, no caso desta constituir fonte de risco.

A máquina deve ser fornecida com todos os equipamentos e acessórios especiais e essenciais para poder ser regulada, cuidada e utilizada sem risco.

Quanto à movimentação da máquina, deve ser prevista desde o seu projecto, devendo esta permitir a sua colocação no local ou ser montada/desmontada sem riscos. Caso a massa, as dimensões, ou a forma da máquina não permitam o seu transporte à mão, devem ser previstos acessórios que permitam a preensão por um meio de elevação, ou permitir a colocação de tais acessórios (furos roscados, por exemplo), ou ainda ter uma forma tal que os meios de elevação normais se lhe possam adaptar facilmente.

Quanto ao sistema de comando, deve estar facilmente acessível e permitir uma utilização segura, ou seja, estar fora de uma zona perigosa. Se um órgão de comando for concebido e fabricado para permitir várias acções diferentes, a acção comandada deve ser claramente visualizada e, se necessário, ser objecto de confirmação.

O arranque da máquina só pode ser efectuado por uma acção voluntária sobre um órgão de comando previsto para o efeito. O mesmo deve-se verificar para um novo arranque após uma paragem, ou para o comando de uma alteração das condições de funcionamento (como a variação da velocidade).

A paragem normal deve ser feita a partir do órgão de comando, em condições de segurança. A máquina deve ter contudo um ou mais dispositivos de paragem de emergência, que permitam ao utilizador interromper um ensaio em caso de algo se danificar na máquina ou no equipamento sujeito a ensaio. Estes dispositivos devem provocar a paragem do processo perigoso num período de tempo tão reduzido quanto possível, sem provocar riscos suplementares.

As medidas de protecção contra os riscos mecânicos a considerar são as seguintes [3]:

- estabilidade: a máquina, bem como os seus elementos e equipamentos, deve ser projectada e fabricada para que, nas condições de funcionamento previstas (tendo eventualmente em conta as condições climáticas), a sua estabilidade seja suficiente para permitir a sua utilização sem riscos de derrube, de queda ou de movimentos intempestivos;
- risco de ruptura em serviço: as diferentes partes da máquina, bem como as ligações entre elas, devem poder resistir às solicitações a que são submetidas durante a utilização prevista pelo fabricante. Os materiais utilizados devem apresentar uma resistência suficiente, adaptada às características do meio de utilização previsto pelo fabricante, nomeadamente no que diz respeito aos fenómenos de fadiga, envelhecimento, corrosão e abrasão. No manual de instruções, devem-se indicar os tipos e a frequência das operações de manutenção necessárias por razões de segurança e as peças cuja substituição é necessária, por desgaste, bem como os critérios dessa substituição;
- riscos devidos às quedas e projecções de objectos: devem ser tomadas precauções para evitar as quedas ou projecções de objectos (peças maquinadas, ferramentas, fragmentos, etc.) que possam apresentar um risco;
- riscos devidos às variações de velocidade de rotação: se a máquina for concebida para efectuar operações em condições de utilização diferente (por exemplo, velocidade variável), deve ser concebida e fabricada de modo que a escolha e a regulação dessas condições possa ser efectuada de maneira segura e fiável;
- prevenção dos riscos ligados aos elementos móveis: devem ser considerados meios de impedir o bloqueio dos elementos móveis, e no caso de este ocorrer, devem ser indicadas instruções e ferramentas para que permitam o desbloqueamento sem riscos;

As características exigidas para os protectores e outros dispositivos de protecção são as seguintes [3]:

- devem ser robustos;
- não devem ocasionar riscos suplementares;
- não devem poder ser facilmente escamoteados ou tornados inoperantes;
- devem estar situados a uma distância suficiente da zona perigosa;
- não devem limitar mais do que o absolutamente necessário;
- devem permitir as operações indispensáveis à colocação e/ou substituição de equipamentos, operações de manutenção, limitando o acesso à zona em que o trabalho é realizado e, se possível, sem desmontagem do protector ou do dispositivo de protecção;

As medidas de protecção contra riscos eléctricos são as seguintes [3]:

- riscos devidos à energia eléctrica: se a máquina for alimentada com energia eléctrica, deve ser projectada, fabricada e equipada de modo a prevenir, ou permitir prevenir, todos os riscos de origem eléctrica. A regulamentação específica em vigor acerca do material eléctrico destinado a ser utilizado dentro de certos limites de tensão deve aplicar-se às máquinas por ela abrangidas;
- riscos devidos à electricidade estática: a máquina deve ser projectada e fabricada para evitar ou restringir o aparecimento de cargas electrostáticas que possam ser perigosas e/ou ser equipada com meios que permitam descarregá-las;

As medidas de protecção contra outros riscos são as seguintes [3]:

- riscos devidos a erros de montagem: Os erros cometidos na altura da montagem ou da remontagem de determinadas peças que possam estar na origem de riscos devem ser tornados impossíveis pelo projecto dessas peças ou, se tal não for possível, por indicações que figurem sobre as próprias peças e/ou sobre os cárteres. As mesmas indicações devem figurar sobre as peças móveis e/ou sobre os seus cárteres quando for necessário conhecer o sentido de movimento para evitar qualquer risco. Eventualmente, o manual de instruções deve dar informações complementares;
- riscos devidos a temperaturas extremas: devem ser tomadas disposições para evitar qualquer risco de ferimentos, por contacto ou à distância, com peças ou materiais a temperatura elevada ou muito baixa. Devem ser estudados os riscos de projecção de matérias quentes ou muito frias. Se existirem, devem ser tomadas as medidas necessárias para os impedir e, se tal for tecnicamente impossível, para os tornar não perigosos;
- riscos de incêndio: a máquina deve ser projectada e fabricada para evitar qualquer risco de incêndio ou de sobreaquecimento provocado pela própria máquina ou pelos gases, líquidos, poeiras, vapores e outras substâncias produzidas ou utilizadas pela máquina;

- risco de queda: as partes da máquina sobre as quais se prevê que as pessoas possam ser levadas a deslocar-se ou a estacionar devem ser concebidas e construídas de modo a evitar que as pessoas escorreguem, tropecem ou caiam sobre essas partes ou fora delas.

As operações de manutenção, regulação e reparação da máquina devem ser realizadas sempre com esta parada, ou caso isto não seja possível, devem ser realizadas sem riscos. Os elementos que necessitem de ser frequentemente substituídos, deverão poder ser desmontados e novamente montados com facilidade e em segurança. Estas operações devem ser realizadas de acordo com o fabricante, e com o uso de ferramentas adequadas.

Os dispositivos de informação devem fornecer as indicações necessárias à utilização da máquina sem ser demasiado complicada a sua compreensão, não sendo excessivas de modo a não sobrecarregar o operador.

A máquina deve ostentar as seguintes indicações mínimas [3]:

- nome e endereço do fabricante;
- marcação CE;
- designação do modelo;
- número de série;
- ano de fabrico.

Esta deve ainda conter todas as indicações indispensáveis à sua segurança de utilização, como a frequência máxima de funcionamento, por exemplo.

O manual de instruções deve indicar, no mínimo, as seguintes indicações [3]:

- a repetição das indicações previstas para a marcação, com excepção do número de série, acrescidas de indicações que permitam facilitar a manutenção;
- condições previstas de utilização;
- posto de trabalho a ocupar pelo operador;
- indicações para que a colocação em serviço, a utilização, a movimentação, a instalação, a montagem e desmontagem, a regulação e a manutenção possam ser efectuadas sem risco;
- instruções de aprendizagem, eventualmente;
- se necessário, as características dos equipamentos que podem ser montados na máquina.

O manual deve também alertar para as contra indicações da utilização da máquina. Este deve ser elaborado numa das línguas comunitárias, sendo obrigatório acompanhar cada máquina na língua oficial do país onde esta é colocada em funcionamento.

Deve incluir os desenhos e esquemas necessários para a entrada em serviço, a conservação, inspeção e verificação do bom funcionamento, e ainda da reparação da máquina, bem como todas as indicações úteis, especialmente em matéria de segurança.

No Anexo II é dada a informação relativa aos elementos que a declaração CE de conformidade para as máquinas deverá incluir, que são os seguintes [3]:

- nome e endereço completo do fabricante (firma e endereço completo);
- nome e endereço da pessoa autorizada a compilar o processo técnico, a qual deve estar estabelecida na Comunidade Europeia;
- descrição e identificação da máquina, incluindo: denominação genérica, função, modelo, tipo, número de série e marca;
- declaração expressa de que a máquina satisfaz todas as disposições relevantes da directiva máquinas [3] e, se for caso disso, declaração análoga quanto à conformidade com outras directivas e/ou disposições relevantes a que a máquina dê cumprimento;
- sendo caso disso, nome, endereço e número de identificação do organismo notificado que tiver efectuado o exame CE de tipo referido no anexo IX [3], bem como o número do certificado de exame CE de tipo;
- sendo caso disso, nome, endereço e número de identificação do organismo notificado que tiver aprovado o sistema de garantia de qualidade total referido no anexo X;
- se for caso disso, referência às normas harmonizadas utilizadas;
- local e data da declaração;
- identificação do signatário a quem tenham sido conferidos poderes para obrigar o fabricante ou o seu mandatário estabelecido na Comunidade.

O fabricante da máquina ou o seu mandatário conservarão o original da declaração de conformidade CE por um período de, pelo menos dez anos a contar da última data de fabrico da máquina.

No Anexo III é estabelecido que a marcação «CE» de conformidade é constituída pelas iniciais «CE» de acordo com o seguinte grafismo apresentado na figura 7.1.

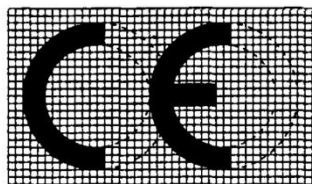


Figura 7.1 – Imagem da marcação CE.

No caso de redução ou de ampliação da marcação «CE», devem ser respeitadas as proporções resultantes do grafismo acima inserido. Os diferentes elementos da marcação «CE» devem ter sensivelmente a mesma dimensão vertical, que não pode ser inferior a 5 milímetros. Em relação às máquinas de pequena dimensão, pode prescindir-se desta dimensão mínima. A

marcação «CE» deve ser aposta na proximidade imediata do nome do fabricante ou do seu mandatário, segundo a mesma técnica.

O Anexo IV refere todo um conjunto de máquinas e componentes de segurança que devem respeitar critérios específicos para a marcação CE. A máquina de ensaio de amortecedores não faz parte desse conjunto, pelo que o processo de certificação é feito segundo o modelo a seguir referido, para as máquinas que não constam neste anexo.

No Anexo VII é apresentado o processo técnico para as máquinas, no caso destas não serem englobadas no anexo IV. É descrito o procedimento segundo o qual deverá ser elaborado um processo técnico que deverá permitir demonstrar a conformidade da máquina com os requisitos da presente directiva. O processo técnico deve abranger, na medida do necessário a esta avaliação, a concepção, o fabrico e o funcionamento da máquina. O processo técnico deverá ser redigido numa ou em várias das línguas oficiais da Comunidade, com excepção do manual de instruções da máquina, a que se aplicam as disposições especiais, previstas no ponto 1.7.4.1 do anexo I da Directiva Máquinas [3].

O processo técnico inclui os seguintes elementos:

a) Um processo de fabrico, constituído [3]:

- por uma descrição geral da máquina;
- pelo desenho de conjunto da máquina e pelos desenhos dos circuitos de comando, bem como pelas descrições e explicações pertinentes necessárias para a compreensão do funcionamento da máquina;
- pelos desenhos de pormenor e completos, eventualmente acompanhados de notas de cálculo, resultados de ensaios, certificados, etc., que permitam verificar a conformidade da máquina com os requisitos essenciais de saúde e de segurança;
- pela documentação relativa à avaliação dos riscos, que deverá demonstrar o procedimento seguido e incluir uma lista dos requisitos essenciais de saúde e de segurança aplicáveis à máquina e a descrição das medidas de protecção implementadas para eliminar os perigos identificados ou reduzir os mesmos e, se for caso disso, uma indicação dos riscos residuais associados à máquina;
- pelas normas e outras especificações técnicas que tenham sido utilizadas, acompanhadas da enumeração dos requisitos essenciais de saúde e de segurança abrangidos por essas normas;
- por qualquer relatório técnico que forneça os resultados dos ensaios efectuados pelo fabricante ou por um organismo escolhido pelo fabricante ou pelo seu mandatário;
- por um exemplar do manual de instruções da máquina;
- se for caso disso, por exemplares da declaração CE de conformidade da máquina ou de outros produtos incorporados na máquina;
- por um exemplar da declaração CE de conformidade, se for caso disso.

b) No caso de fabrico em série, as disposições internas que serão aplicadas para manter a conformidade das máquinas com as disposições da presente directiva. O fabricante deve

efectuar as pesquisas e os ensaios necessários dos componentes, acessórios ou de toda a máquina, a fim de determinar se esta, pelo modo como foi concebida e fabricada, pode ser montada e entrar em serviço em segurança. Os relatórios e resultados pertinentes serão incluídos no processo técnico.

O processo técnico atrás referido deverá estar à disposição das autoridades competentes dos Estados-Membros durante um período de pelo menos dez anos a contar da data de fabrico da máquina ou da última unidade produzida, em caso de fabrico em série.

A documentação atrás abordada pode não existir em permanência de modo material, mas deve poder ser disponibilizada num breve intervalo de tempo, compatível com a sua importância. Esta documentação deve ser redigida numa das línguas oficiais da Comunidade Europeia, e deve ser mantida à disposição das autoridades competentes durante pelo menos 10 anos a contar da data de fabrico da máquina.

Para as máquinas que constam no anexo IV da Directiva Máquinas é necessário fazer um exame CE de tipo, e uma avaliação de conformidade recorrendo a um sistema de garantia de qualidade total. O exame CE de tipo é o processo pelo qual um organismo notificado verifica e certifica que o modelo de uma máquina satisfaz as disposições da directiva máquinas que lhe diz respeito. O pedido de exame CE é pedido pelo fabricante, a um único organismo notificado, para um modelo de máquina. Todo este processo é descrito no Anexo IX da presente directiva, e como a máquina de ensaio de amortecedores não está englobada nas máquinas referidas no Anexo IV, este processo não será aqui estudado com mais pormenores.

7.2.2. Directiva EMC

A Directiva 2004/108/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 15 de Dezembro de 2004 [4], revoga a Directiva 89/336/CE relativa à aproximação das legislações dos Estados-Membros respeitantes à compatibilidade electromagnética.

Esta directiva regulamenta a compatibilidade electromagnética dos equipamentos e tem como objectivo assegurar o funcionamento do mercado interno, exigindo que os equipamentos cumpram um nível adequado de compatibilidade electromagnética. Aplica-se a todos os equipamentos definidos no artigo 2º da referência [4], e define que estes devem cumprir os requisitos apresentados no anexo I da mesma directiva, ou seja:

- requisitos de protecção: os equipamentos devem ser fabricados de forma a assegurar que as perturbações electromagnéticas geradas não excedem o nível acima do qual os equipamentos de rádio e de telecomunicações ou outros não possam funcionar da forma prevista, e tenham o nível de imunidade às perturbações electromagnéticas que é de esperar na sua utilização prevista e que lhes permita funcionar sem uma degradação inaceitável nessa utilização;
- requisitos específicos para instalações fixas: as instalações fixas serão instaladas segundo as boas práticas de engenharia e no respeito da informação sobre a utilização

prevista dos seus componentes, de modo a preencher os requisitos de protecção atrás referidos. Estas boas práticas de engenharia deverão estar documentadas e a pessoa ou pessoas responsáveis e deverão manter a referida documentação à disposição das autoridades nacionais pertinentes, para efeitos de inspecção, enquanto a instalação fixa estiver em funcionamento.

O restante conteúdo desta directiva é dirigido aos fabricantes dos equipamentos considerados fontes de ruído, ou de perturbações electromagnéticas, não se aplicando à máquina de ensaio de amortecedores, pois nesta é aplicado um variador electrónico de velocidade, ou variador de frequência, sendo o seu fabricante responsável por seguir os procedimentos abordados na directiva, ou indicar quais os cuidados a ter em consideração na utilização do referido aparelho, nomeadamente se é necessário aplicar algum filtro específico de modo a respeitar a presente directiva.

7.2.3. Análise de risco

A análise de risco da máquina será realizada com base nos parâmetros abordados no Anexo I da Directiva Máquinas, atrás apresentados.

Assim, o primeiro critério a respeitar é que os equipamentos testados não devem colocar em risco a segurança e saúde dos utilizadores, ou de qualquer outra pessoa exposta, devendo-se garantir que a zona de ensaios seja devidamente protegida, nunca devendo a máquina funcionar com esta zona desprotegida.

No caso do transporte da máquina sem a desmontar, devido ao seu peso e dimensões, é estabelecido que esta deve permitir a prensão por um meio de elevação; como a máquina tem as sapatas, que elevam a estrutura, está assim preparada para ser elevada por uma máquina porta paletes, desde que essa seja capaz de elevar cargas até 500 [kg]. Para além disso, tanto o motor eléctrico como o redutor mecânico (que são os elementos mais pesados da máquina) têm pegos, que possibilitam o seu transporte.

Os vários órgãos mecânicos da máquina foram devidamente dimensionados, minimizando o risco de partirem e pôr em risco os utilizadores; contudo, entre estes e a zona de utilização da máquina deve haver uma protecção mecânica (fixa, nas zonas em que não é necessário fazer alterações entre ensaios, e móvel – porta de segurança – nas zonas em que é necessários fazer alterações, como a zona do excêntrico para mudar o curso de ensaio, ou dos apoios, para alterar o equipamento) que assegure a segurança do utilizador. No caso das protecções móveis, a máquina só deve trabalhar quando estas estiverem na posição correcta, que proteja o utilizador.

O órgão de comando, que no caso da máquina de ensaio de amortecedores é o computador, deve estar facilmente acessível e permitir uma utilização segura, ou seja, estar fora de uma zona perigosa. Este é assim colocado na zona de trás da máquina, na tampa por cima da zona do redutor, devendo existir uma protecção fixa entre esta zona e a zona de ensaio.

A máquina deve ter um ou mais dispositivos de paragem de emergência, que permitam ao utilizador interromper um ensaio em caso de algo se danificar na máquina ou no equipamento sujeito a ensaio. Assim, deve ser colocado um botão de paragem de emergência junto da zona do utilizador da máquina. Já a paragem normal, é feita a partir do computador de controlo da máquina.

As medidas de protecção contra os riscos mecânicos a aplicar são as seguintes:

- estabilidade: a máquina foi projectada e fabricada para que em todas as condições de funcionamento previstas a sua estabilidade seja suficiente para evitar o seu derrube, ou de algum componente desta, e evitar ainda movimentos intempestivos. Para tal, é apoiada em quatro sapatas, cada uma preparada para suportar cargas até 1000 [kg];
- risco de ruptura em serviço: Avaliando os riscos de ruptura de elementos mecânicos, os maiores riscos advêm da ruptura da biela inferior, ou de alguma das suas ligações ou rolamentos, que iriam provocar que esta saísse do seu sitio normal de funcionamento (em pleno funcionamento da máquina), ruptura de um dos apoios, ou ligações destes com a máquina ou com o componente a ensaiar, ou ruptura da barra superior onde liga a célula de carga. Todas estas partes da máquina, bem como as ligações entre elas foram projectadas e fabricadas para resistir às solicitações a que são submetidas durante a utilização prevista. Deve contudo indicar-se no manual do utilizador as operações de manutenção a realizar, por razões de segurança, e as peças a substituir, bem como os critérios dessas substituições; Contudo, mesmo com as peças devidamente dimensionadas, devem ser colocados elementos que assegurem a protecção do utilizador caso algum dos elementos se danifique;
- riscos devidos às quedas e projecções de objectos: há que considerar o risco de quebra do equipamento a ensaiar, o que levaria a que algumas partes deste pudessem ser projectadas para fora da máquina, atingindo o utilizador. Assim, tal como no risco de ruptura de um componente da máquina, devem ser previstas protecções entre a zona de ensaio e o utilizador;
- riscos devidos às variações de velocidade de rotação: a máquina foi devidamente projectada e concebida para que as trocas de velocidade fossem feitas de forma segura, sem colocar em risco o utilizador. Estas são feitas sempre a partir do computador, não sendo necessário entrar em contacto com nenhum outro equipamento ou zona da máquina;
- prevenção dos riscos ligados aos elementos móveis: devem ser considerados meios de impedir o bloqueio dos elementos móveis, e no caso de este ocorrer, devem ser indicadas instruções e ferramentas para que permitam o desbloqueamento sem riscos;

As medidas de protecção contra riscos eléctricos são as seguintes:

- riscos devidos à energia eléctrica: como a máquina é alimentada por energia eléctrica, foi projectada e equipada de modo a prevenir todos os riscos de energia eléctrica. Assim, todos os equipamentos eléctricos foram ligados à linha de terra, a qual foi ainda ligada à estrutura da máquina;

- riscos devidos à electricidade estática: foi analisado e garantido que não aparecem cargas electrostáticas no funcionamento da máquina, e caso apareçam, sejam descarregadas pela linha de terra;

As medidas de protecção contra outros riscos são as seguintes:

- riscos devidos a erros de montagem: caso o utilizador faça mal alguma ligação durante a substituição do equipamento de ensaio, o curso, ou uma operação de manutenção, os equipamentos de protecção implementados para a segurança do utilizador em caso de quebra de algum componente devem assegurar a sua segurança também para esta situação;
- riscos devidos a temperaturas extremas: as elevadas temperaturas são perigosas em dois elementos distintos – no motor eléctrico e no equipamento a ensaiar; no motor eléctrico, caso este seja submetido a velocidades de ensaio muito elevadas durante longos períodos de teste, é possível que comece a aquecer, devendo-se ter esse aspecto em atenção. Já o equipamento a ensaiar, caso seja submetido a ensaios longos, aquece bastante, devendo-se ter cuidado para não quebrar. A presente máquina ainda não é dotada de sensores de temperatura, mas futuramente deverão ser incluídos dois sensores, um para cada caso descrito;
- riscos de incêndio: a máquina deve ter sempre um extintor por perto, para o caso de ocorrer algum incêndio. Contudo, não está previsto que tal possa ocorrer, mesmo com o sobreaquecimento dos elementos atrás descritos;
- risco de queda: caso o utilizador não seja alto, para realizar a colocação de uma suspensão na máquina é necessário utilizar algum utensílio que lhe permita chegar ao ponto mais elevado desta. Assim, deve ser usado um escadote, que seja o mais estável possível, de modo a minimizar os riscos de queda do utilizador.

7.2.4. Alterações a realizar

De modo a cumprir as duas directivas atrás abordadas, e de acordo com a análise de risco realizada, serão abordadas de seguida as várias alterações realizadas à máquina, tanto a nível mecânico, eléctrico, electrónico, e de programação.

Começando pelas alterações a nível mecânico, visando garantir a segurança do utilizador, devem ser colocadas protecções na máquina. A principal zona a proteger é a zona onde são ensaiados os amortecedores, ou seja, entre a barra superior onde é ligada a célula de carga e o cilindro, por onde passa o veio que liga a biela inferior ao apoio inferior.

A protecção a colocar deve permitir a substituição do equipamento de ensaio, ou alterar a posição deste entre ensaios, e proteger permanentemente o utilizador. Assim, devem ser colocadas duas protecções: uma para a parte de trás da máquina (onde está o *PC*, e de onde o utilizador realiza o controlo) que é fixa, e outra na parte da frente, onde se realizam as alterações entre ensaios, que é móvel. Estas são apresentadas na figura 7.2.



Figura 7.2 – Máquina com protecções inferiores e superiores, (a) vista de trás, (b) vista de frente.

Como se pode verificar da figura 7.2, a protecção da parte da frente da máquina funciona como uma porta, que é aberta para trocar o equipamento, os apoios, regular a altura da barra superior, etc., mas durante o ensaio tem de estar fechada, de modo a proteger o utilizador. Esta é uma condição que tanto o programa computacional (e do microcontrolador), como o próprio circuito eléctrico devem respeitar, como será abordado mais à frente.

Estas protecções são constituídas por acrílico com 1 [cm] de espessura, sendo este fixo numa estrutura de aço que está ligado às peças de fixação, que ligam a protecção às barras verticais da máquina. No caso da protecção da frente, num dos lados estas peças de ligação são móveis, de modo a criar o efeito de uma porta. Para se fechar, devem apertar-se dois parafusos, um em cima e outro em baixo. Estes pormenores podem ser observados na figura 7.3.

De lado, entre uma protecção e outra, poderá ser colocada uma rede em malha de aço, para proteger o utilizador de alguma peça que possa eventualmente saltar para um dos lados (principalmente o lado em que o utilizador trabalha com o computador).

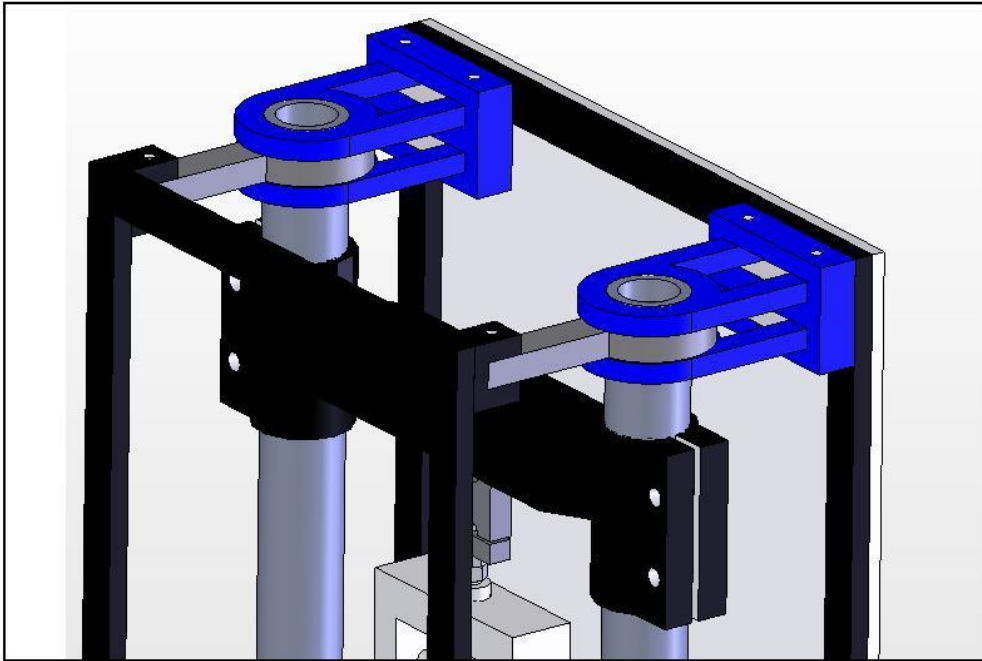


Figura 7.3 – Ligações das protecções superiores na máquina.

A parte inferior da máquina, onde estão o motor eléctrico, redutor mecânico, sistema biela-manivela, e partes electrónicas, deve ser tapada com chapa (com uma espessura mínima de 5 [mm]), para proteger o utilizador caso se danifique algum componente, com especial perigo para o caso de se partir a biela inferior, ou alguma das suas ligações.

Assim, nos lados da máquina e na parte de trás, estas protecções podem ser fixas à sua estrutura por meio de parafusos, pois não será necessário tirá-las para realizar alterações entre ensaios. Contudo, é frequente a troca do curso de ensaio entre os vários testes realizados com a máquina, pelo que a protecção da parte da frente deve permitir, tal como na parte superior, ser aberta e fechada com facilidade, funcionando como uma porta. Esta deve também ter um sensor que detecte quando está fechada, e só dar ordem de arranque ao sistema quando isso se verificar. Estas protecções e porta podem ser verificadas na figura 7.2.

Passando às protecções eléctricas, a máquina contempla desde o início um disjuntor para o motor eléctrico. Contudo, este não é considerado um dispositivo de paragem de emergência, devendo ser colocado um botão adequado para realizar essas operações.

É assim aplicado um botão de paragem de emergência na zona mais próxima do computador, onde o utilizador deverá estar durante o ensaio. Este botão deve ser para ligação trifásica, suportar uma corrente de 16 [A], potência 5,5 [kW], e deve ser ligado ao cabo eléctrico, entre a rede de alimentação trifásica (ficha) e o variador electrónico de velocidade, em série com o disjuntor. A sua colocação na máquina é apresentada na figura seguinte.

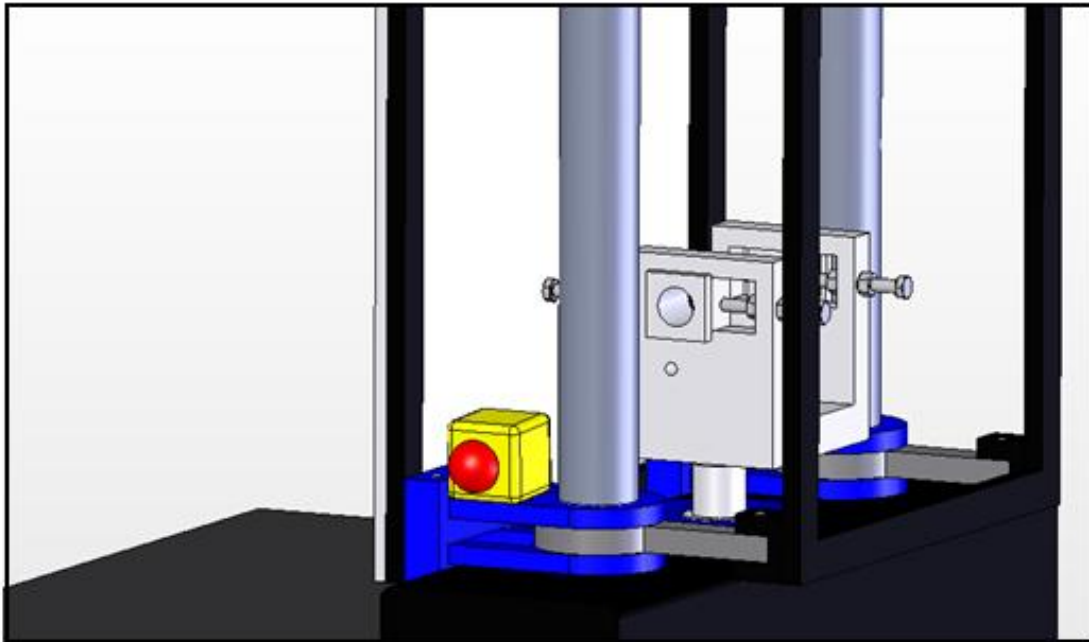


Figura 7.4 – Local de aplicação do botão de paragem de emergência.

Para além deste botão, deve ainda ser colocado um contactor em cada uma das portas, em série com a linha de paragem de emergência, de modo a que quando alguma porta for aberta a alimentação do motor eléctrico ser imediatamente cortada. Estes contactores devem também ser trifásicos, suportar uma corrente de 16 [A], e do tipo NO, ou seja, normalmente abertos. Isto para que somente quando a respectiva porta esteja fechada, é que o contactor feche o circuito, permitindo a passagem de corrente. Caso a porta esteja aberta, o contactor está no seu estado normal (aberto), pelo que não irá passar corrente para o variador de velocidade e, consequentemente, para o motor eléctrico.

O esquema eléctrico com as ligações destes dispositivos de paragem de emergência é apresentado na figura 7.5. Nesta pode-se verificar que logo a seguir à ficha, o cabo eléctrico vai passar por um primeiro contactor (da porta superior), seguindo-se o botão de paragem de emergência e um segundo contactor (da porta inferior). Depois destes dispositivos, o cabo passa por um disjuntor, que permite ligar e desligar o circuito nas situações normais, seguindo depois para o filtro e o variador electrónico de velocidade (VEV), o qual acciona o motor eléctrico.

Pode verificar-se já na figura 7.5 a colocação do filtro do VEV, o qual deve ser implementado para respeitar a Directiva EMC atrás abordada, e claro, para minimizar o ruído provocado pelo VEV que, conforme foi estudado nos capítulos 3 e 4, afecta a qualidade dos sinais envolvidos em toda a parte electrónica e de instrumentação.

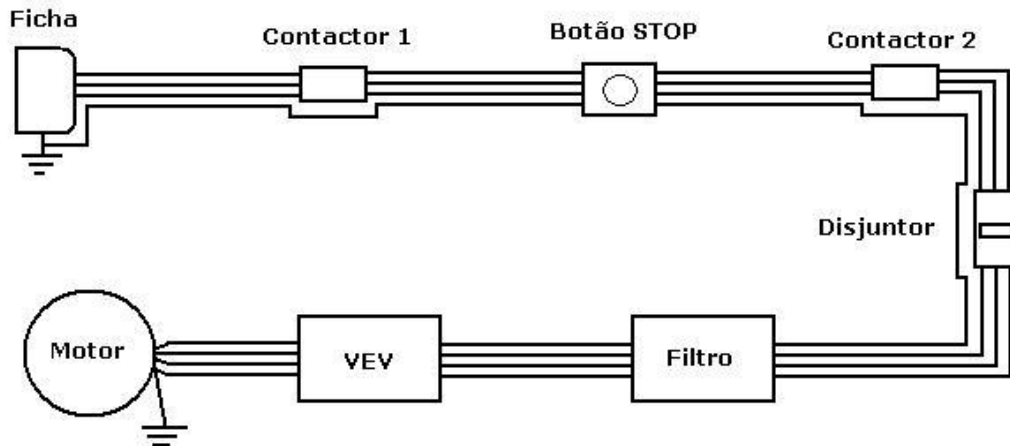


Figura 7.5 – Esquema eléctrico, prevendo todos os dispositivos de protecção.

A nível electrónico, são também colocados sensores nas portas, que detectam quando estas estão abertas ou fechadas, e são ligados ao microcontrolador. Estes são sensores magnéticos, e sempre que a porta a que estão associados for aberta, deixam de ser magnetizados, abrindo-se o circuito eléctrico; já quando a porta é fechada, o sensor é magnetizado, criando a passagem de corrente entre as suas extremidades, fechando assim o circuito. Estes sensores estão apresentados na figura 7.6.

Então, o microcontrolador recebe a informação do estado das portas nos seus pinos a que os sensores estão ligados, estando os pinos a nível alto quando uma porta for aberta, e a nível baixo quando for fechada.

Assim, o programa de controlo do microcontrolador utilizado só irá correr quando as portas estiverem fechadas; caso alguma seja aberta, ou seja, caso o microcontrolador detecte um dos pinos a nível alto, imediatamente suspende o funcionamento normal do programa e envia uma ordem de paragem ao motor eléctrico.

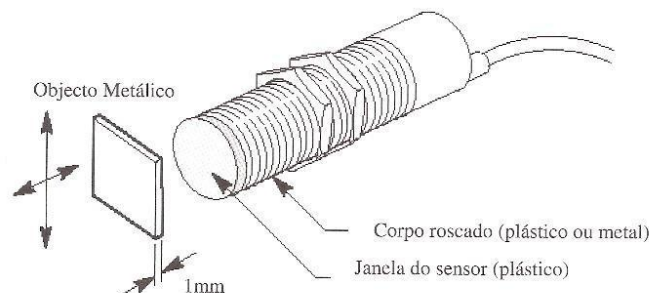


Figura 7.6 – Sensor magnético, para detectar quando as portas de protecção estão abertas ou fechadas.

No computador, caso uma porta seja aberta, será lançada uma janela a visar o utilizador que o ensaio foi suspenso devido a uma das portas estar aberta (ou mesmo as duas). Na figura 7.7 é apresentada uma mensagem deste tipo, para o caso da porta de protecção superior ter sido aberta durante um ensaio (ou no início do ensaio, após pressionar o botão *OK*, que inicia o ensaio).

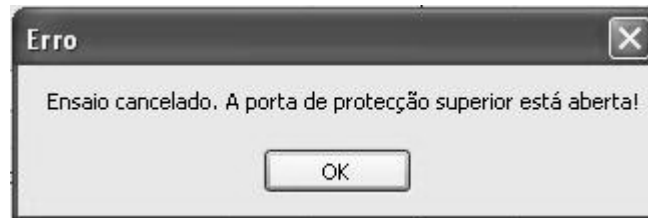


Figura 7.7 – Mensagem de erro, para o caso da porta de protecção superior ter sido aberta.

7.3. Calibração

A principal qualidade de um instrumento ou padrão de medição, é a de medir com o mínimo erro possível, isto é, um instrumento de medição de boa qualidade deve ser capaz de apresentar resultados com pequenos erros de medição. Os seus princípios construtivos e operacionais devem ser projectados para minimizar os erros de medição. Contudo, por melhores que sejam as características de um instrumento de medição, este irá sempre apresentar erros. A perfeita caracterização destes erros é de grande importância para que o resultado da medição possa ser determinado de maneira segura e fiável.

Apesar de nalguns casos os erros de medição poderem ser analítica ou numericamente calculados, na prática são utilizados quase sempre procedimentos experimentais para a sua determinação.

Com o desenvolvimento tecnológico, aumentam as exigências para conhecer e melhorar a incerteza dos instrumentos de medição, característica esta que é assegurada através da calibração desses instrumentos.

No caso da máquina de ensaio de amortecedores, a sua principal tarefa é caracterizar o amortecedor ou suspensão, através da apresentação de gráficos que relacionam a força com a velocidade e a força com a posição. Verifica-se assim que a exactidão do valor da força medido, sob o ponto de vista técnico, é de grande importância para a validade dos resultados apresentados, pelo que se pode considerar que a veracidade desses resultados está directamente relacionada com a calibração do aparelho que mede a força exercida sobre o amortecedor, a célula de carga.

7.3.1. Calibração existente

Para se conseguir medir a força, usando a célula de carga já referida no capítulo 4, ligaram-se as saídas desta a um amplificador de instrumentação (INA114), e a saída deste amplificador ao MSP430. Considerando as características da célula de carga usada (tensão e compressão, +-1000 [kg], alimentação 10 [V], sensibilidade 2 [mV/V]), e do microcontrolador MSP430 (pinos: tensão mínima 0 [V], tensão máxima 3,3 [V]), definiu-se que -1000 [kg] iriam corresponder a 0 [V] à saída do INA114, 0 [kg] correspondiam a 1,4 [V], e +1000 [kg] a 2,8 [V]. Isto para respeitar os limites do MSP430.

Para tal, foi calculado um ganho igual a 70 para o INA114, tendo sido implementada uma resistência de ganho igual a 721,7 [Ω] (como este valor não existe, foi colocada uma resistência variável de 50 [Ω] em série com uma resistência de 680 [Ω]) neste integrado, e um *offset* de 1,4 [V].

Assim, e não tendo nenhum meio disponível de exercer forças conhecidas sobre a célula de carga para a calibrar adequadamente, foi definido que a variação da força seria linear com a variação da tensão, tendo sido elaboradas as seguintes tabelas 7.1 e 7.2.

Tabela 7.1 – Calibração inicial da célula de carga, à compressão.

Peso [kg]	Força [N]	Tensão [V]
0	0	1,40
50	500	1,47
100	1000	1,54
150	1500	1,61
200	2000	1,68
250	2500	1,75
300	3000	1,82
350	3500	1,89
400	4000	1,96
450	4500	2,03
500	5000	2,10
550	5500	2,17
600	6000	2,24
650	6500	2,31
700	7000	2,38
750	7500	2,45
800	8000	2,52
850	8500	2,59
900	9000	2,66
950	9500	2,73
1000	10000	2,80

A tabela 7.1 mostra os valores da tensão para variações da força de 500 em 500 [N], ou seja, de 50 em 50 [kg.f], para os casos de medições à compressão, enquanto a tabela 7.2 mostra os mesmos valores da tensão nos mesmos intervalos, para valores medidos quando a célula de carga está à tracção.

Tabela 7.2 – Calibração inicial da célula de carga, à tracção.

Peso [kg]	Força [N]	Tensão [V]
0	0	1,40
-50	-500	1,33
-100	-1000	1,26
-150	-1500	1,19
-200	-2000	1,12
-250	-2500	1,05
-300	-3000	0,98
-350	-3500	0,91
-400	-4000	0,84
-450	-4500	0,77
-500	-5000	0,70
-550	-5500	0,63
-600	-6000	0,56
-650	-6500	0,49
-700	-7000	0,42
-750	-7500	0,35
-800	-8000	0,28
-850	-8500	0,21
-900	-9000	0,14
-950	-9500	0,07
-1000	-10000	0,00

Verifica-se que as variações da tensão por cada incremento de 50 [kg] são de 0,07 [V], concluindo-se assim que por cada quilo de variação há uma variação de 1,4 [mV] à saída do INA114, ou seja, à entrada do microcontrolador.

Assim, para calcular a força, aplica-se a expressão:

$$Força = \frac{Tensão - 1,4}{0,0014} \times 10[N] \quad [7.1]$$

Sabe-se contudo que ao assumir esta variação linear, está-se a considerar um erro nas medições, pois não se está a calibrar adequadamente a célula de carga, como no ponto seguinte será abordado. Estas considerações foram tidas somente devido à não existência de pesos conhecidos da ordem de grandeza desejada, que permitissem acrescentar uma coluna a

cada tabela, com os valores reais medidos, os quais serviriam para calibrar com maior exactidão a célula de carga.

Contudo, como se assumiram estes valores, o erro é sempre o mesmo em todas as medições, conseguindo-se identificar as variações do comportamento das suspensões e amortecedores ensaiados, não sendo somente os valores apresentados os exactamente correctos.

O intuito da máquina de ensaio de amortecedores é verificar o comportamento destes, e principalmente o que acontece quando se varia um ou mais parâmetros, como as afinações, tipo de óleo, etc., pelo que o mais importante não é saber o valor exacto da força, mas sim o andamento da curva e a ordem de grandeza da força nos vários pontos, e verificar as variações das curvas de ensaio para ensaio.

Portanto, para simples ensaios de amortecedores, o que foi assumido considera-se suficiente para aceitar os resultados como válidos. Porém, nesta fase do trabalho os objectivos são outros, sendo de seguida apresentado o método correcto para uma calibração adequada da força medida pela célula de carga.

7.3.2. Calibração a realizar

De acordo com [5], calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. Para entender melhor o seu significado, é necessário associa-lo ao termo comparação, acrescentando que ao que se compara é representado por um padrão de classe de exactidão superior, isto é, calibrar é estabelecer uma relação de comparação contra um padrão apropriado, onde a diferença encontrada estabelece o erro do instrumento a calibrar, com uma incerteza de medição associada a um nível de confiança, geralmente de 95%.

Para que os resultados obtidos possam ser aceites para efeitos oficiais, a norma ISO 9001, através do item 7.6 da mesma, referente ao controlo dos dispositivos de medição e monitorização, exige que quando for necessário assegurar resultados válidos, o dispositivo de medição deva ser calibrado.

A calibração da célula de carga deve ser feita por uma entidade com competências adequadas para tal, que disponha de equipamentos próprios e seja acreditada pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ). Dentro destes parâmetros, encontram-se em Portugal o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), o Instituto de Soldadura e Qualidade, e o próprio IPQ, no Laboratório Central de Metrologia (ver [6]).

No Laboratório de Metrologia de uma das referidas instituições, deve-se submeter a célula de carga a forças conhecidas, com variações de 500 em 500 [N], ou seja, pesos de 50 em 50 [kg], como nas tabelas 7.1 e 7.2, e refazer as referidas tabelas, em que o valor da tensão não é o apresentado anteriormente, mas sim o valor medido na realidade. Comparando as novas

tabelas com as apresentadas atrás, verifica-se o erro das medições realizadas com a consideração de variações lineares da diferença de potencial à saída da célula de carga.

Todo o processo de calibração deve ser realizado como descrito em 5.2.5, onde está descrito como este processo deve ser realizado, não dando atenção à parte da programação, mas sim ao ponto de vista do utilizador, em que é seleccionado o menu *Calibração*, no *software* da máquina, e o vão sendo aplicadas forças conhecidas na célula de carga, e o utilizador (ou a entidade que realizada a calibração) vai colocando esse valor numa caixa de texto no ecrã do *PC*, e pressionando o botão *OK*, de modo a obter o valor medido pela célula de carga, correspondente a essa força, sendo este mostrado numa outra caixa de texto (só de leitura). Após aplicar várias forças, é criada uma tabela idêntica às anteriores, sendo feitas as correspondências entre os valores medidos, e os valores introduzidos no programa, sendo assim feita uma nova calibração.

Para confirmar que os valores apresentados pela máquina estão devidamente calibrados, deve ser realizado um novo processo de calibração logo a seguir ao primeiro, e confirmar se os valores de força aplicados, estão 100% de acordo com os valores apresentados, o que serve para confirmar que a calibração foi bem feita.

7.4. Processo de Certificação do Equipamento

A certificação de produtos é a atestação dada por um Organismo de Certificação, com base numa decisão decorrente de uma análise, que comprova que a conformidade de um produto com os requisitos especificados foi demonstrada.

Para se proceder à certificação de produtos podem ser utilizados vários sistemas de certificação, conforme definidos pela ISO / IEC. Em Portugal, a CERTIF procede à certificação de produtos de acordo com qualquer um dos vários sistemas de certificação definidos. A certificação com a atribuição das marcas de conformidade apenas é concedida com base no sistema 5.

A certificação de produtos é um instrumento que permite aos fabricantes demonstrarem de uma forma imparcial e credível a qualidade, a fiabilidade e as performances dos seus produtos na medida em que:

- reforça a confiança dos clientes;
- faz a diferença face aos concorrentes;
- aumenta a competitividade através da redução dos custos da não qualidade;
- reforça a imagem da empresa;
- facilita o acesso a novos mercados;
- permite evidenciar o cumprimento de requisitos regulamentares.

A concessão da licença para o uso da Marca CERTIF – Produto Certificado é da competência da CERTIF, de acordo com as metodologias definidas no documento DO.06.

Estas metodologias são desenvolvidas garantindo que a certificação dos produtos é efectuada com a máxima confiança e ao mais baixo custo para o fabricante. Para a realização dos ensaios necessários à avaliação da conformidade dos produtos a CERTIF recorre a laboratórios acreditados, nacionais e europeus, com os quais desenvolve uma cooperação estreita no sentido de conseguir a máxima eficácia na realização dos ensaios requeridos.

Quanto ao documento DO.06, disponibilizado em [7], define a certificação, e indica as várias fases de um processo de certificação. Os principais itens deste documento são apresentados de seguida:

a) Sistema de certificação

A certificação é a garantia escrita, dada por um organismo certificador independente e imparcial, que comprova que o produto está conforme com exigências definidas através de normas ou especificações técnicas.

Para ter acesso à Marca CERTIF – Produto Certificado adoptou-se o sistema nº 5 da ISO (Organização Internacional de Normalização) que pressupõe a realização de ensaios sobre uma amostra do produto a certificar e auditorias ao sistema da qualidade do fabricante.

b) Vantagens

A certificação é um instrumento que permite à empresa demonstrar de uma forma imparcial e credível a qualidade, a fiabilidade e as *performances* dos seus produtos na medida em que: reforça a confiança dos clientes; faz a diferença face aos concorrentes; aumenta a competitividade através da redução dos custos da não qualidade; reforça a imagem da empresa; é uma forma de aceder a novos mercados; permite evidenciar o cumprimento de regulamentações técnicas.

c) Processo de certificação

A concessão da licença para o uso da Marca CERTIF – Produto Certificado é da competência da CERTIF, depois de cumpridos os passos referidos no fluxograma da figura 7.8.

d) Apresentação do pedido de certificação

Depois de identificar quais as normas ou especificações técnicas com que deseja certificar o seu produto, o requerente ou o seu representante poderá solicitar à CERTIF o início do respectivo processo.

Esse pedido deve ser formulado de acordo com o impresso IM.25 Formulário para o pedido de certificação de produto, e deve ser acompanhado de um conjunto de documentação, nomeadamente:

- IM 04 Questionário de avaliação;
- organograma da empresa e da função qualidade;
- documentação relativa ao produto;
- fluxograma das principais fases de fabrico, com indicação dos pontos onde são efectuadas acções de controlo, documentos aí utilizados e identificação dos responsáveis;
- lista do equipamento utilizado para inspecção, medição e ensaio, suas características e fases em que é utilizado;
- lista de procedimentos relativos aos requisitos do Sistema da Qualidade do fabricante, definidos em cada esquema de certificação;
- documento comprovativo do registo, nacional ou internacional, da(s) marca(s) comercial(is) ou autorização do uso da(s) marca(s) comercial(is) de terceiros.

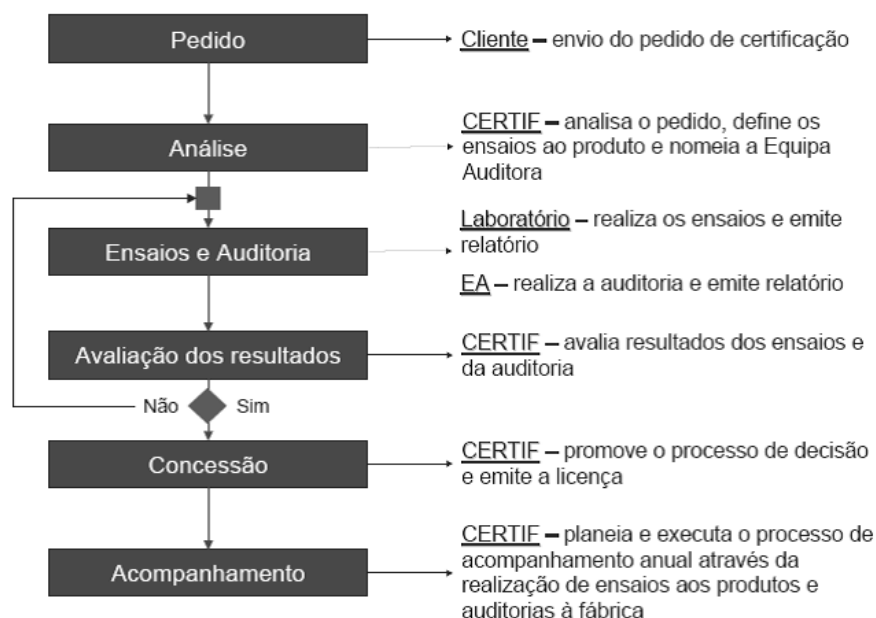


Figura 7.8 – Fluxograma com a descrição do processo de certificação, realizado pela CERTIF.

e) Custos da certificação

Os encargos correspondentes à certificação com concessão e uso da Marca serão fixados anualmente pela CERTIF e calculados tendo em conta vários critérios, nomeadamente, a categoria de produto e o sector de actividade industrial onde este se insere.

Os encargos financeiros a considerar são respeitantes à abertura e instrução do processo, auditorias, ensaios, colheita de amostras a ensaiar e acompanhamento da certificação.

Todos estes encargos são facturados pela CERTIF, directamente ao requerente ou ao titular da licença, ou a qualquer outro representante devidamente autorizado para o efeito.

f) Validade da licença para o uso da marca

A licença é geralmente válida por um período de cinco anos, podendo, em casos especiais, a sua duração ser inferior. As licenças são renováveis por períodos iguais aos anteriormente concedidos, podendo ser exigidos para o efeito modificações das condições iniciais. Caso o titular não esteja interessado na renovação da respectiva licença, deverá informar a CERTIF, por escrito, antes do final da validade da mesma.

A validade da licença para o uso da Marca Produto Certificado cessa automaticamente no caso das normas segundo as quais são fabricados os produtos deixarem de ser aplicáveis.

Para a utilização da marcação CE, devem-se respeitar todos os aspectos abordados em 7.2.1, definidos pela Directiva Máquinas. Como a máquina de ensaio de amortecedores não se encontra no anexo IV da referida directiva, é necessário somente apresentar os seguintes documentos, perante o organismo responsável pela certificação:

- descrição geral da máquina;
- desenho de conjunto da máquina e desenhos dos circuitos de comando, bem como as descrições e explicações pertinentes necessárias para a compreensão do funcionamento da máquina;
- desenhos de pormenor e completos, eventualmente acompanhados de notas de cálculo, resultados de ensaios, certificados, etc., que permitam verificar a conformidade da máquina com os requisitos essenciais de saúde e de segurança;
- documentação relativa à avaliação dos riscos, que deverá demonstrar o procedimento seguido e incluir uma lista dos requisitos essenciais de saúde e de segurança aplicáveis à máquina e a descrição das medidas de protecção implementadas para eliminar os perigos identificados ou reduzir os mesmos e, se for caso disso, uma indicação dos riscos residuais associados à máquina;
- normas e outras especificações técnicas que tenham sido utilizadas, acompanhadas da enumeração dos requisitos essenciais de saúde e de segurança abrangidos por essas normas;
- relatório técnico que forneça os resultados dos ensaios efectuados pelo fabricante ou por um organismo escolhido pelo fabricante ou pelo seu mandatário;
- exemplar do manual de instruções da máquina;
- se for caso disso, exemplares da declaração CE de conformidade da máquina ou de outros produtos incorporados na máquina;
- exemplar da declaração CE de conformidade, se for caso disso.

Deve também apresentar-se a análise de risco e o manual do utilizador, os quais são apresentados neste trabalho, complementados com as medidas de segurança implementadas na máquina para respeitar as normas em vigor, também apresentadas neste capítulo.

A apresentação destes todos elementos pode ser feita directamente à CERTIF, ou ainda ao Instituto de Soldadura e Qualidade, que também tem competências para emitir a declaração CE de conformidade.

7.5. Nota Conclusiva

Neste capítulo foi estudado todo o processo de certificação da máquina de ensaio de amortecedores, tendo sido apresentadas as normas e directivas que esta deve respeitar, sendo feita uma análise de risco com base nessas normas, e apresentadas as alterações a realizar de modo a respeitar as referidas normas.

Graças a este estudo conseguiu-se aperfeiçoar bastante esta máquina, pois antes não tinha sido contemplado praticamente nenhum pormenor de segurança do operador, e nesta fase, a máquina garante o máximo de condições de segurança possíveis, tendo sido introduzidas alterações em todos os campos possíveis (mecânica, eléctrica, electrónica e informática), com vista a esta segurança. Sem este estudo e alterações, era impossível pensar em certificar o equipamento, e mesmo incorrecto disponibilizá-lo para um operador trabalhar com ele.

Foi também abordada a questão da calibração, identificando organismos competentes para efectuar este processo, o qual é de extrema importância, de modo a garantir que os valores apresentados nos gráficos finais sejam o mais verídicos possíveis, apresentando valores devidamente calibrados.

Apresentou-se no final a descrição do processo de certificação do equipamento, o que, após todo o estudo feito ao longo do capítulo, as alterações realizadas com vista à segurança do operador, e o manual do utilizador apresentado em anexo, permite concluir que a certificação da máquina está em condições de se realizar.

Referências

- [1] Directiva 1998/37/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 de Junho de 1998, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 1998, Portaria 207, de 23/07/1998.
- [2] F. Lima, F. Alba, “Integração da Segurança no Projecto de Máquinas”, *Revista Segurança*, Julho de 2007, Número 178.
- [3] Directiva 2006/42/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 17 de Maio de 2006, *Jornal Oficial da União Europeia*, 2006, Portaria 157, de 9/06/2006.
- [4] Directiva 2004/108/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 15 de Dezembro de 2004, *Jornal Oficial da União Europeia*, 2004, Portaria 390, de 31/12/2004.
- [5] ISO / IEC / OIML / BIPM – Vocabulary of basic and general terms in metrology, *International Organization for Standardization* (Genebra – Suíça), *INMETRO*, 1995, Portaria 029, de 10/03/1995.
- [6] Instituto Português da Qualidade, “Unidade de Metrologia Científica e Aplicada – LCM,” Março de 2008, <http://www.ipq.pt/custompage.aspx?modid=1616>.
- [7] CERTIF, “Certificação de Produtos”, Maio de 2008, <http://www.certif.pt/cprodutos.asp>.

Capítulo

8

Ensaaios e Verificação do Funcionamento

Concluído o aperfeiçoamento da máquina de ensaio de amortecedores, realizaram-se ensaios a uma suspensão e a um amortecedor, com a máquina desenvolvida, de modo a verificar o seu funcionamento. Estes permitem concluir sobre todo o trabalho realizado, e ainda sobre o propósito da máquina: a análise do funcionamento do amortecedor e da suspensão ensaiados.

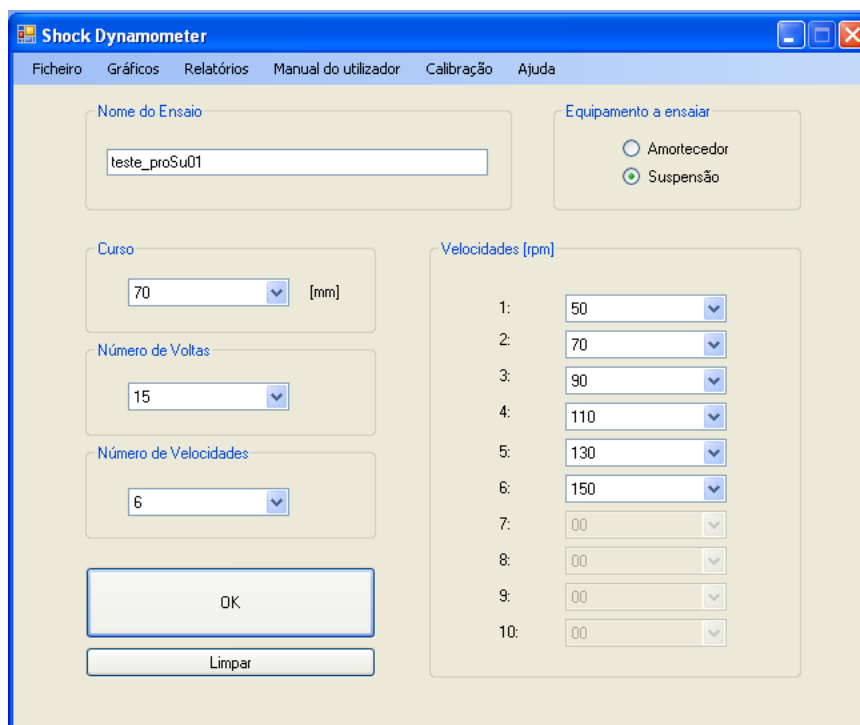
8.1. Ensaio de uma Suspensão

Para confirmar o sucesso das alterações realizadas, e a funcionalidade desejada dos programas desenvolvidos, foram realizados diversos testes, começando-se por testar uma suspensão de uma moto de Motocross. Estes equipamentos têm dimensões maiores que os amortecedores, tendo sido a máquina devidamente preparada para o ensaio.

Foi seleccionado em primeiro lugar um curso de 70 [mm], que corresponde à segunda posição do lado 2 do excêntrico, tendo sido em primeiro lugar colocada nessa posição a peça que liga a biela ao excêntrico, e só depois aplicada a suspensão na máquina.

Com a suspensão aplicada, foram feitos 4 ensaios neste curso: um primeiro ensaio, em que suspensão não tinha mola (teste somente ao hidráulico), não se usando o *encoder* para a medição da posição; um segundo ensaio, onde foi utilizada a mola na suspensão, de modo a verificar a influência desta no comportamento do equipamento, não se usando novamente o *encoder* na medição da posição; um terceiro ensaio, em que não foi utilizada a mola na suspensão, mas em que se utilizou o *encoder* para medir a posição; e um quarto ensaio, realizado às mesmas velocidades e voltas do terceiro, mas sem *encoder*, de modo a comparar os gráficos finais dos ensaios realizados com e sem este aparelho.

Os dados seleccionados para o primeiro ensaio estão apresentados na figura 8.1.



The screenshot shows the 'Shock Dynamometer' software interface. The window title is 'Shock Dynamometer' and it has a menu bar with 'Ficheiro', 'Gráficos', 'Relatórios', 'Manual do utilizador', 'Calibração', and 'Ajuda'. The main area contains several input fields and controls:

- Nome do Ensaio:** A text box containing 'teste_proSu01'.
- Equipamento a ensaiar:** Two radio buttons: 'Amortecedor' (unselected) and 'Suspensão' (selected).
- Curso:** A dropdown menu set to '70' with '[mm]' next to it.
- Número de Voltas:** A dropdown menu set to '15'.
- Número de Velocidades:** A dropdown menu set to '6'.
- Velocidades [rpm]:** A list of 10 dropdown menus with values: 1: 50, 2: 70, 3: 90, 4: 110, 5: 130, 6: 150, 7: 00, 8: 00, 9: 00, 10: 00.
- Buttons:** 'OK' and 'Limpar' buttons at the bottom.

Figura 8.1 – Dados do primeiro ensaio com uma suspensão.

Os resultados obtidos neste primeiro ensaio são apresentados na figura 8.2.

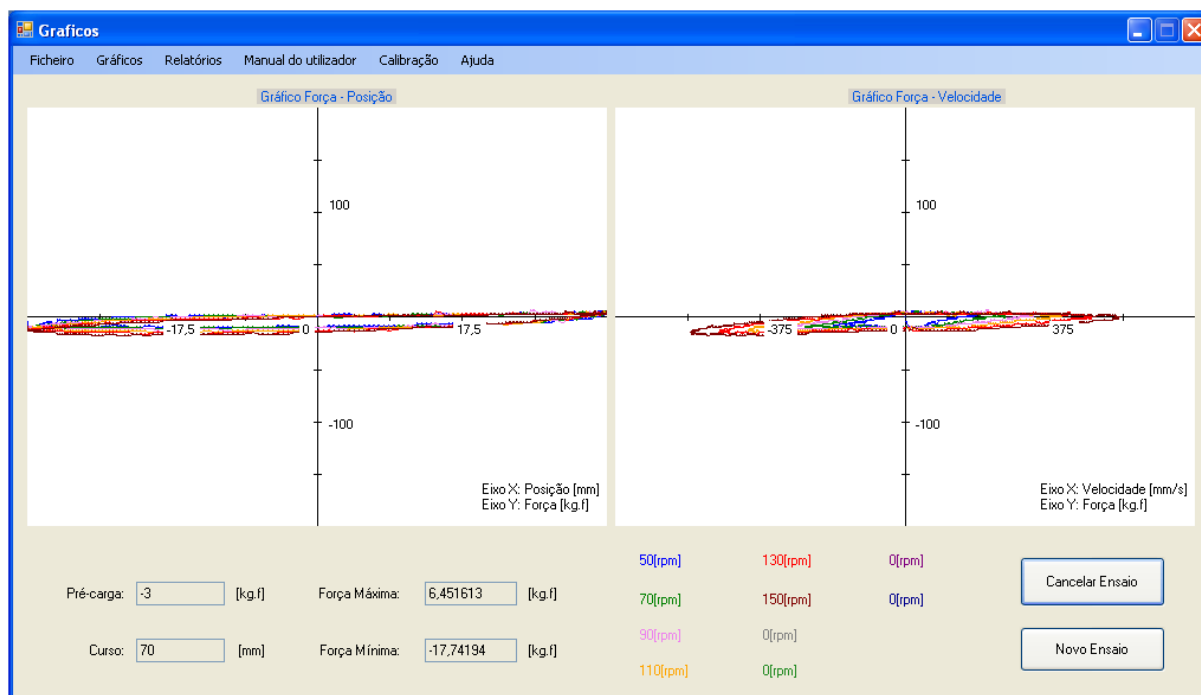


Figura 8.2 – Resultados do primeiro ensaio com uma suspensão (curso 70 [mm], sem mola).

Este ensaio foi realizado com velocidades de rotação do excêntrico baixas, e a suspensão testada não tinha mola, verificando-se assim que as forças exercidas sobre o hidráulico são muito reduzidas, chegando somente a um máximo de 17,7 [kg.f] à tracção, e 6,5 [kg.f] à compressão, sendo estes valores muito reduzidos. Verifica-se ainda que para as diferentes velocidades ensaiadas, com o curso de 70 [mm], as variações da força são muito reduzidas, em função da velocidade.

De modo a verificar a influência da mola, para o curso e velocidades ensaiadas, realizou-se um segundo ensaio, com as mesmas velocidades de rotação, mas tendo sido aplicada uma mola na suspensão. Os resultados são apresentados na figura 8.3.

Verifica-se que com a aplicação da mola, a força exercida na compressão aumentou para 31 [kg.f], verificando-se novamente que para baixas velocidades e um curso baixo, a força varia muito pouco com as variações da velocidade, mesmo com a mola aplicada.

Analisando os valores máximos e mínimos, para além da variação da força máxima, já comentada, verifica-se que a força mínima, ou seja, a força máxima exercida na extensão da suspensão, não varia com a aplicação da mola, concluindo-se assim que esta força é determinada exclusivamente pelo hidráulico, enquanto que a força exercida na compressão, é suportada praticamente por inteiro pela mola.

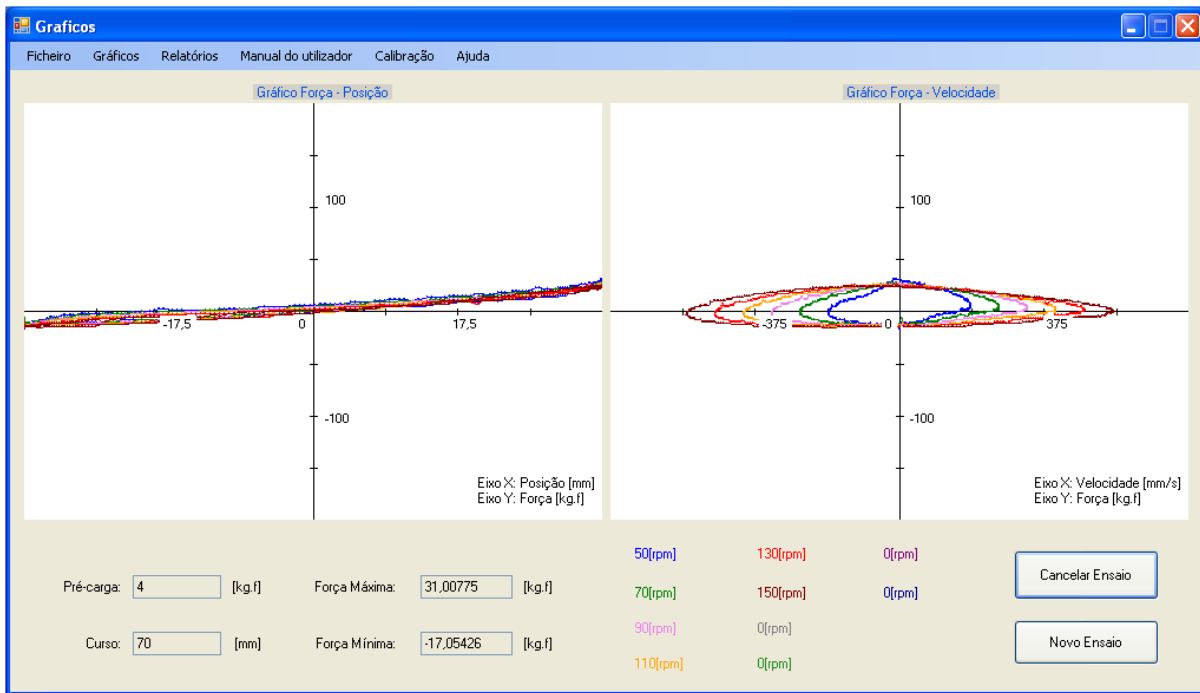


Figura 8.3 – Resultados do segundo ensaio com uma suspensão (curso 70 [mm], com mola).

Verificadas as diferenças entre a utilização ou não utilização da mola na suspensão, pretende-se verificar a diferença entre a utilização do *encoder* para medir a posição do excêntrico, ou não utilização deste equipamento, que é um dos principais objetivos deste trabalho. Assim, foram realizados mais dois ensaios com a suspensão, para um curso de 70 [mm], tendo sido testadas velocidades de rotação mais elevadas do que no ensaio anterior, para verificar as alterações da força exercida.

The screenshot shows the 'Shock Dynamometer' software window. It has a menu bar with 'Ficheiro', 'Gráficos', 'Relatórios', 'Manual do utilizador', 'Calibração', and 'Ajuda'. The main area contains several configuration sections: 'Nome do Ensaio' with a text box containing 'teste_proSu03'; 'Equipamento a ensaiar' with radio buttons for 'Amortecedor' and 'Suspensão' (selected); 'Curso' with a dropdown menu set to '70 [mm]'; 'Número de Voltas' with a dropdown menu set to '15'; 'Número de Velocidades' with a dropdown menu set to '6'; and 'Velocidades [rpm]' with a list of 10 dropdown menus containing the values: 60, 90, 120, 150, 170, 190, 00, 00, 00, 00. At the bottom are 'OK' and 'Limpar' buttons.

Figura 8.4 – Dados do terceiro e quarto ensaios com uma suspensão.

Assim, na figura 8.4 é apresentada a janela com os dados seleccionados para este novo ensaio. Como se pode verificar, as velocidades ensaiadas passaram a ser bastante mais elevadas, chegando às 190 [rpm], valor próximo do limite superior das velocidades que a máquina permite ensaiar.

Quanto aos resultados, na figura 8.5 são apresentados os gráficos finais do ensaio realizado com *encoder*, e na figura 8.6 são apresentados os gráficos do ensaio realizado sem este aparelho.

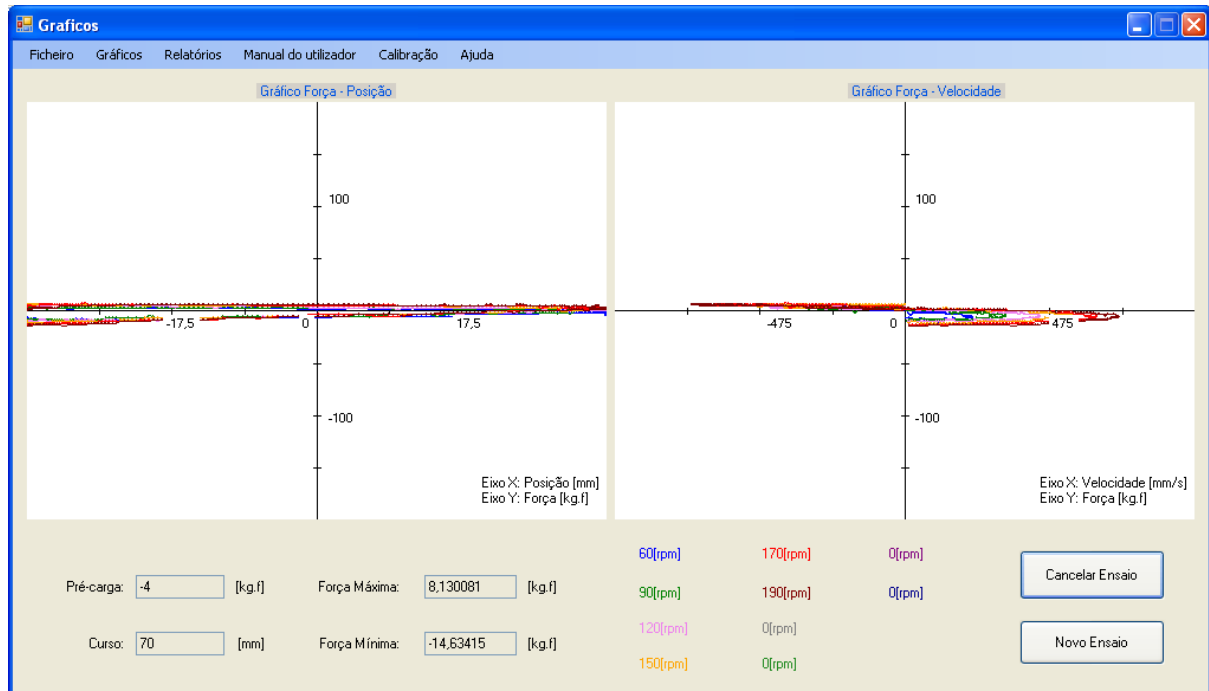


Figura 8.5 – Resultados do terceiro ensaio com uma suspensão (curso 70 [mm], com *encoder*).

Pode-se verificar em primeiro lugar da análise dos resultados destes dois ensaios que as forças exercidas pela suspensão ensaiada, com um curso reduzido e sem mola, mesmo a velocidades mais elevadas, continuam a ser muito reduzidas, e a variar pouco com a velocidade de ensaio.

Quanto à diferença entre a utilização ou não utilização do *encoder*, pode-se verificar que eliminando este aparelho, conseguem-se melhores resultados, pois deixam de existir os “pulsos fantasma” verificados anteriormente nas elevadas velocidades, e que fazem com que os gráficos obtidos nestas velocidades não correspondam à realidade, como se pode verificar na figura 8.5. Nesta, após uma análise atenta dos resultados, verifica-se que a força apresentada na última posição (correspondente a 357°), não a força exercida realmente nessa posição, mas sim numa posição muito anterior. Contudo, devido a vibrações do sistema de adaptação do *encoder*, são criados pulsos que não correspondem a deslocamentos do excêntrico, fazendo com que o MSP ao contar 14 pulsos (correspondentes a 1,008°), não esteja a contar 14 pulsos do excêntrico, mas sim alguns pulsos do excêntrico misturados com alguns pulsos do sistema de adaptação do *encoder*.

Assim, em vez de se adquirir um novo *encoder*, e ao passar-se a emular este aparelho, conseguiu-se obter resultados mais verídicos, e que estão de acordo com a realidade, podendo estes ser analisados na figura 8.6.

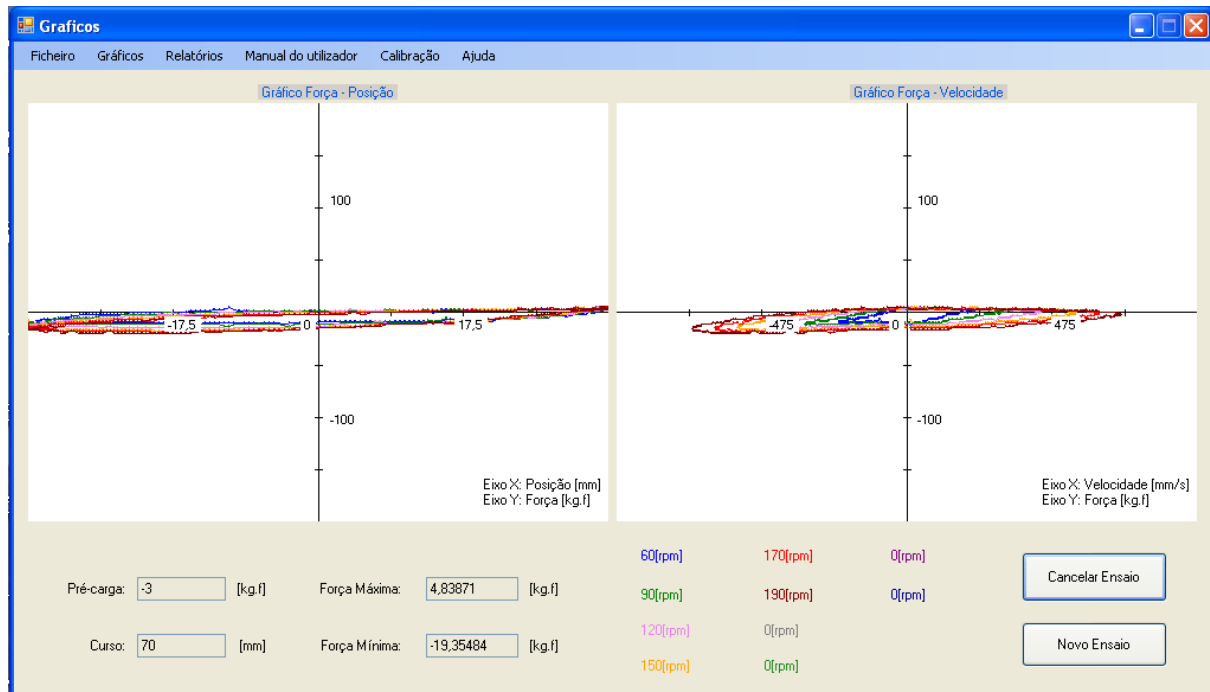


Figura 8.6 – Resultados do quarto ensaio com uma suspensão (curso 70 [mm], sem *encoder*).

Assim, verifica-se desde já que se conseguem obter melhores resultados com a solução adoptada para emular o *encoder*, do que com a utilização deste aparelho, aplicado em paralelo com o excêntrico.

De seguida foi realizado um novo ensaio com a suspensão, tendo sido testado um curso de 170 [mm], de modo a verificar o comportamento da suspensão num curso de ensaio mais elevado. Novamente foram feitos quatro ensaios, dois a baixas velocidades e dois a velocidades mais elevadas, e novamente foi testada a utilização ou não utilização de *encoder*, e a utilização ou não utilização de mola na suspensão.

Assim, em primeiro lugar foram feitos dois ensaios para o curso acima indicado, com velocidades de rotação médias e elevadas, um sem *encoder*, e outro com a utilização deste aparelho para medir a posição do excêntrico. Os dados destes dois ensaios estão apresentados na figura 8.7.

Pode-se verificar que se começa por ensaiar uma velocidade reduzida, e se aumenta progressivamente a velocidade de ensaio até atingir os 190 [rpm], o que deve ser sempre feito no caso de se pretender ensaiar velocidades elevadas, de modo a não danificar a máquina, principalmente o motor eléctrico.

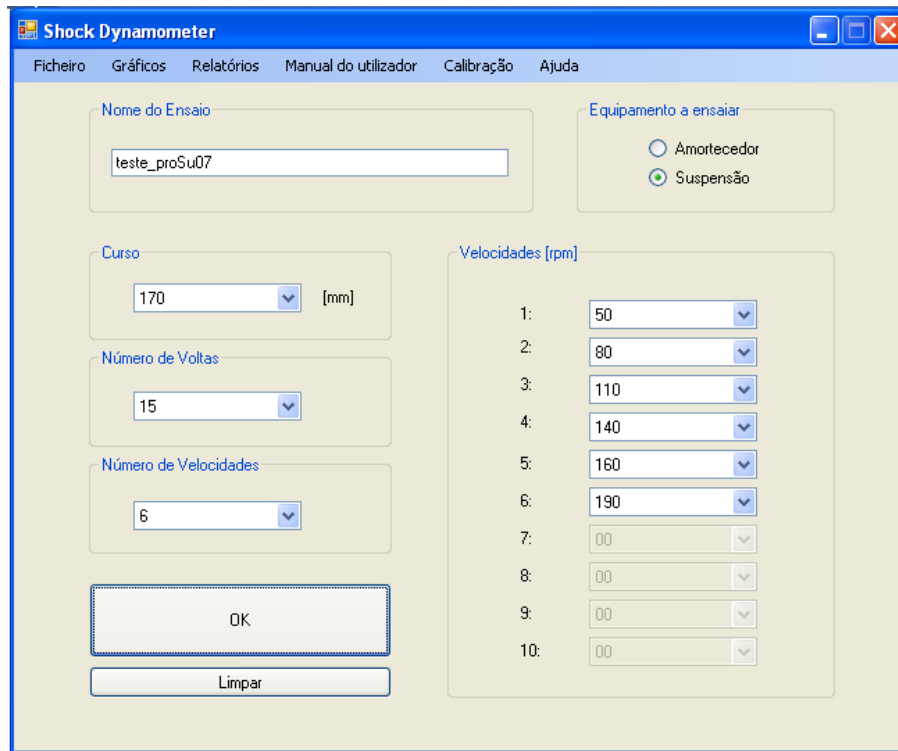


Figura 8.7 – Dados do quinto e sexto ensaios com uma suspensão.

Quanto aos resultados obtidos, na figura 8.8 são apresentados os gráficos finais para o ensaio realizado sem utilizar o *encoder* na medição da posição do excêntrico, e na figura 8.9 são apresentados os gráficos do ensaio realizado com a utilização deste aparelho.

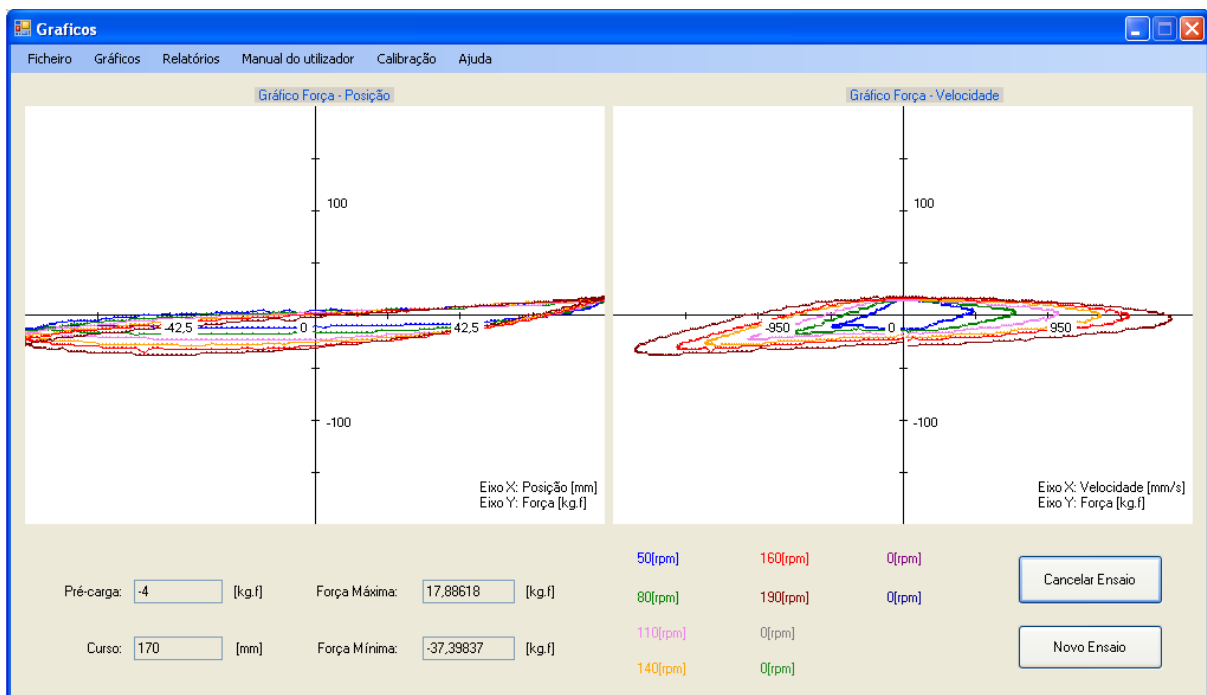


Figura 8.8 – Resultados do quinto ensaio com uma suspensão (curso 170 [mm], sem *encoder*).

Pode-se verificar da comparação dos resultados obtidos que os valores medidos estão muito próximos entre si, mas as curvas obtidas sem a utilização do *encoder* são mais perfeitas do que com a utilização deste, visto que ao não existirem os “pulsos fantasma” gerados pelo sistema de adaptação do *encoder*, consegue-se que os 360 pontos medidos correspondam exactamente aos 360 graus do excêntrico, sendo isso mesmo comprovado pelas curvas que começam e acabam sempre no mesmo ponto, o que não se verifica com a utilização do *encoder*.

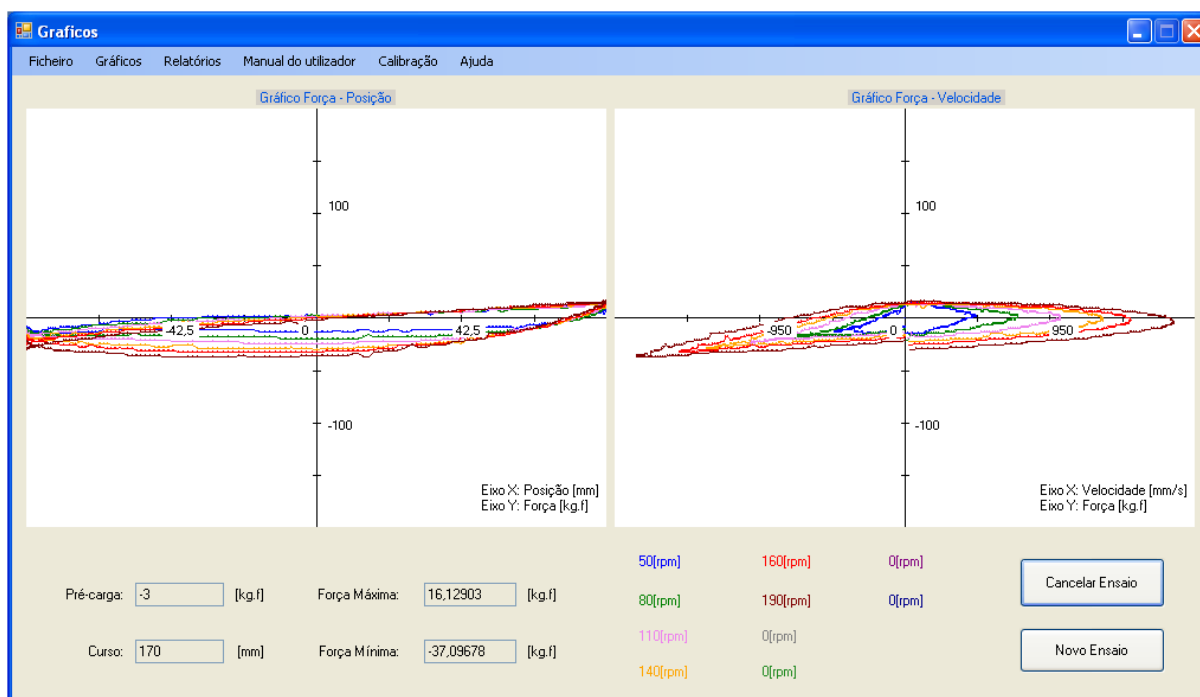


Figura 8.9 – Resultados do sexto ensaio com uma suspensão (curso 170 [mm], com *encoder*).

Quanto aos resultados propriamente ditos, verifica-se que para um curso de ensaio de 170 [mm], as forças exercidas pela suspensão passam a ser mais elevadas, tanto na compressão como na extensão, tendo valores máximos de 16 e 37 [kg.f], respectivamente.

Assim, pode-se concluir que com o aumento do curso, as suspensões realizam maiores forças para as mesmas velocidades de ensaio.

Verifica-se também que para o curso ensaiado, ao aumentar a velocidade, as forças exercidas passam a ser diferentes, principalmente na extensão, o que não se verificava tão claramente com um curso mais reduzido.

Finalmente, foram realizados os dois últimos ensaios com a suspensão, com um curso de 170 [mm], pretendendo-se comparar a utilização e não utilização da mola neste equipamento. Em ambos os ensaios não foi utilizado o *encoder* para a medição da posição do excêntrico. Os dados dos ensaios realizados estão apresentados na figura 8.10.

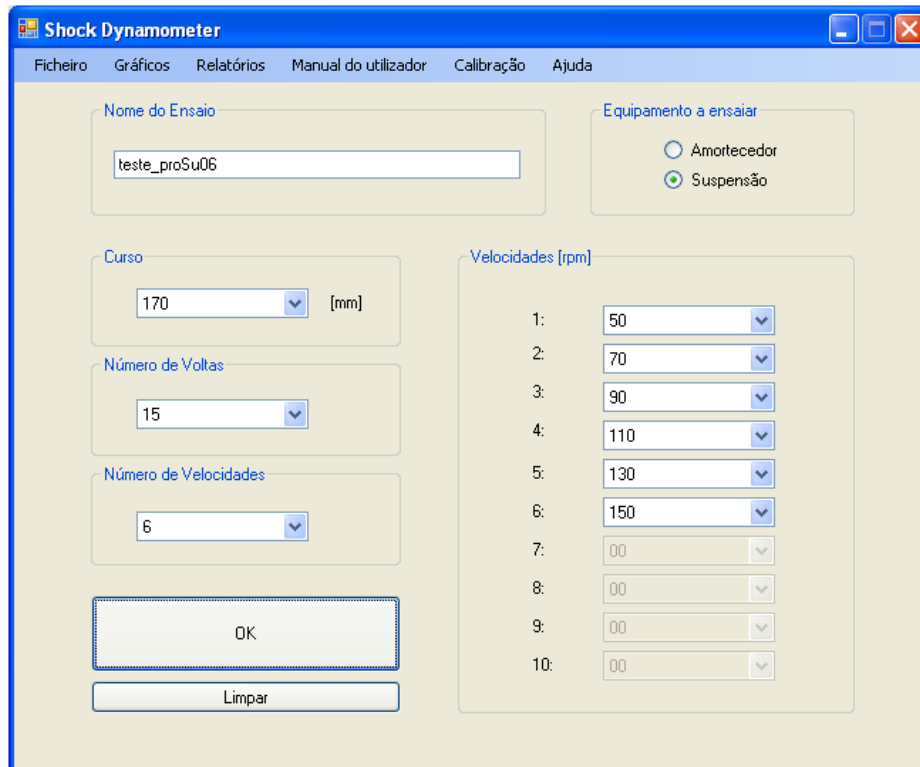


Figura 8.10 – Dados do sétimo e oitavo ensaios com uma suspensão.

Estes ensaios foram realizados para velocidades de rotação do excêntrico mais reduzidas, entre 50 e 150 [rpm], com o objectivo único de analisar a intervenção da mola num curso mais elevado.

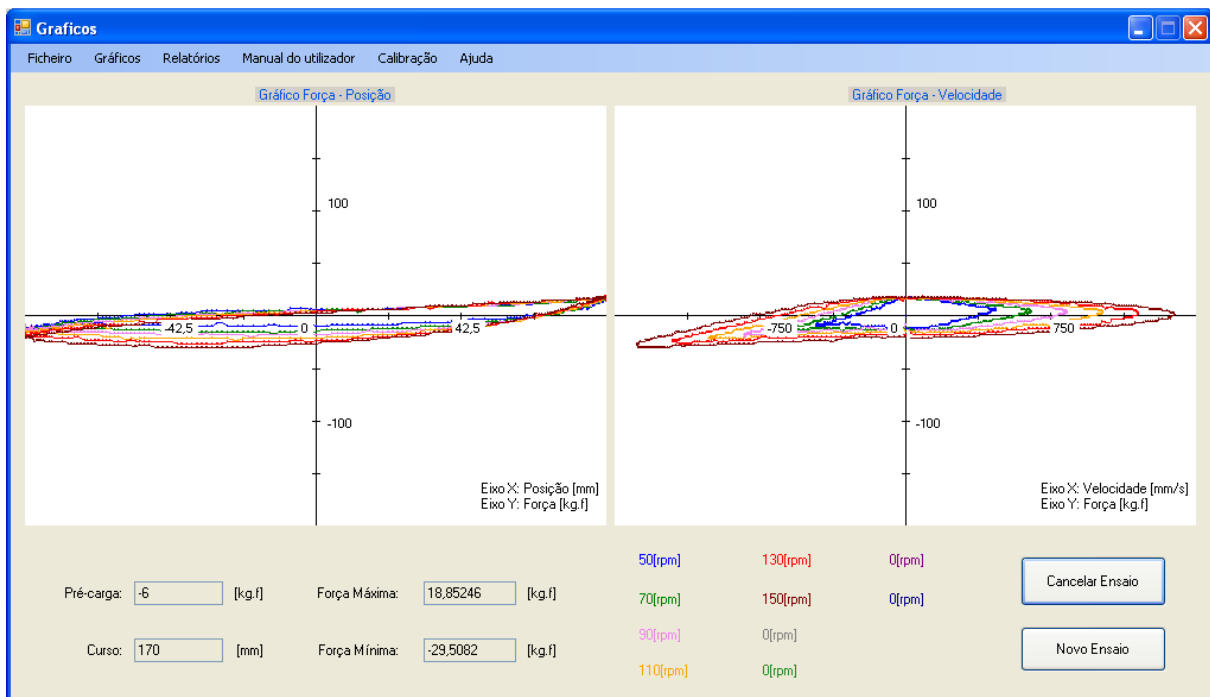


Figura 8.11 – Resultados do sétimo ensaio com uma suspensão (curso 170 [mm], sem mola).

Os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 8.11 e 8.12, para os ensaios sem mola e com mola, respectivamente.

Verifica-se novamente que, com a mola, a força realizada pela suspensão na fase da compressão aumenta para valores bem mais elevados do que sem mola, enquanto que os valores da força quando a suspensão se encontra na fase da extensão são exactamente iguais, o que comprova que nesta fase a força é realizada exclusivamente pelo hidráulico.

Verifica-se que quando se usa a mola na suspensão, a diferença entre as forças exercidas em cada velocidade é muito reduzida, sendo os valores destas mais próximos entre cada velocidade. Quando não há mola, isso já não se verifica, conseguindo-se verificar diferenças dos valores da força entre velocidades.

Nestes ensaios não foi utilizado *encoder*, e consegue ver-se que os gráficos estão traçados como esperado, podendo-se concluir novamente que a solução utilizada para medir a posição do excêntrico tem uma eficácia muito boa, sendo os resultados melhores que os obtidos com esse aparelho colocado em paralelo com o excêntrico.

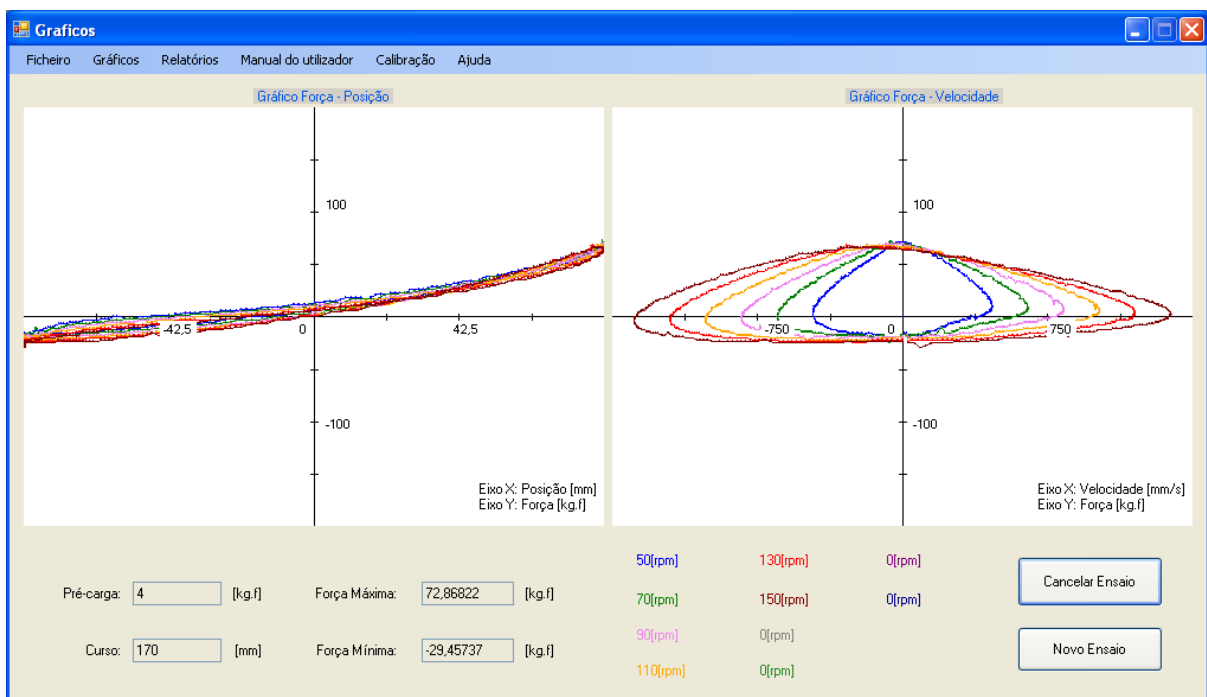


Figura 8.12 – Resultados do oitavo ensaio com uma suspensão (curso 170 [mm], com mola).

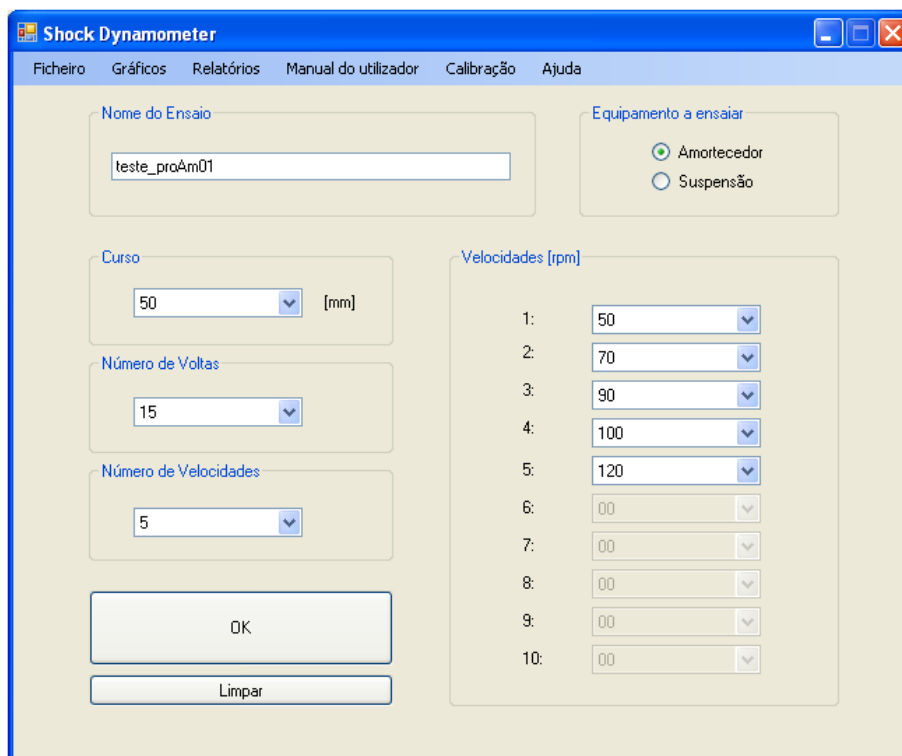
Assim, pode desde já concluir-se que a máquina satisfaz todos os objectivos para o ensaio de suspensões, tendo estes sido realizados com a maior facilidade, e obtidos todos os resultados desejados, estando os gráficos obtidos de acordo com o perfil desejado, que permite estudar o comportamento deste tipo de equipamentos.

8.2. Ensaio de um Amortecedor

Após ensaiar uma suspensão e confirmar a eficácia das alterações realizadas na máquina, foi ensaiado um amortecedor, que como já foi explicado neste trabalho, realiza forças mais elevadas que as suspensões, o que faz com a máquina tenha um comportamento diferente. Assim, foi testado um amortecedor de um *Quad* (moto de quatro rodas), que apesar de não ser dos equipamentos que realiza as forças mais elevadas, já possui características que permitem à priori prever a realização de forças mais elevadas que uma suspensão, o que neste caso é suficiente para testar a eficácia da máquina no ensaio de amortecedores.

Para o ensaio deste equipamento foram realizadas todas as alterações necessárias, desde a alteração da posição do travessão superior, ao ajuste dos apoios, que não foram ainda os projectados no capítulo 2 deste trabalho, por não estarem prontos a tempo dos ensaios, mas sim os apoios universais anteriormente desenvolvidos. Foi seleccionado um curso de 50 [mm] para os primeiros três ensaios, sendo realizados dois ensaios a velocidades de rotação mais reduzidas, um com a utilização de *encoder* e outro sem utilizar este aparelho, e um terceiro ensaio a velocidades mais elevadas, sem a utilização de *encoder* para a medição da posição do excêntrico.

A janela com os dados seleccionados para o primeiro e segundo ensaios do amortecedor é apresentada na figura 8.13. Pode-se verificar nesta que as velocidades ensaiadas são baixas, variando de 50 a 120 [rpm], com incrementos de 20 [rpm] entre cada velocidade.



The screenshot shows the 'Shock Dynamometer' software interface. The window title is 'Shock Dynamometer' and it has a menu bar with 'Ficheiro', 'Gráficos', 'Relatórios', 'Manual do utilizador', 'Calibração', and 'Ajuda'. The main area is divided into several sections:

- Nome do Ensaio:** A text box containing 'teste_proAm01'.
- Equipamento a ensaiar:** Two radio buttons: 'Amortecedor' (selected) and 'Suspensão'.
- Curso:** A dropdown menu set to '50' with '[mm]' next to it.
- Número de Voltas:** A dropdown menu set to '15'.
- Número de Velocidades:** A dropdown menu set to '5'.
- Velocidades [rpm]:** A list of 10 dropdown menus. The first three are set to 50, 70, and 90. The remaining seven are set to 00.
- Buttons:** 'OK' and 'Limpar' buttons at the bottom.

Figura 8.13 – Dados do primeiro e segundo ensaios com um amortecedor.

Os resultados destes ensaios estão apresentados nas figuras 8.14 e 8.15, com e sem *encoder*, respectivamente.

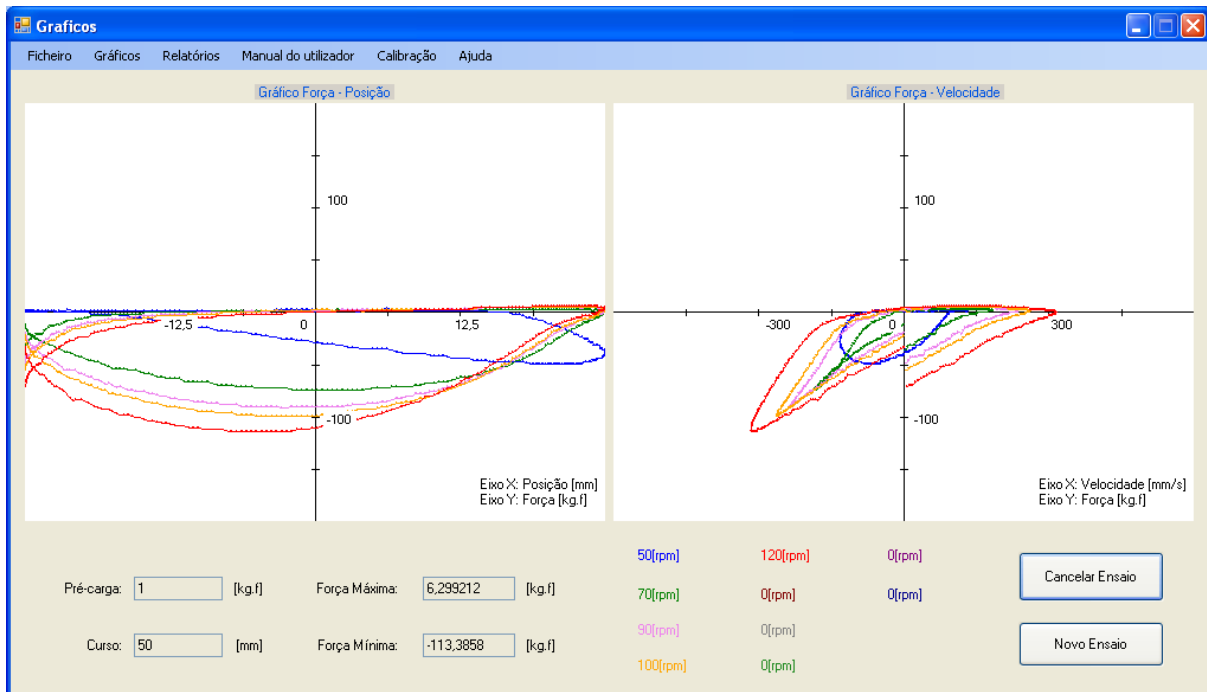


Figura 8.14 – Resultados do primeiro ensaio com um amortecedor (curso 50 [mm], com *encoder*).

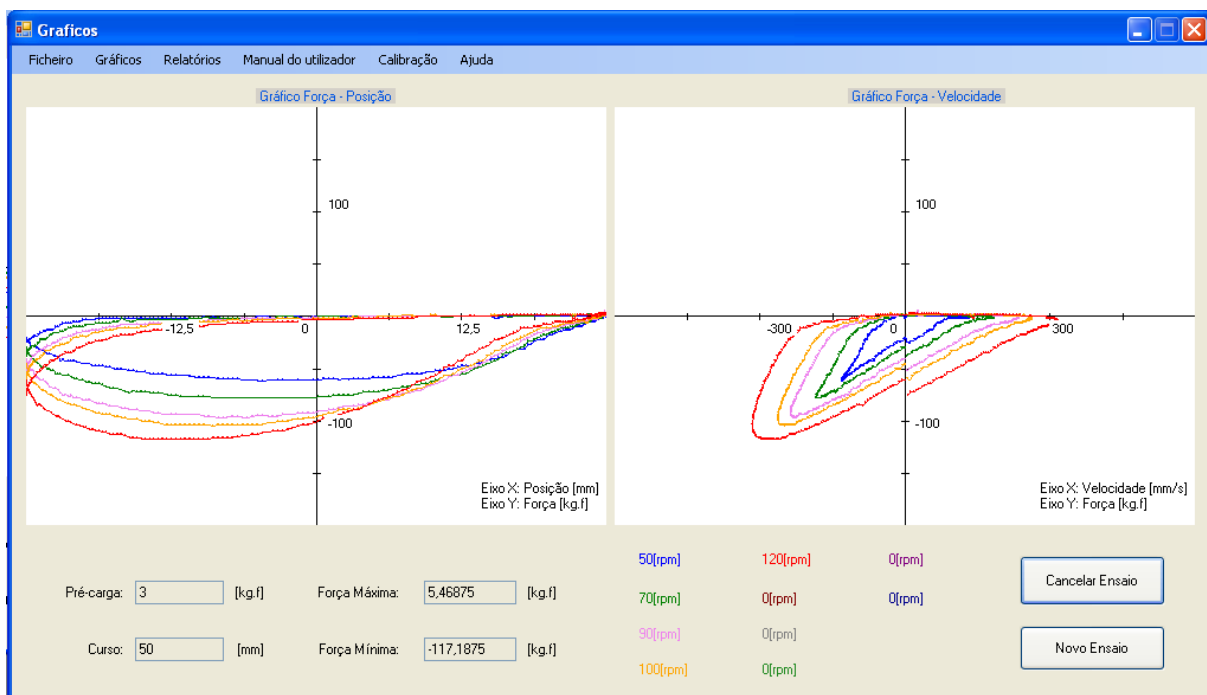


Figura 8.15 – Resultados do segundo ensaio com um amortecedor (curso 50 [mm], sem *encoder*).

Analisando os resultados obtidos, pode-se concluir novamente que a solução adoptada em que não se utiliza o *encoder* para medir a posição do excêntrico permite obter melhores resultados do que usando este aparelho em paralelo com o excêntrico, verificando-se que as curvas terminam praticamente no mesmo ponto onde começam, ou próximo deste, o que mostra que os 360 pontos correspondem aos 360 graus do excêntrico, situação que não se verifica nos gráficos obtidos ao usar o *encoder*. Assim, nos restantes ensaios realizados ao amortecedor não foi utilizado o *encoder* para a medição da posição do excêntrico.

Quanto às forças medidas, verifica-se que na fase de compressão não atingem valores muito elevados, enquanto que na fase da extensão são atingidos os valores máximos, tal como verificado nos ensaios da suspensão. Contudo, no amortecedor os valores das forças são mais elevados, atingindo um valor máximo de 117,2 [kg.f], para uma velocidade de 120 [rpm].

Ainda com um curso de 50 [mm], foi realizado um terceiro ensaio, a velocidades mais elevadas, de modo a verificar o comportamento do amortecedor a essas velocidades. Os dados deste ensaio estão apresentados na figura 8.16, podendo-se ver que a velocidade máxima passou a ser igual a 170 [rpm].

The screenshot shows the 'Shock Dynamometer' software interface. The window title is 'Shock Dynamometer' and it has a menu bar with 'Ficheiro', 'Gráficos', 'Relatórios', 'Manual do utilizador', 'Calibração', and 'Ajuda'. The main area contains several input fields and a list of velocities.

Nome do Ensaio	Equipamento a ensaiar
teste_proAm03	<input checked="" type="radio"/> Amortecedor <input type="radio"/> Suspensão

Curso	Velocidades [rpm]
50 [mm]	1: 50
	2: 80
	3: 110
	4: 130
	5: 150
	6: 170
	7: 00
	8: 00
	9: 00
	10: 00

Additional fields: Número de Voltas: 15; Número de Velocidades: 6. Buttons: OK, Limpar.

Figura 8.16 – Dados do terceiro ensaio com um amortecedor.

Os resultados deste ensaio estão apresentados na figura 8.17. Pode-se verificar que com o aumento da velocidade de rotação, as forças aumentam, bem como o formato dos gráficos, principalmente do gráfico *força-posição*. Esta variação deve-se à alteração do comportamento do amortecedor a altas velocidades, devido à válvula (ou pilha de anilhas) deste.

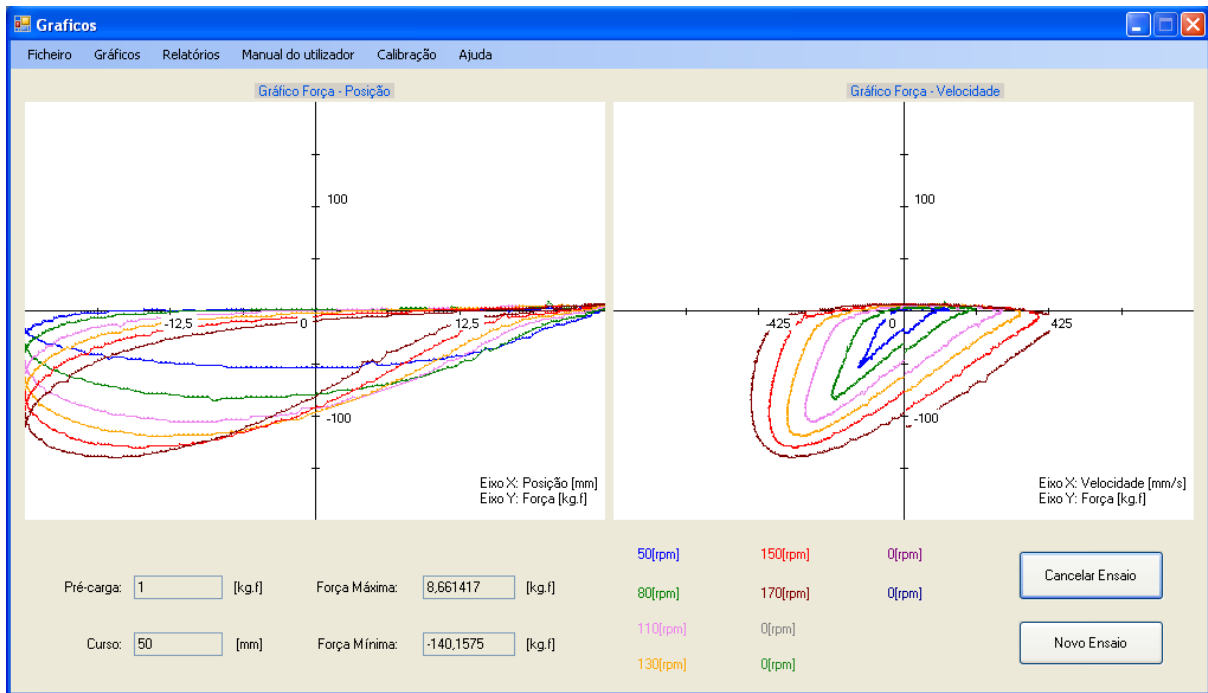


Figura 8.17 – Resultados do terceiro ensaio com um amortecedor (curso 50 [mm], sem *encoder*).

De modo a analisar o comportamento do amortecedor ensaiado com um curso diferente, foi seleccionado um curso de 70 [mm], e feitos dois ensaios: um com velocidades de rotação mais reduzidas, e outro com velocidades de rotação mais elevadas.

The screenshot shows the 'Shock Dynamometer' software window. It has a menu bar with 'Ficheiro', 'Gráficos', 'Relatórios', 'Manual do utilizador', 'Calibração', and 'Ajuda'. The main area contains several configuration sections. 'Nome do Ensaio' has a text box with 'teste_proAm04'. 'Equipamento a ensaiar' has two radio buttons: 'Amortecedor' (selected) and 'Suspensão'. 'Curso' has a dropdown menu set to '70' [mm]. 'Número de Voltas' has a dropdown menu set to '10'. 'Número de Velocidades' has a dropdown menu set to '5'. Below these are 'OK' and 'Limpar' buttons. On the right side, there is a 'Velocidades [rpm]' section with 10 rows, each with a dropdown menu. The values are: 1: 50, 2: 60, 3: 70, 4: 80, 5: 90, 6: 00, 7: 00, 8: 00, 9: 00, 10: 00.

Figura 8.18 – Dados do quarto ensaio com um amortecedor.

Na figura 8.18 é apresentada a janela com os dados do quarto ensaio, realizado para um curso de 70 [mm], e com velocidades de rotação mais baixas, variando entre 50 e 90 [rpm]. Os resultados deste ensaio são apresentados na figura 8.19.

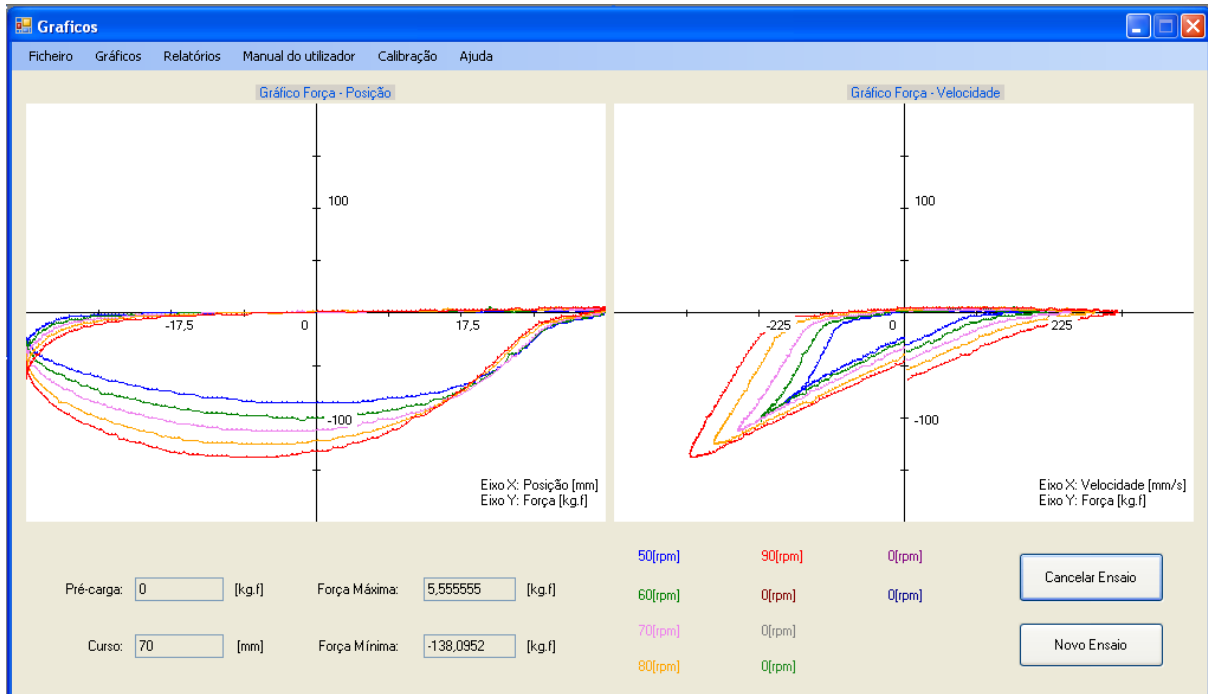


Figura 8.19 – Resultados do quarto ensaio com um amortecedor (curso 70 [mm], sem *encoder*).

Deste ensaio pode-se concluir que com o aumento do curso, as forças exercidas pelo amortecedor aumentaram, mesmo nas baixas velocidades, pois passou-se de uma situação em que se tinha uma força máxima na fase de extensão de aproximadamente 100 [kg.f], a 90 [rpm] e para um curso de 50 [mm], para uma força máxima na mesma fase de aproximadamente 140 [kg.f], para a mesma velocidade, mas com um curso de 70 [mm].

De seguida, ensaiou-se o amortecedor com o mesmo curso, para velocidades de rotação mais elevadas, entre 50 e 150 [rpm], estando os resultados apresentados na figura 8.20. Pode-se verificar nesta que novamente a força aumentou com o aumento do curso, e que as curvas têm um formato diferente nas altas velocidades, sendo o comportamento do amortecedor bastante diferente nestas.

É precisamente para analisar este comportamento que a máquina de ensaio de amortecedores serve, pois com base nestes gráficos, conseguem-se analisar as variações das curvas após serem efectuadas alterações nos equipamentos.

Comparando-se os gráficos obtidos com os gráficos *standard* dos equipamentos, fornecidos pelos fabricantes, verifica-se que as curvas seguem o mesmo andamento, comprovando-se que o objectivo principal da máquina, que é fornecer as curvas características dos amortecedores e suspensões, foi alcançado com todo o sucesso.

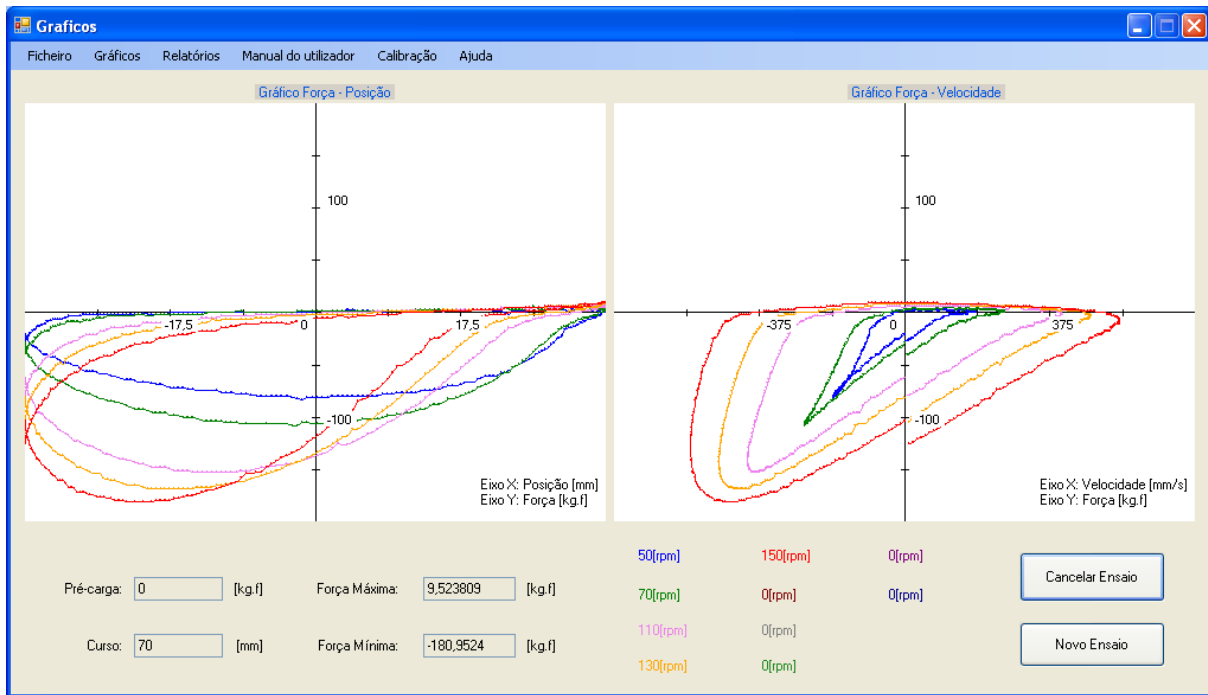


Figura 8.20 – Resultados do quino ensaio com um amortecedor (curso 70 [mm], sem *encoder*).

Capítulo

9

Conclusões

Concluído o trabalho, são apresentadas as principais conclusões deste, destacando os objectivos alcançados, e apresentadas sugestões para trabalho futuro que poderá ainda ser desenvolvido.

9.1. Contribuições Originais

Ao longo de todo o trabalho, no final de cada capítulo de projecto (ou alterações ao projecto inicial), ou sempre que fosse pertinente, foram apresentadas várias conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, mas pretende-se neste capítulo final referir as principais conclusões obtidas no decorrer do trabalho, mostrando que os objectivos iniciais foram alcançados, destacando as contribuições originais do mesmo.

O principal objectivo, de aperfeiçoar a máquina de ensaio de amortecedores projectada e desenvolvida anteriormente sob os pontos de vista mecânico, eléctrico/electrónico, e informático, e ainda de modo a cumprir os requisitos de segurança, foi alcançado, tendo-se desenvolvido uma máquina pronta a colocar no mercado, que realiza os ensaios pretendidos de forma automática, e apresenta graficamente e automaticamente os resultados ao utilizador, de forma simples e eficaz, nas máximas condições de segurança.

Quanto aos pormenores que se pretendiam melhorar na máquina, a nível mecânico as alterações realizadas permitiram melhorar a estabilidade desta, com a alteração da posição do redutor, só possível graças a conseguir-se medir a posição do excêntrico sem *encoder*, e ainda melhorar e facilitar o ensaio de amortecedores, com os novos apoios desenvolvidos especificamente para testar estes equipamentos. A nível electrónico conseguiu-se reduzir significativamente o ruído registado anteriormente, graças a um forte estudo deste, e dos métodos da sua minimização, tendo sido implementados vários filtros nas novas placas desenvolvidas, e seleccionados novos componentes, específicos para minimizar o ruído electrónico, para além de serem aplicadas técnicas específicas para este efeito. Outro grande objectivo alcançado foi emular o *encoder*, usando somente o sensor magnético que conta as voltas do excêntrico e uma programação adequada ao efeito. Verificou-se que os resultados finais dos ensaios onde não foi utilizado o *encoder* são mesmo melhores que aqueles onde este é usado, pelo que este aparelho deixa de ser necessário, reduzindo-se o custo da máquina, melhorando a sua estabilidade, e a qualidade dos resultados finais.

Foi desenvolvida uma aplicação informática que permite uma simples interface entre o utilizador e a máquina de ensaio de amortecedores, facilitando assim a realização de ensaios ao utilizador, que também era um grande objectivo do trabalho. Nesta, o utilizador tem somente de escolher os dados que pretende para o ensaio, clicar sobre o botão *OK*, e todo o ensaio é feito de forma automática, sendo obtidas no final as curvas *força-posição* e *força-velocidade*.

Foi ainda estudado o processo de certificação da máquina desenvolvida, que implicou analisar as normas de segurança a respeitar, realização de uma análise de risco, e de um manual do utilizador. Após este estudo, e implementação de todos os pontos abordados por este, a máquina está em condições de ser certificada e colocada no mercado, que era outro dos grandes objectivos deste trabalho.

Assim, de um modo geral, analisando os objectivos traçados para este trabalho, pode-se concluir que todos foram alcançados, conseguindo-se aperfeiçoar a máquina de ensaio de amortecedores anteriormente desenvolvida, estando pronta a ser utilizada por qualquer

preparador de suspensões e amortecedores, não necessitando este de ter grandes conhecimentos informáticos para trabalhar com esta, e podendo utilizá-la de acordo com as normas de segurança em vigor, que assegurem a segurança dos utilizadores, dos equipamentos ensaiados, do ambiente envolvente, e da própria máquina.

9.2. Sugestões para Trabalho Futuro

Ao aperfeiçoar todos os pormenores que se tinha verificado que poderiam e deveriam ser melhorados na máquina de ensaio de amortecedores, verifica-se que esta máquina está concluída, tendo ficado somente por realizar a medição da força medida pela célula de carga através de um ADC externo ao MSP (o AD7705), mas que se verificou que não é essencial ao bom funcionamento da máquina nem à perfeição dos resultados, pois com os filtros introduzidos conseguiram-se obter valores da força bastante aceitáveis. Embora isso, este é o único ponto que pode ser completado na máquina existente.

Um outro pormenor que poderá ser acrescentado à máquina existente, que não fazia parte dos objectivos do trabalho, seria medir a temperatura do óleo do amortecedor/suspensão, pois com o decorrer dos ensaios verificou-se que esta varia bastante, e tem influência directa nos resultados. Assim, poder-se-á aplicar um sensor de temperatura, que irá fornecer este parâmetro ao *PC*, ficando ligado aos resultados obtidos.

Dando por concluído o trabalho da máquina de ensaio de amortecedores, surgem novos desafios na mesma área, que podem ser apontados como trabalhos futuros.

Poder-se-á com base nos conhecimentos adquiridos de suspensões e amortecedores desenvolver um *software* que permita modelar estes equipamentos, e prever o seu comportamento, em função das alterações dos vários parâmetros, como o tipo de óleo, tipo de válvulas utilizadas, entre outros. Para tal, a máquina desenvolvida teria um papel fundamental, pois seria com esta que se iriam confrontar os resultados do *software*, permitindo criar uma base de dados de resultados ligados a ensaios realizados. O objectivo seria ter essa base de dados de resultados, de modo a que o *software* pudesse prever o comportamento do amortecedor ou suspensão, após lhe serem conferidas determinadas afinações, ou este ser equipado com determinadas válvulas, ou óleo.

Voltando à máquina para ensaiar amortecedores, esta poderá ser desenvolvida numa nova configuração, em que pode ser suprimido o sistema biela-manivela, ligando o excêntrico a uma barra transversal, que se irá deslocar em duas barras verticais (idêntico ao travessão superior da máquina desenvolvida, onde está ligada a célula de carga), e à qual estará ligado directamente o apoio inferior do amortecedor. Este sistema irá permitir reduzir ainda mais as vibrações da máquina, reduzir as dimensões desta, e ainda os custos. Permitirá ainda ter uma maior gama de cursos a ensaiar, pois podem-se escolher cursos de ensaio desde 0 [mm] até ao limite superior conferido posteriormente a este novo excêntrico. É assim uma ideia que fica em aberto, podendo-se vir a desenvolver futuramente.

9.3. Conclusão Final

Fazendo uma conclusão final a todo o trabalho, verifica-se que todos os objectivos foram alcançados, e que se conseguiu aperfeiçoar a máquina para ensaio de amortecedores e suspensões anteriormente desenvolvida, conferindo-lhe todas as características pretendidas.

Foram realizados vários ensaios com a máquina, verificando-se que todos os pormenores que anteriormente estavam menos bem foram melhorados, estando neste momento a máquina pronta a ser entregue e um profissional da área dos amortecedores, que com a prática irá certamente fornecer informações acerca do que poderá futuramente ser acrescentado.

Após concluído o trabalho, verifica-se também que a máquina desenvolvida está apta a ir para o mercado, nomeadamente para o auxílio à preparação e desenvolvimento de amortecedores. Para que possa ser comercializada terá primeiro de ser feita uma calibração à célula de carga por uma entidade reconhecida, e ser feita a certificação do equipamento. Contudo, como esse processo foi estudado neste trabalho, e feitas todas as alterações necessárias à sua certificação, é agora simples realizar este processo, estando já tudo pronto para tal.

Anexo A – Manual do Utilizador

1. Introdução

Após sentida a necessidade de um equipamento que permitisse facilmente testar suspensões e amortecedores, que fosse o mais universal possível, e que permitisse realizar ensaios a vários cursos e várias velocidades, foi desenvolvida a presente máquina.

Esta máquina tem a finalidade de ensaiar amortecedores e suspensões, tendo sido projectada para permitir o ensaio da maioria destes equipamentos, de uma forma o mais universal possível. Pode ser utilizada tanto para preparar estes equipamentos para a competição, como para verificar simplesmente as performances de equipamentos utilizados em veículos de circulação rodoviária normal. Assim, destina-se tanto a oficinas de competição, sendo utilizada por técnicos especializados na área da competição, como para oficinas de reparação normais.

Este manual do utilizador tem a finalidade de explicar ao utilizador da máquina de ensaio de amortecedores como deve trabalhar com esta, os cuidados a ter num ensaio, como interpretar os resultados obtidos, a manutenção que deve conferir à máquina, como deve reagir em caso de algum problema, entre outros.

De acordo com a Directiva Máquinas, o manual do utilizador deve indicar, no mínimo, as seguintes indicações:

- indicações previstas para a marcação, com excepção do número de série, acrescidas de indicações que permitam facilitar a manutenção;
- condições previstas de utilização;
- posto de trabalho a ocupar pelo operador;
- indicações para que a colocação em serviço, a utilização, a movimentação, a instalação, a montagem e desmontagem, a regulação e a manutenção possam ser efectuadas sem risco;
- instruções de aprendizagem, eventualmente;
- se necessário, as características dos equipamentos que podem ser montados na máquina.

O manual deve alertar para as contra indicações da utilização da máquina. Este deve ser elaborado numa das línguas comunitárias, sendo obrigatório acompanhar cada máquina na língua oficial do país onde esta é colocada em funcionamento. Nesta primeira versão, o manual será escrito unicamente em Português, cumprindo assim o exigido.

Deverão ser incluídos os desenhos e esquemas necessários para a entrada em serviço, a conservação, inspecção e verificação do bom funcionamento, e ainda da reparação da máquina, bem como todas as indicações úteis, especialmente em matéria de segurança.

Qualquer aspecto que não seja abordado neste manual, e que o utilizador tenha dúvidas, deve sempre contactar directamente o fabricante, cujo contacto é fornecido no final do manual.

2. Indicações previstas para a marcação CE

Para a utilização da marcação CE, a máquina de ensaio de amortecedores deve respeitar as exigências da Directiva Máquinas, pelo que é necessário possuir os seguintes documentos, os quais serão apresentados neste manual:

- descrição geral da máquina;
- desenho de conjunto da máquina e desenhos dos circuitos de comando, bem como as descrições e explicações pertinentes necessárias para a compreensão do funcionamento da máquina;
- desenhos de pormenor e completos, eventualmente acompanhados de notas de cálculo, resultados de ensaios, certificados, etc., que permitam verificar a conformidade da máquina com os requisitos essenciais de saúde e de segurança;
- documentação relativa à avaliação dos riscos, que deverá demonstrar o procedimento seguido e incluir uma lista dos requisitos essenciais de saúde e de segurança aplicáveis à máquina e a descrição das medidas de protecção implementadas para eliminar os perigos identificados ou reduzir os mesmos e, se for caso disso, uma indicação dos riscos residuais associados à máquina;
- normas e outras especificações técnicas que tenham sido utilizadas, acompanhadas da enumeração dos requisitos essenciais de saúde e de segurança abrangidos por essas normas;

É também necessário incluir uma chapa de características, com o nome do fabricante, e os seus dados, modelo da máquina, e ano de fabrico. Estes são apresentados na figura I.

Máquina para ensaio de amortecedores
<u>Fabricante:</u>
<u>Morada:</u>
<u>Contacto:</u>
<u>Modelo:</u>
<u>Número de série:</u>
<u>Ano de Fabrico:</u>

Figura I – Chapa de características da máquina de ensaio de amortecedores.

3. Descrição Geral da Máquina de Ensaio de Amortecedores

A máquina de ensaio de amortecedores é um equipamento desenvolvido para ensaiar amortecedores no geral, e ainda suspensões de motas, podendo ser utilizado tanto por preparadores especializados na alta competição, como por oficinas de reparação de equipamentos de utilização diária.

Esta máquina é constituída pelos seguintes equipamentos:

- um computador, onde se controlam os ensaios, e se obtêm os gráficos finais;
- uma caixa electrónica, onde são ligados todos os equipamentos electrónicos, e que fornece os dados dos ensaios ao computador;
- um motor eléctrico, que fornece o movimento a todo o sistema mecânico;
- um redutor mecânico, que converte as elevadas rotações do motor eléctrico para rotações adequadas ao ensaio de amortecedores;
- um variador electrónico de velocidade, que controla a velocidade de rotação do motor eléctrico, logo, a velocidade do ensaio;
- um sistema mecânico, constituído por um excêntrico, que liga o redutor a uma biela, permitindo ensaiar os equipamentos a vários cursos, com o aperto adequado da peça de ligação deste com essa biela, uma biela, que converte o movimento rotacional do excêntrico, num movimento linear do veio, que liga esta biela ao apoio inferior do equipamento ensaiado, e por esse mesmo veio;
- dois apoios para o amortecedor/suspensão, sendo um para ligar o equipamento a ensaiar na extremidade superior, e outro na extremidade inferior;
- uma célula de carga, que mede as forças aplicadas sobre o equipamento a ensaiar;
- um *encoder*, que mede a posição do excêntrico;
- uma estrutura de suporte a todos estes equipamentos;
- protecções do utilizador.

Esta máquina foi desenvolvida para permitir o ensaio de qualquer tipo de amortecedor ou suspensão, e ser simples de trocar os parâmetros do ensaio, como o curso e a velocidade.

Possui um software de fácil utilização, em que o utilizador tem somente de introduzir os dados do ensaio, pressionar *OK*, e todo o ensaio decorrerá automaticamente, sem qualquer outro tipo de intervenção por parte do utilizador. No final, serão obtidas as curvas *força-velocidade* e *força-posição* do amortecedor, para o curso e velocidades seleccionadas.

Está protegida com diversos dispositivos de segurança, como protecção tanto na zona de ensaio do amortecedor, como na zona de rotação (reductor e sistema mecânico), possui botão de paragem de emergência, e sensores nas portas de segurança, que abortam um ensaio caso uma destas seja aberta no decorrer deste.

3.1. Desenho de conjunto da máquina

Os desenhos de conjunto consistem nos desenhos técnicos das várias peças e elementos da máquina, pelo que serão apresentados em anexo. Estes estão apresentados no Anexo B deste trabalho.

Nestes, são apresentados os desenhos técnicos de todas as peças mecânicas projectadas e desenvolvidas para a máquina de ensaio de amortecedores, nomeadamente: excêntrico, biela inferior, biela superior (veio), peças de ligação, apoios, cilindro, e a barra superior que liga o apoio superior à estrutura da máquina.

3.2. Desenho dos circuitos de potência e de comando

O circuito de potência e o circuito de comando são representados separadamente no esquema. O circuito de potência deve ser desenhado a traço grosso, enquanto o circuito de comando deve ser desenhado a traço fino.

A designação dos aparelhos é a seguinte:

- KM – contactor de potência;
- Q – Botão de paragem de emergência ou disjuntor;
- VEV – Variador de frequência;
- FT – Filtro;
- M – Motor.

Na figura II é apresentado o circuito de potência e o circuito de comando da máquina ensaio de amortecedores. Este esquema representa um circuito para controlo de um motor assíncrono trifásico, através de um variador electrónico de velocidade (VEV), que possui um filtro na sua entrada, e com dois contactores *NO* (colocados nas portas de segurança da máquina), um botão de paragem de emergência, e ainda um disjuntor.

A protecção do circuito é feita pelos dois contactores (KM1 e KM2), que por serem *NO* (normalmente abertos), só permitem a passagem de corrente quando as portas de segurança da máquina estiverem fechadas, e por um botão de paragem de emergência (Q1), que ao ser pressionado, abre o circuito, interrompendo o funcionamento do motor. O disjuntor (Q2) é colocado para controlar a passagem de corrente (ligar ou desligar o circuito) em situações normais.

Assim, para que o motor possa ser accionado pelo VEV, ambas as portas de segurança têm de estar fechadas, o botão de paragem de emergência na posição de não bloqueio, bem como o disjuntor. Somente nesta situação as bobines do variador de velocidade são alimentadas, podendo este controlar a velocidade de rotação do motor eléctrico.

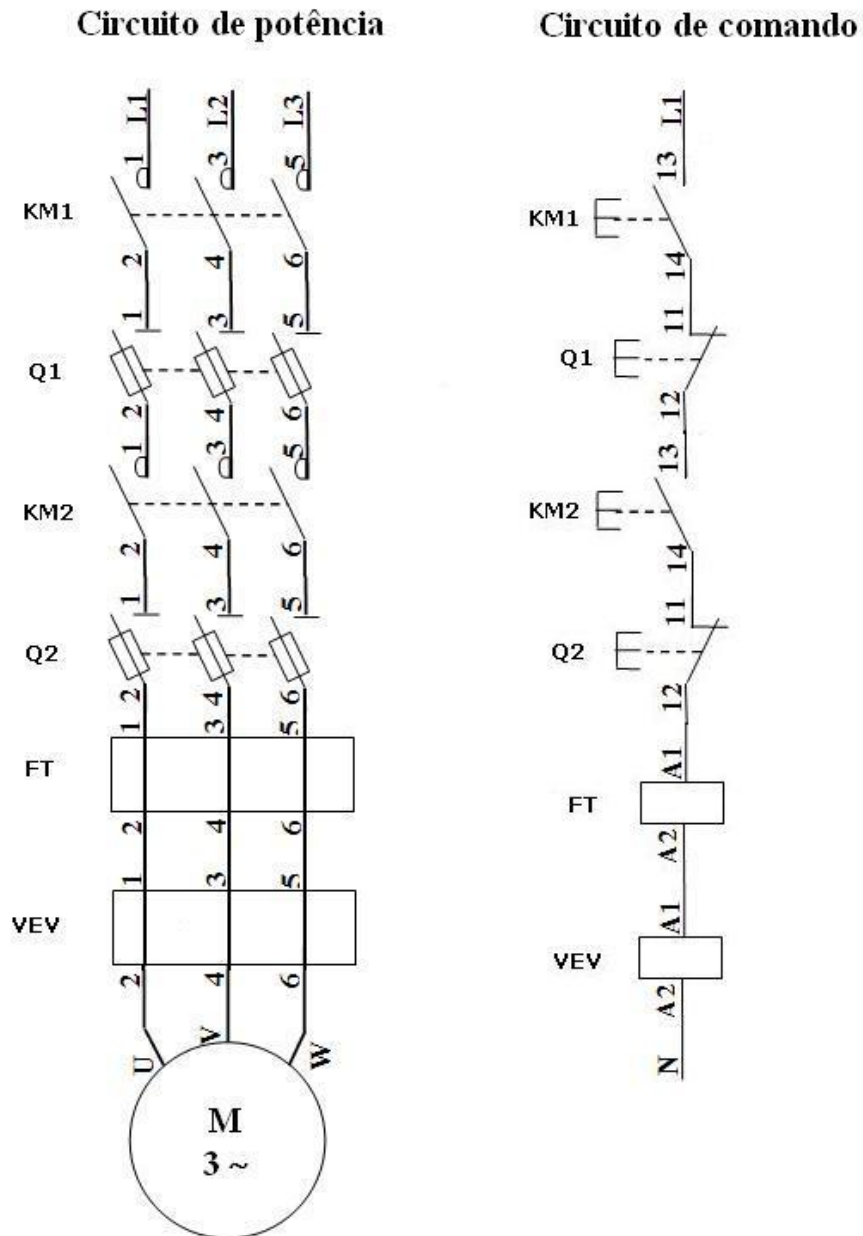


Figura II – Esquema do circuito de potência e do circuito de comando da máquina de ensaio de amortecedores.

No caso de qualquer um dos dispositivos de segurança e controlo não estar nas referidas posições, o circuito é aberto, deixando de haver passagem de corrente para o VEV, parando automaticamente o motor.

De referir que por sua vez, o VEV é controlado por um microcontrolador, que é ainda controlado por um computador, não sendo contudo esses circuitos considerados nos esquemas do circuito de potência e comando.

3.3. Desenho de pormenor

Os desenhos de pormenor consistem nos desenhos da máquina de ensaio de amortecedores, e permitem a visualização de certos aspectos que não são passíveis de análise nos desenhos de conjunto, visto nesses serem apresentadas as peças uma a uma, sendo assim somente uma complementaridade dos desenhos de pormenor.

No anexo C serão apresentados os vários desenhos de pormenor da máquina de ensaio de amortecedores, com a representação do sistema biela-manivela, estrutura da máquina, todos os componentes mecânicos montados na máquina, e finalmente a máquina de ensaio de amortecedores completa.

3.4. Avaliação do risco

Para a redução do risco, em primeiro lugar foram adoptadas medidas de prevenção intrínseca, pois estas são inerentes às características da máquina, o que não acontece com as medidas de protecção que podem falhar ou ser neutralizadas. Estas medidas consistem na eliminação dos fenómenos perigosos ou redução dos riscos através da selecção adequada de características associadas à concepção da máquina e/ou modo de interacção máquina – pessoa exposta.

Foram depois implementadas medidas de protecção, de modo a impedir o acesso das pessoas aos fenómenos perigosos. São exemplos de medidas de protecção os protectores (fixos, móveis, e reguláveis) e dispositivos de protecção (sensores). De salientar que, ao incorporar um dispositivo de segurança na máquina, para além de se verificar se as características técnicas são adequadas, procurou-se garantir que o circuito de comando associado cumpra com os requisitos de segurança.

Finalmente foi definida a informação para utilização. Minimizam-se os riscos residuais definindo instruções de utilização (procedimentos de trabalho seguros) e/ou alertando os utilizadores para estes riscos residuais através de avisos afixados sobre a máquina ou sinais acústicos e/ou visuais, que são apresentadas no computador. Por exemplo, caso uma porta de segurança esteja aberta, e o utilizador pretenda realizar um ensaio, este não será executado, e aparecerá a indicação no ecrã a avisar que essa porta está aberta.

Assim, foi realizada uma análise de risco adequada ao modo de funcionamento da máquina, e enquadrada nos limites da utilização desta, tendo sido estudadas e promovidas as alterações necessárias de modo a minimizar os riscos apresentados.

Na avaliação do risco, destacam-se as medidas de protecção contra riscos mecânicos, promovendo a estabilidade da máquina, minimizando riscos de ruptura em serviço, riscos devido a projecções de objectos, riscos devido às variações de velocidade de rotação e ainda aos elementos móveis. Quando aos riscos eléctricos, foram estudados e minimizados os riscos devidos à energia eléctrica e à electricidade estática. Foram também contemplados outros riscos, como os devidos a erros de montagem, temperaturas extremas, incêndio ou queda.

Neste manual são apresentados todos os dispositivos e equipamentos de protecção, e na descrição dos ensaios, é apresentado o modo do operador trabalhar com a máquina, de modo a minimizar todos os riscos descritos no parágrafo anterior.

3.5. Normas utilizadas

Para a máquina garantir todas as condições de segurança, foram contemplados os requisitos exigidos pela Directiva Máquinas, e ainda pela Directiva EMC. A primeiro refere-se às normas de segurança que todas as máquinas devem respeitar, com vista à segurança do operador, e da própria máquina, tendo sido com base nesta que foram colocadas as portas de segurança, botão de paragem de emergência, sensores para garantir que a máquina só trabalhe com as portas fechadas, entre outros pormenores. Com a Directiva EMC verificou-se a necessidade de aplicar um filtro adequado no variador electrónico de velocidade, visto esta directiva exigir a filtragem destes aparelhos, devido ao forte ruído por eles emitido, sob as várias componentes possíveis.

Também praticamente todo o processo de certificação foi seguido com base nestas duas Directivas, tendo sido através destas que se obteve todas as exigências que a máquina deve respeitar, e inclusivamente os pontos que este manual deve apresentar ao utilizador.

4. Condições Previstas de Utilização

A máquina foi projectada para realizar forças até um máximo de 1000 [kg.f], sendo este o limite máximo em termos de força. Em termos de velocidade de rotação, especificou-se um máximo de 230 [rpm], de modo a garantir as condições de estabilidade da máquina, e de segurança do motor eléctrico.

Aconselha-se no entanto que os ensaios, tanto quanto possível, não sejam realizados às velocidades mais elevadas, por longos períodos de tempo, sendo estas usadas ocasionalmente, e por curtos períodos de tempo (poucas voltas por velocidade ensaiada), e com um máximo de duas velocidades acima de 180 [rpm], em cada ensaio. Isto para garantir que o motor eléctrico não sofre sobreaquecimentos, por trabalhar longos períodos de tempo a frequências demasiado elevadas, realizando cargas excessivas.

Mais à frente neste manual serão apresentados os limites de utilização da máquina, onde estes pormenores serão novamente abordados e reforçados.

5. Modo de Operação

Seguidamente serão dadas as várias informações relativas ao modo de operação da máquina de ensaio de amortecedores, começando por apresentar como se liga a máquina, como se procede à selecção do curso de ensaio, como se aperta o equipamento a ensaiar, qual o posto

de trabalho do operador, durante o ensaio, e ainda a descrição de como se deve trabalhar com o *software* de controlo do ensaio. São ainda dadas indicações dos passos a seguir ao longo de um ensaio, como interpretar os resultados, e ainda como proceder em caso de emergência, para parar a máquina.

5.1. Ligação e arranque da máquina

Para começar a trabalhar com a máquina, a primeira coisa a fazer será ligar as várias fichas eléctricas à rede, ou confirmar se já estão todas devidamente ligadas. Há três fichas a ligar: a ficha do motor eléctrico, que é trifásica, a ficha da fonte de alimentação do circuito electrónico e de instrumentação, e a ficha do transformador do computador. Só após estas estarem ligadas se pode passar ao passo seguinte.

Com todos os equipamentos ligados à rede eléctrica, começam por se ligar os mesmos: para ligar o motor eléctrico acciona-se o disjuntor, e verifica-se o botão de paragem de emergência, devendo o interruptor do disjuntor estar a apontar para a posição *ON*, e o botão de emergência estar para trás, não interrompendo o circuito. A fonte de alimentação tem também um disjuntor que deverá ser accionado, colocando-se o seu interruptor para a posição *ON*. Já o computador é ligado normalmente, no botão *ligar*.

Com a parte eléctrica e electrónica ligada, antes de se proceder a qualquer ensaio, devem-se confirmar sempre se todos os principais parafusos das ligações entre elementos mecânicos estão bem apertados: entre o excêntrico e a biela inferior, entre a biela superior e o apoio inferior, entre o apoio superior e a célula de carga, entre esta e a barra horizontal, e a barra horizontal com as barras verticais.

As portas devem ser sempre devidamente fechadas antes de iniciar qualquer ensaio, de modo a proteger o utilizador de qualquer eventual acidente. A porta de protecção superior da máquina deve ser apertada à peça que a está fixa na barra vertical, através de um parafuso, impedindo que a porta se abra caso algum equipamento lhe bata de forma mais violenta. A porta de protecção inferior, é trancada com uma chave, que garante que esta também não se irá abrir mesmo com um forte impacto de algum equipamento que se possa danificar no interior da máquina.

O computador estará na tampa por cima da zona do motor, virado para o lado direito da máquina (quando vista de frente), sendo este o lado onde está também o disjuntor e o botão de paragem de emergência do motor eléctrico. Assim, o utilizador deverá estar deste lado, junto ao computador (dispositivo de comando) durante os ensaios, sendo esse o chamado “posto de trabalho”.

5.2. Selecção do curso de ensaio

Antes de montar o amortecedor ou suspensão a testar, deve começar-se sempre por definir o primeiro curso a ensaiar. Para tal, deve-se primeiro compreender como tal se efectua.

Ao olhar de frente para o excêntrico, verifica-se desde logo a existência de vários furos, como apresentado na figura III. A peça que liga a biela ao excêntrico, deve ser apertada em dois furos que definam o curso desejado. Para tal, deve-se conhecer quais os furos que correspondem a cada curso, o que é seguidamente apresentado.

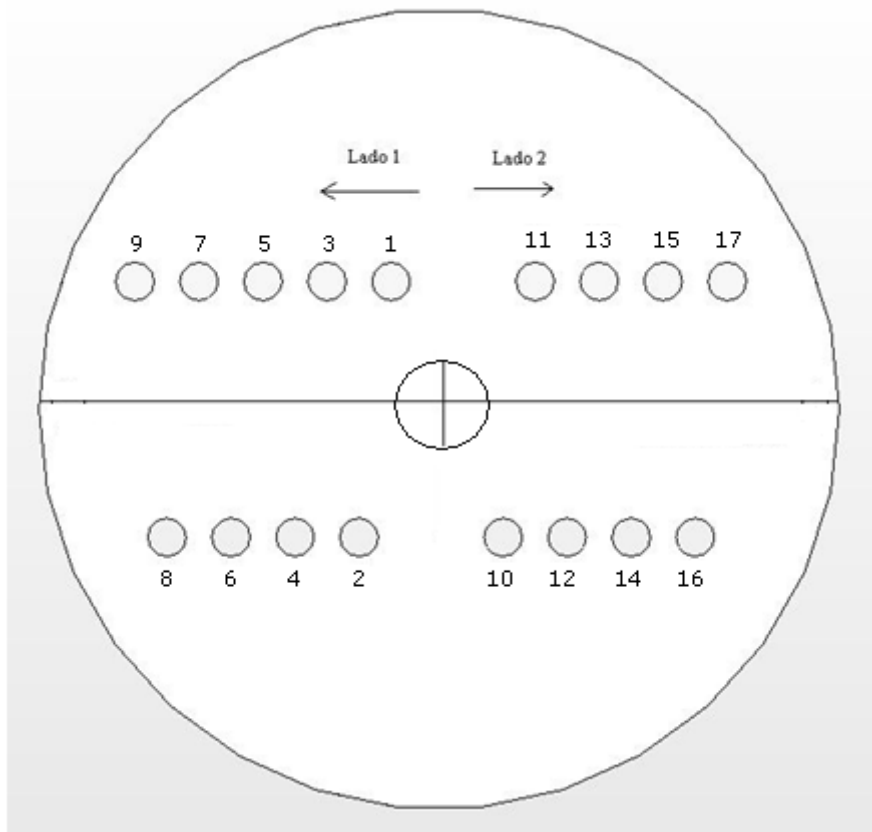


Figura III – Representação do disco excêntrico, visto de frente.

Do lado 1 (figura III) estão os furos que permitem definir cursos com o primeiro número (ou conjunto de números) par, ou seja, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 e 180 [mm]. Do lado 2 estão os furos que permitem definir os cursos de 50, 70, 90, 110, 130, 150 e 170 [mm].

Para se identificar facilmente cada lado, deve colocar-se sempre o excêntrico como representado na figura III, ou seja, a ver-se do lado esquerdo 5 furos em cima.

A selecção do curso de ensaio deve ser feita unindo dois furos, como representado na tabela I.

Tabela I – Relação dos cursos de ensaio com os furos do excêntrico.

Curso [mm]	Furos
40	1 + 2
60	2 + 3
80	3 + 4
100	4 + 5
120	5 + 6
140	6 + 7
160	7 + 8
180	8 + 9
50	10 + 11
70	11 + 12
90	12 + 13
110	13 + 14
130	14 + 15
150	15 + 16
170	16 + 17

Por exemplo: ligando os furos de cima e de baixo do lado 1, mais próximos do interior do disco (1 e 2), tem-se um curso de ensaio de 40 [mm]. Para se trocar para o curso seguinte deste lado (60 [mm]), basta desapertar o parafuso que passa no furo de cima (1), e passar a apertar a peça de ligação da biela no furo seguinte (3). Para se passar de um curso de 60 [mm] para o curso de 80 [mm], desaperta-se o parafuso de baixo (2), deslocando-se para o furo imediatamente seguinte (4).

Na parte interior da porta de segurança inferior está colado um esquema com esta tabela, e a imagem do excêntrico apresentada na figura III, para que o operador possa seleccionar o curso desejado sem ter de recorrer constantemente ao manual do utilizador.

5.3. Aplicar amortecedor / suspensão

O primeiro passo para aplicar um amortecedor ou suspensão na máquina é definir os apoios. Caso se pretenda testar um amortecedor, os apoios a aplicar são os apresentados na figura IV, enquanto que caso se pretenda ensaiar uma suspensão, são os apresentados na figura V.

Nestas figuras pode-se verificar claramente as diferenças entre os dois tipos de apoios, as quais se devem precisamente à diferença entre as ligações dos equipamentos. Mais à frente neste capítulo serão apresentados os amortecedores e suspensões, onde se apresentam também as diferenças físicas dos equipamentos, podendo-se verificar a necessidade de apoio diferentes para cada um.

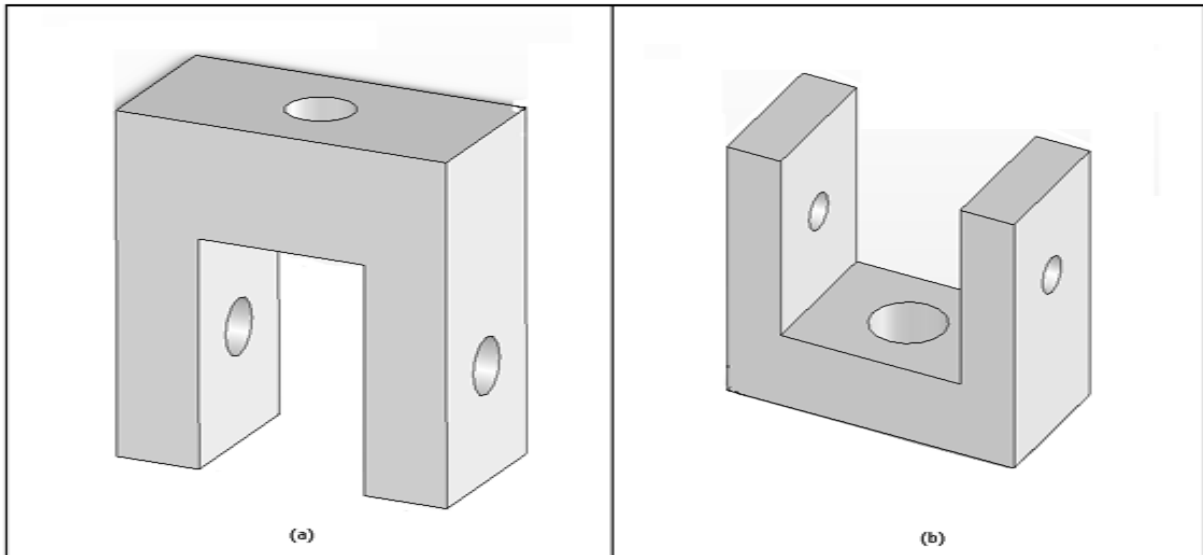


Figura IV – Representação dos apoios para ensaiar um amortecedor: (a) superior, (b) inferior.

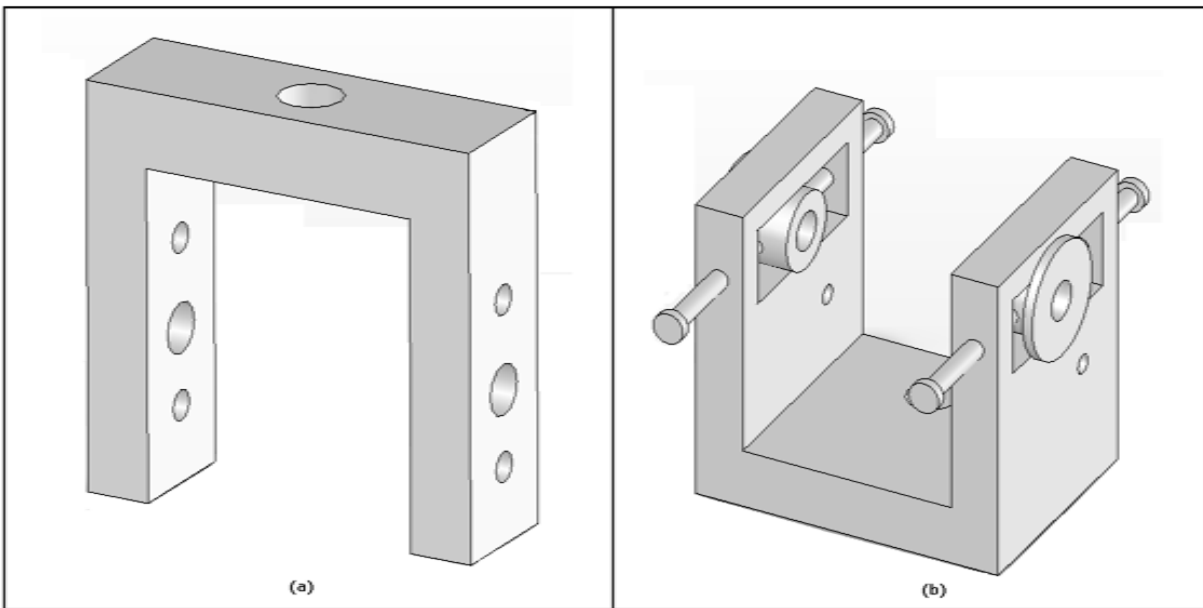


Figura V – Representação dos apoios para ensaiar uma suspensão: (a) superior, (b) inferior.

Assim, comece-se por se apresentar como se aplicam os apoios na máquina. Primeiro, aplica-se o apoio inferior, que tem um furo roscado na sua base, o qual será apertado na biela superior, que tem a ponta também roscada, e uma contra porca para permitir a fixação na posição desejada do apoio. Assim, quando o apoio estiver o mais abaixo possível, e na posição correcta (que pode ser vista na figura VI), aperta-se a contra porca e coloca-se outra porca por cima, de modo a garantir um melhor aperto, ficando o apoio como apresentado na figura VI.

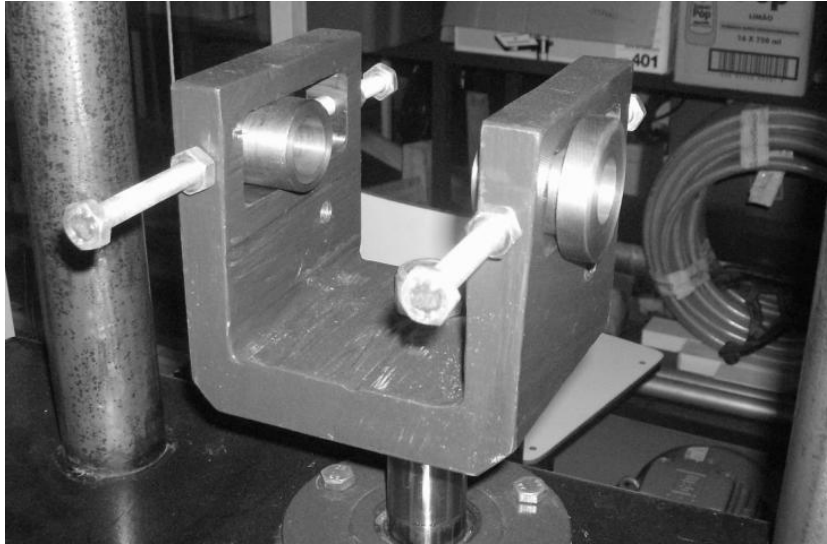


Figura VI – Apoio inferior, montado na posição adequada.

Em seguida aperta-se o apoio superior, diferindo contudo a peça de ligação, entre a célula de carga e o apoio do amortecedor, ou o apoio da suspensão. No caso do apoio do amortecedor, a peça de ligação tem uma rosca de 12 [mm] em todo o comprimento, enquanto que a peça de ligação com o apoio da suspensão tem 12 [mm] numa extremidade (a da célula de carga), e 20 [mm] na outra extremidade, que liga ao apoio. Contudo, o processo de aperto é igual ao do apoio inferior, sendo necessário somente apertar primeiro a peça de ligação à célula de carga. Depois aperta-se o apoio a essa peça, aperta-se a contra porca, e introduz-se uma nova porca na ponta solta da peça de ligação. A ligação completa é apresentada na figura VII.

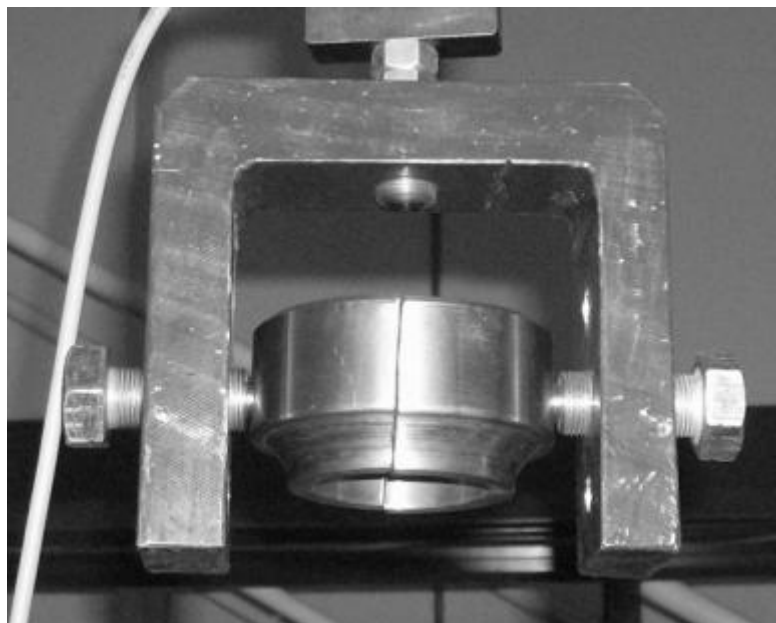


Figura VII – Apoio superior, montado na posição adequada.

Após aplicados os apoios do equipamento a testar, desloca-se a barra superior da máquina (onde está ligada a célula de carga) para a posição standard do equipamento a ensaiar: se for um amortecedor será para a posição 1, se for uma suspensão, para a posição 2 (como representado na figura VIII). Nesta fase, os parafusos desta barra devem ser ligeiramente apertados, somente para garantir que esta não se desloque até ser colocada na posição certa.

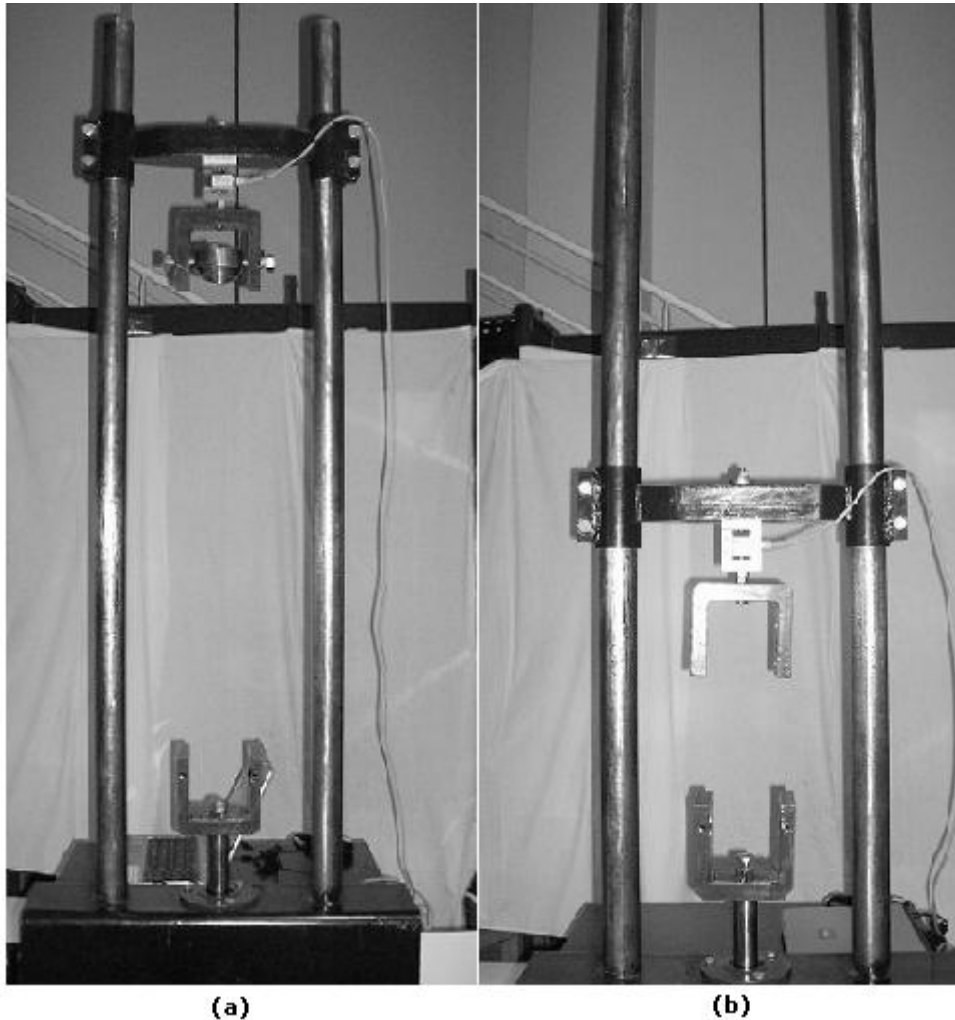


Figura VIII – Posição da barra superior: (a) 1, para ensaio de suspensão, (b) 2, para ensaio de amortecedor.

Segue-se a colocação do equipamento a ensaiar. Independentemente do equipamento e do curso a ensaiar, a biela que está ligada ao excêntrico deve ser sempre colocada na posição mais baixa, como apresentado na figura IX). Caso o equipamento a ensaiar seja um amortecedor, começa-se por se apertar este ao apoio superior, introduzindo o veio que liga o furo superior do amortecedor ao apoio, e aperta-se com a devida porca de aperto. Faz-se de seguida o mesmo no apoio inferior, ajustando a altura da barra superior da máquina, garantindo sempre que o amortecedor não é comprimido nem traccionado. Com o amortecedor apertado em ambos os apoios, a biela na posição mais abaixo do excêntrico, aperta-se bem a barra superior, se possível com uma chave de aperto calibrada, a 20 [N.m], estando concluída a aplicação do amortecedor.



Figura IX – Posição do excêntrico e da biela, para colocação do equipamento.

Caso o equipamento a ensaiar seja uma suspensão, aperta-se em primeiro lugar esta no apoio inferior, ajustando o offset com os parafusos deste apoio, de modo a o centro da suspensão coincida com o ponto a marca do apoio, como representado na figura X *a*. Depois, introduz-se o veio de ligação da suspensão com o apoio, e aperta-se com uma porca na ponta roscada. De seguida, aperta-se esta no apoio superior, colocando devidamente as peças à sua volta, e apertando os parafusos, até garantir que esta fique ao centro do apoio (figura X *b*). Ajusta-se a barra superior para a suspensão não ficar nem traccionada nem comprimida, e aperta-se como descrito para o amortecedor.

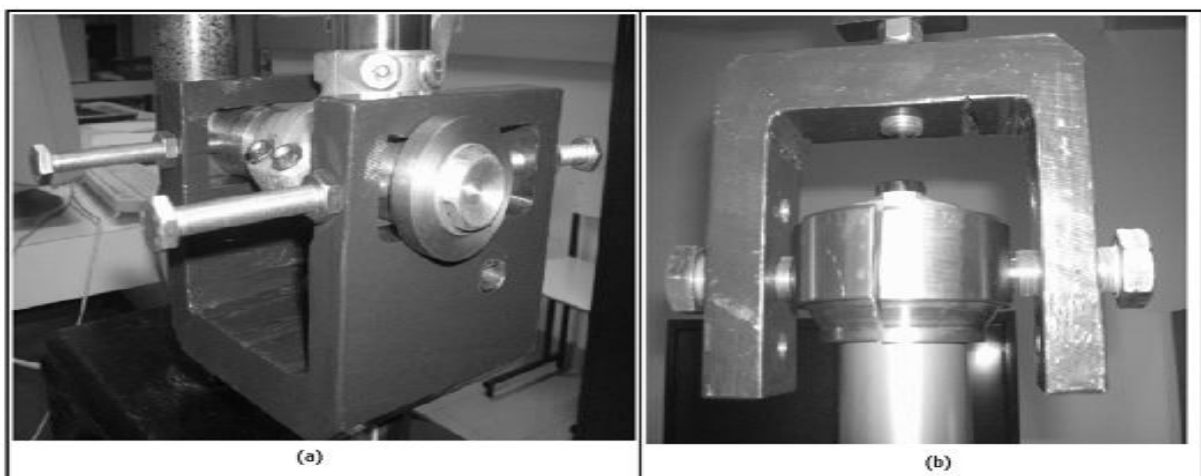


Figura X – Colocação de uma suspensão: (a) aperto no apoio inferior, (b) aperto no apoio superior.

Assim, está aplicado o equipamento a ensaiar na máquina, devendo-se sempre a seguir à sua aplicação fechar ambas as portas, apertando sempre os parafusos e fechaduras destas, de modo a garantir que, caso se parta algo, estas garantam a segurança do utilizador.

5.4. Posto de Trabalho do Operador

No início de um ensaio, o operador tem de definir o primeiro curso de ensaio, e colocar o equipamento na máquina, o que não requer um posto de trabalho. Contudo, após estas operações realizadas, o operador fecha ambas as portas de segurança, e tem uma zona própria para trabalhar, onde está colocado o computador. Na figura XI é apresentada a vermelho a posição indicada para o operador ficar, durante o ensaio.

O operador deve sentar-se num banco, ficando de frente para o ecrã do computador, e aí deve permanecer no decorrer do ensaio. Tem junto a si o botão de paragem de emergência, e ainda o disjuntor de protecção, para caso seja necessário interromper o ensaio por questões de emergência, ou por outros motivos.

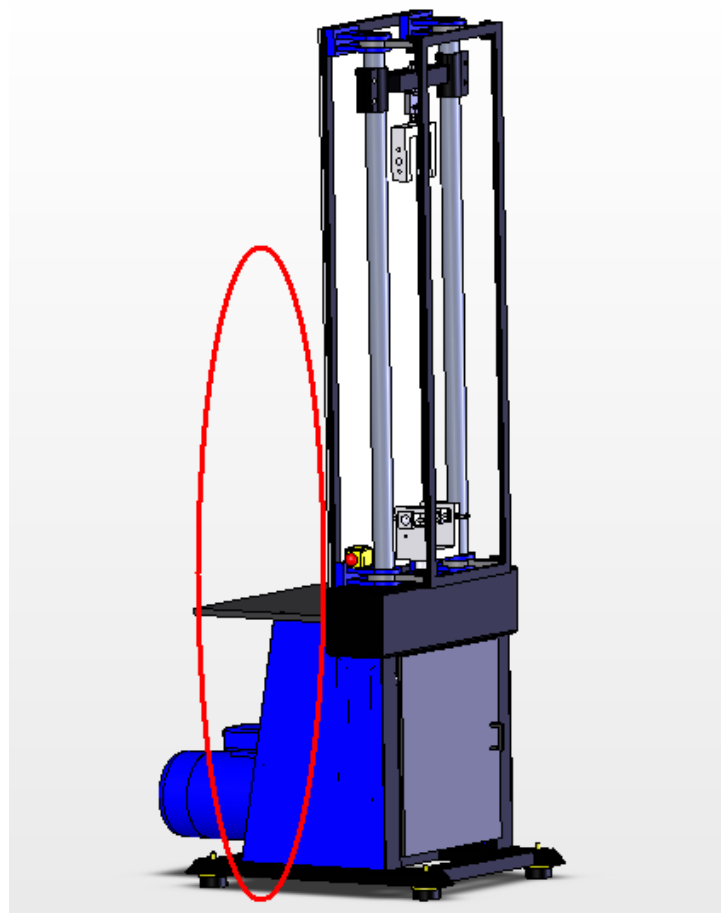


Figura XI – Indicação do posto de trabalho do operador, durante os ensaios.

Para alterar ou o curso (entre ensaios), ou o equipamento a ensaiar, o operador sai do posto de trabalho, abre uma (ou as duas) porta de segurança, e realiza a operação desejada. Após isso, para dar início a um novo ensaio, deve voltar a fechar as portas de segurança, e voltar ao posto de trabalho.

5.5. Descrição do *software* para realizar ensaios

Ao iniciar o software, a janela que vai aparecer tem o aspecto apresentado na figura XII.

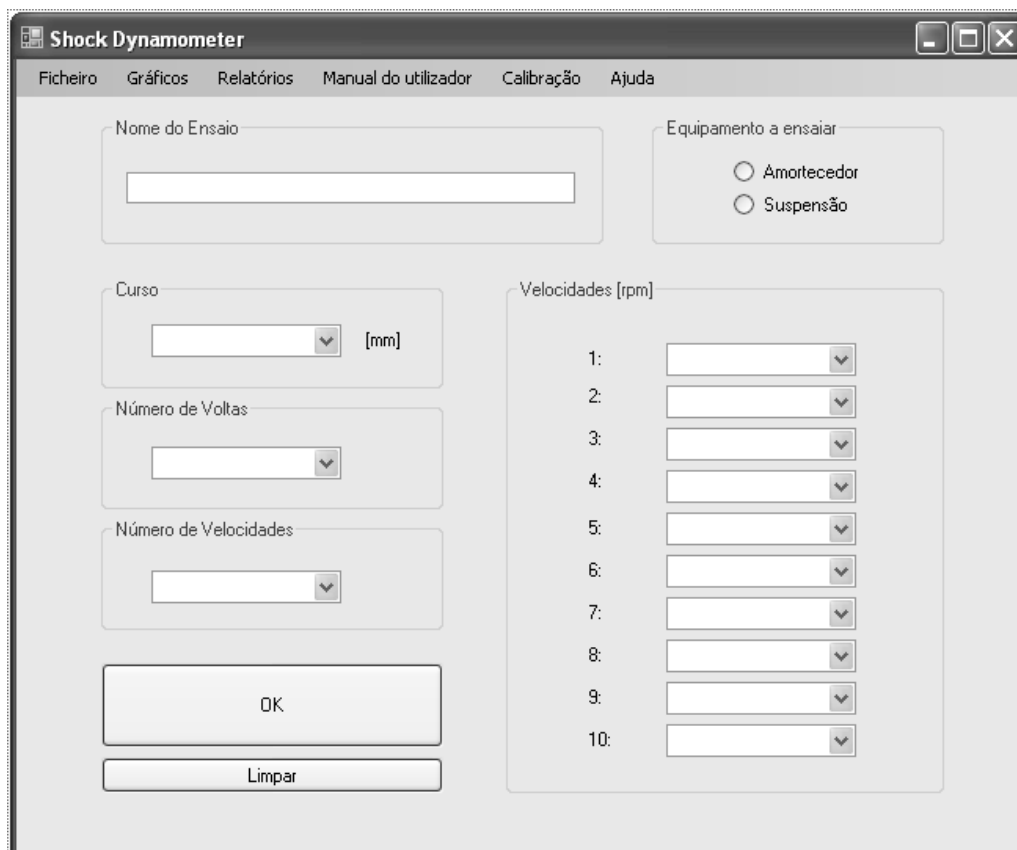


Figura XII – Janela inicial do programa, para selecção e envio dos dados do ensaio.

O utilizador deve sempre começar por introduzir o nome do ensaio, no campo com o mesmo nome. Este será o nome com o qual o ficheiro será guardado, assim que for pressionado o botão *OK*.

Após preenchido o campo com o nome, o utilizador deverá seleccionar se pretende testar um amortecedor ou uma suspensão. Este campo irá servir para introduzir também no nome do ficheiro “Suspensão” ou “Amortecedor”, pelo que no nome não é necessário referir o equipamento que está a ensaiar, mas sim somente uma referência ao ensaio.

Segue-se a selecção do curso de ensaio. Quando se preenche este campo, o utilizador já deve ter estabelecido qual o curso que vai ensaiar. Para o preenchimento do campo relativo ao

curso, o utilizador não terá de introduzir um valor, mas sim seleccionar um dos já disponibilizados, pois são todos os que a máquina pode ensaiar. Para tal, basta clicar na seta junto ao campo em branco, e aparecem os vários cursos possíveis; selecciona-se aquele que se irá testar, clicando-se sobre este, e será assim definido o curso a ensaiar. Também este valor irá ser incluído no nome do ensaio a guardar.

Selecciona-se o número de voltas de cada velocidade, ou seja, o número de voltas que se pretende que tenha cada uma das velocidades posteriormente escolhidas, sendo sempre na última volta feita a medição dos valores da força. O processo de selecção do número de voltas é idêntico ao anterior. Deve-se referir aqui que quanto mais voltas tiver cada velocidade, mais tempo demora o ensaio, pelo que mais irá aquecer o óleo do amortecedor ou suspensão a testar.

Escolhe-se depois o número de velocidades que se pretende testar, de 1 a 10, do mesmo modo como foram introduzidos os itens anteriores no programa. Assim, devem-se seleccionar de seguida as velocidades de rotação do excêntrico que se pretendem ensaiar, da primeira até à última seleccionada. O programa irá anular as velocidades para além do número de velocidades desejado.

The screenshot shows the 'Shock Dynamometer' software interface. The window title is 'Shock Dynamometer' and it has a menu bar with 'Ficheiro', 'Gráficos', 'Relatórios', 'Manual do utilizador', 'Calibração', and 'Ajuda'. The main area contains several input fields and buttons:

- Nome do Ensaio:** A text box containing 'exemplo'.
- Equipamento a ensaiar:** Two radio buttons: 'Amortecedor' (selected) and 'Suspensão'.
- Curso:** A dropdown menu showing '60' and a unit label '[mm]'.
- Número de Voltas:** A dropdown menu showing '20'.
- Número de Velocidades:** A dropdown menu showing '6'.
- Velocidades [rpm]:** A list of 10 dropdown menus, numbered 1 to 10. The values are: 1: 50, 2: 70, 3: 90, 4: 130, 5: 100, 6: 80, 7: 00, 8: 00, 9: 00, 10: 00.
- Buttons:** 'OK' and 'Limpar'.

Figura XIII – Exemplo da janela inicial do programa preenchida.

Quando todos os campos estiverem preenchidos, o botão *OK* ficará disponível, e permite dar início ao ensaio. Quando se clica neste botão, irá aparecer uma janela a perguntar ao utilizador se confirma todos os dados seleccionados, e pretende realizar o ensaio com esses dados. Caso o utilizador pressione novamente *OK*, o computador irá guardar automaticamente os dados do ensaio num ficheiro com o nome introduzido no respectivo campo, e dá início ao ensaio.

Sempre que a qualquer momento o utilizador pretenda apagar todos os campos durante o preenchimento dos dados, basta clicar no botão *Limpar*.

Assim, o aspecto da janela após preenchida é apresentado na figura XIII. Nesta é apresentado um exemplo para o caso do utilizador testar um amortecedor, testando um curso de 60 [mm], 20 voltas do excêntrico em cada velocidade, e seis velocidades, com a seguinte ordem: 50 – 70 – 90 – 130 – 100 – 80 [rpm].

Após enviados os dados, dar-se-á início ao ensaio, sendo recebidos os dados medidos e tratados pela electrónica e instrumentação da máquina, começando a ser traçados os gráficos *força-velocidade* e *força-posição* de cada uma das várias velocidades ensaiadas.

Por cada velocidade ensaiada, será traçada uma curva no gráfico *força-velocidade*, e outra no gráfico *força-posição*, tendo cada uma das velocidades uma cor diferente, sendo indicada na legenda.

Após realizada a ultima volta de cada velocidade de rotação seleccionada para ensaio, os dados das medições serão enviados para o *PC*, e aí serão tratados, de modo a obter os valores a apresentar nos gráficos. Assim, passados alguns segundos de haver alteração de uma velocidade de rotação para outra, ou de terminar a ultima velocidade, ambos os gráficos correspondentes a essa velocidade irão aparecer no ecrã do computador. Para um mesmo ensaio, os gráficos serão sobrepostos, de modo a que o utilizador veja as alterações dos valores nas diferentes velocidades, para o mesmo curso de ensaio.

Na janela de gráficos serão ainda apresentados, para além dos gráficos, os valores do curso, pré-carga, força máxima e força mínima realizadas. Esta tem também dois botões, um para terminar o ensaio, caso o utilizador pretenda abortar este, enquanto está a decorrer, e outro para, no final do ensaio, voltar ao ambiente inicial, para iniciar um novo ensaio.

O aspecto da janela de gráficos, antes de apresentados os resultados do ensaio, é apresentado na figura XIV. Nesta, tanto os campos dos gráficos como os campos dos valores atrás indicados ainda estão vazios, não se podendo assim visualizar a escala dos gráficos, por exemplo. Todas as escalas vão-se ajustar ao gráfico, pelo que só serão apresentadas em simultâneo com os respectivos gráficos.

Estão também disponíveis várias opções numa barra de menus, na parte superior da janela do programa. Estas estão divididas em 6 separadores, com os nomes *Ficheiro*, *Gráficos*, *Relatórios*, *Manual do Utilizador*, *Calibração* e *Ajuda*. Esta barra pode ser visualizada por exemplo na figura XII, na parte superior da janela.

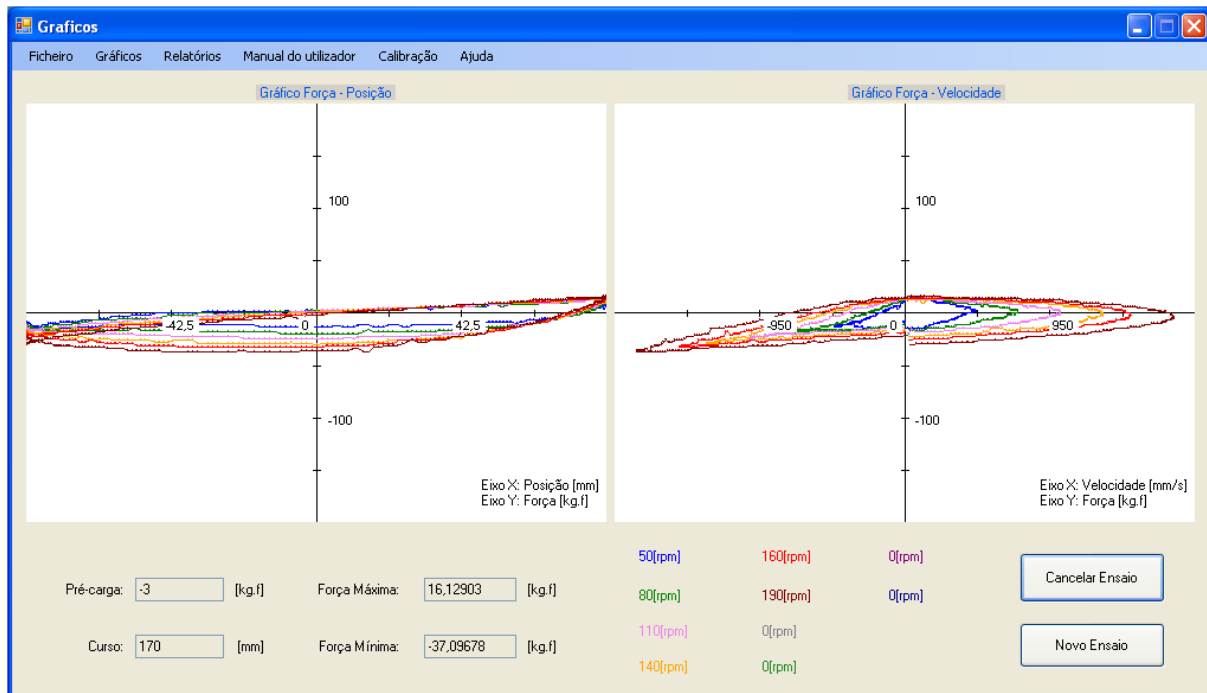


Figura XIV – Exemplo da janela com os gráficos finais de um ensaio preenchida.

A opção *Ficheiro*, quando aberta, disponibiliza ao utilizador quatro opções: *Novo*, *Abrir*, *Guardar* e *Sair*. A opção *Novo* serve para realizar um novo ensaio, e quando escolhida, verifica primeiro se houve alterações desde a última vez que o ensaio foi guardado, e caso tenha havido, pergunta ao utilizador se pretende mesmo iniciar um novo ensaio, alertando para que deve guardar primeiro os dados do ensaio em curso. A opção *Abrir* permite abrir os dados de um ensaio anteriormente realizado, num ficheiro de texto e a opção *Guardar* permite guardar os dados do ensaio num ficheiro de texto. Já a opção *Sair*, serve para fechar o programa.

Quanto ao menu *Gráficos*, este permite ao utilizador guardar e abrir gráficos. A opção *Guardar* permite guardar os gráficos finais de um ensaio num ficheiro de imagem, e a opção *Abrir* permite abrir gráficos guardados de outros ensaios.

A opção *Relatórios* tem a finalidade de, após um ensaio ter terminado, gerar o relatório desse ensaio, com os dados do ensaio (inseridos na primeira janela – nome, equipamento, curso, número de voltas por velocidade, número de velocidades e valores das velocidades), os resultados obtidos (valores da força, posição e velocidade) e gráficos obtidos.

Selecionando a opção *Manual do Utilizador*, será indicado o local onde este está guardado no computador, em formato *pdf*, para que o utilizador o possa consultar.

A opção *Calibração* permite realizar a operação de calibração da célula de carga. O procedimento está descrito mais à frente neste manual do utilizador.

Para terminar, a opção *Ajuda* permite ao utilizador obter informações do *software* e do seu fabricante, para o caso de ocorrência de algum problema, ou para esclarecer alguma dúvida relativa ao *software* ou à própria máquina.

5.6. Descrição de um ensaio completo

Na realização de um ensaio, devem sempre seguir-se os seguintes passos:

- 1º) Confirmar que as três fichas estão ligadas, como descrito em 4.2. De seguida, ligar a fonte de alimentação do circuito electrónico, e o variador de frequência, através dos seus disjuntores, confirmar que o botão de paragem de emergência está para fora, e ligar o comutador, abrindo o programa de ensaio de amortecedores;
- 2º) Seleccionar o primeiro curso que se pretende ensaiar, apertando a peça de ligação do excêntrico com a biela inferior como apresentado em 4.3. Fechar a porta inferior, trancando o fecho desta, de modo a garantir a segurança do utilizador;
- 3º) Colocar o equipamento a ensaiar, como apresentado em 4.4. Fechar a porta de protecção superior, colocando os devidos parafusos de aperto desta, que garantem a segurança do utilizador;
- 4º) Introduzir os dados do ensaio no programa computacional, como apresentado em 4.5. Premir o botão *OK* assim que estejam todos os dados correctamente introduzidos, dando início ao ensaio;
- 5º) Obtenção de resultados, e análise destes.

Para realizar um ensaio com um curso diferente, deve começar-se por se premir o botão de paragem de emergência, garantindo que o motor não irá funcionar durante a troca de curso. Depois, abrem-se ambas as portas de protecção, e seguem-se os seguintes passos:

- 1º) Colocar o excêntrico de modo a que a biela inferior esteja na posição mais abaixo deste, ou seja, no seu ponto morto inferior;
- 2º) Desapertar a peça de ligação da biela com o excêntrico, e colocá-la na posição que permita ensaiar o novo curso de ensaio, apertando-a;
- 3º) Ajustar a barra superior, de modo a que o equipamento de ensaio não esteja nem comprimido nem traccionado, quando a biela inferior está no ponto morto inferior do excêntrico;
- 4º) Fechar novamente as portas, desactivar o botão de paragem de emergência, e iniciar um novo ensaio, introduzindo novamente os dados de ensaio no programa computacional.

Para trocar o equipamento de ensaio, deve-se considerar um ensaio novo desde o início, como atrás explicado.

5.7. Interpretação de resultados

Os resultados que a máquina fornece são os gráficos *força-velocidade* e *força-posição*, estando a força apresentada em [kg.f], a posição em [mm], e a velocidade em [mm/s]. Cada gráfico final possui tantas curvas, quantas velocidades tenham sido ensaiadas, tendo cada curva uma cor diferente.

Analisando os gráficos obtidos, pode-se verificar:

- no gráfico *força-posição*, a variação da força em cada ponto do amortecedor. A força é exercida no amortecedor pelo apoio inferior, que tem um movimento linear; contudo, este movimento deriva de um movimento rotacional do excêntrico, pelo que a força não é aplicada de uma forma linear, desde o ponto morto inferior até ao ponto morto superior; há um aumento desde o ponto morto inferior até meio curso (na fase da compressão do amortecedor), e uma diminuição entre o meio curso e o ponto morto superior. O mesmo acontece na tracção do amortecedor, em que há um aumento da força entre o ponto morto superior e o meio curso, e uma diminuição entre este ponto e o ponto morto inferior. Tudo isto pode ser verificado no gráfico *força-posição*, quantificando este os valores da força, em cada ponto do veio do amortecedor.
- no gráfico *força-velocidade*, a variação da força a cada velocidade instantânea do veio do amortecedor. A principal característica de um amortecedor é que este varia a sua força em função da velocidade, quantificando este gráfico qual é essa variação, ou seja, podem-se obter a partir deste gráfico algumas rectas, cujo declive representa a constante que caracteriza o amortecedor. Contudo, devido à complexidade envolvida num amortecedor, esta constante depende de muitos aspectos, pelo que num só gráfico de uma velocidade ensaiada, conseguem-se obter várias constantes, para as várias velocidades instantâneas.

Analisando os gráficos finais de um ensaio com várias velocidades, consegue-se concluir acerca das variações da força exercida pelo amortecedor em cada velocidade, e em que ponto do seu curso é que se dá cada variação. Para conseguir perceber a que se devem as variações atrás referidas, já convém ter conhecimentos avançados do funcionamento e preparação destes equipamentos, pelo que esse assunto não será abordado neste manual.

5.8. Paragem de emergência

Quando acontece algum imprevisto, como a quebra de algum componente mecânico, ou do equipamento que se está a ensaiar, ou quando se verifica que o motor eléctrico está a embalar, ou quando a máquina não termina o ensaio, deve-se sempre accionar o dispositivo de paragem

de emergência. Este é constituído por um botão de paragem de emergência, que está situado na porta superior, como apresentado na figura XV, e deve ser pressionado para a máquina parar.

O que este dispositivo faz é cortar a alimentação ao motor eléctrico, que é a o componente que acciona todo o sistema mecânico. Este corte poderia também ser feito pelo disjuntor do motor, mas é mais recomendado e mais fácil realizar-se através do botão de paragem de emergência.

Após este botão ser pressionado, e o sistema parar, dever-se-á sempre desligar todo o sistema, ou seja, desligar as três fichas eléctricas, e voltar a ligar a máquina como se fosse a primeira vez que esta fosse trabalhar.

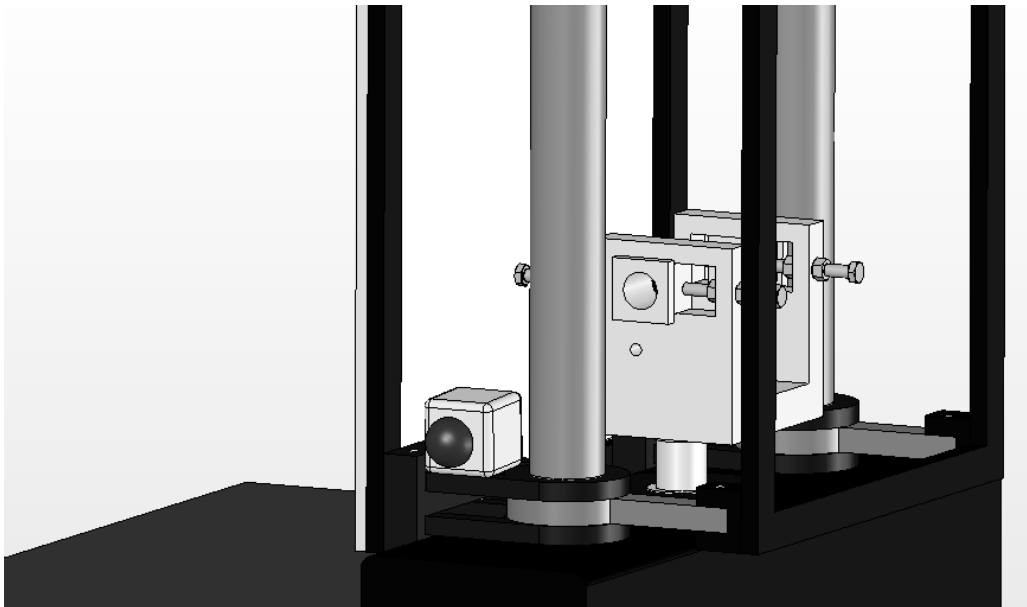


Figura XV – Botão para paragem de emergência da máquina de ensaio de amortecedores.

Caso quando se volte a ligar a máquina esta não trabalhe correctamente, deve-se contactar de imediato o fabricante, e não persistir no funcionamento desta. O contacto do fabricante pode ser visto no *software* da própria máquina, na chapa de características, ou no próprio manual do utilizador.

6. Características dos Equipamentos a Ensaiar

A máquina foi criada e desenvolvida com o objectivo de testar qualquer tipo de amortecedores (mota, carro, camião) e ainda suspensões dianteiras de motas. Com vista a cumprir esse objectivo, foram desenvolvidos apoios especiais, que permitissem ensaiar qualquer tipo destes equipamentos.

Apesar de terem formas diferentes, tanto os amortecedores (em geral) como as suspensões (de mota) funcionam por princípios hidráulicos. Tanto o tubo de pressão como o tubo reservatório contêm óleo, restando apenas uma pequena parte sem óleo, que é preenchida com ar ou com gás nitrogénio, no caso do amortecedor ser pressurizado. O que gera o amortecimento é a dificuldade de passagem do óleo através dos furos do pistão, onde se encontram válvulas responsáveis por controlar o movimento, e pela própria válvula da base que controla a passagem de óleo do tubo de pressão para o tubo reservatório.

O efeito de amortecimento está directamente associado ao diâmetro e espessura das anilhas por onde passa o óleo, as quais têm a função de oferecer resistência à passagem do óleo. Estas anilhas actuam como uma série de molas muito pequenas, que flectem para aumentar a área de passagem do óleo. Quanto maior for esta área, maior será o escoamento de óleo, e menor será o efeito de amortecimento. As primeiras anilhas por onde o óleo passa são aquelas que controlam o amortecimento a baixa velocidade; estas têm diâmetros maiores, mas espessuras mais reduzidas. O óleo flecte estas anilhas facilmente devido à sua área superficial ser maior, com uma espessura relativamente reduzida que oferece uma baixa tensão de amortecimento. A pilha de anilhas (ou válvula) tem uma forma cónica, em que as anilhas de maior diâmetro para as baixas velocidades são posicionadas mais perto do pistão, enquanto que as anilhas de menor diâmetro (mas maior espessura) para controlar as altas velocidades são colocadas o mais distante possível deste.

Podem ser assim distinguidos dois movimentos nos amortecedores e suspensões: compressão e extensão. Quando o amortecedor sofre movimentos de extensão, o óleo da câmara de tracção é forçado para baixo através dos furos existentes no pistão, após a abertura das válvulas de controlo de tracção, e passa para a câmara de compressão. Ao mesmo tempo, a haste ao ser retirada para fora do tubo, cria um espaço que deve ser preenchido pelo óleo existente na câmara reservatória. Este óleo é admitido através da válvula de admissão para dentro do tubo de pressão. A medida de resistência que o amortecedor deve fornecer ao sistema, no movimento de extensão, é determinada pela regulação da válvula de tracção. Quando o amortecedor é comprimido, o óleo da câmara de compressão deve ser forçado para a câmara de tracção por outra série de passagens após abrir a válvula do pistão. Neste movimento a haste é introduzida no tubo de pressão, ocupando um espaço na câmara de tracção. Portanto, um volume de óleo correspondente ao volume ocupado pela haste deve ser expelido de volta para o reservatório pela válvula de compressão. O controlo das válvulas funciona como na extensão. A extensão serve para limitar o curso do amortecedor.

A força produzida pelos amortecedores é proporcional à velocidade do movimento do veio, pelo que se um amortecedor for comprimido lentamente, produz uma força resistiva inferior à produzida por este no caso de ser comprimido de uma forma mais rápida.

Um amortecedor tem o aspecto apresentado na figura XVI.



Figura XVI – Representação de um amortecedor.

Este é apertado ao veículo (e também à máquina de ensaio de amortecedores) através dos seus furos inferior e superior, que por norma têm um furo de 10 [mm].

Na figura XVII é apresentado o conjunto das suspensões que são utilizadas na dianteira de uma mota, no caso, de todo-o-terreno.



Figura XVII – Representação de uma suspensão dianteira de uma mota.

Para apertar este equipamento numa mota (e também na máquina de ensaio), é usado um veio na parte inferior, e um bloco de aperto, na parte superior, como pode ser visto na explicação do aperto deste equipamento, em 5.3.

7. Manutenção da máquina

A máquina de ensaio de amortecedores, como equipamento electromecânico que é, requer operações de manutenção.

As operações de manutenção preventiva a que esta está sujeita são as seguintes:

- Lubrificação de todos os rolamentos: uma vez por semana;
- Substituição dos rolamentos da biela inferior: uma vez por ano;
- Substituição dos rolamentos do cilindro: uma vez por ano;
- Substituição do óleo do redutor: uma vez de dois em dois anos;
- Aperto dos parafusos do redutor: uma vez por semana.

Todas estas operações devem ser feitas sempre que possível pelo fabricante. Contudo, são indicados de seguida os passos a seguir nas várias operações de manutenção, bem como os elementos a substituir, caso o utilizador pretenda realizar estas operações.

7.1. Lubrificação dos rolamentos

Todos os rolamentos da máquina são de esferas, as quais estão sujeitas a cargas cíclicas, pelo que ir-se-ão desgastando com o tempo. Contudo, é possível aumentar o tempo de vida dos rolamentos caso estes sejam devidamente lubrificados.

Assim, deve-se colocar massa consistente nos rolamentos uma vez por semana, garantindo uma boa lubrificação destes, evitando o seu desgaste acentuado por falta de lubrificação, mantendo-se as suas características por um período de tempo maior.

7.2. Substituição dos rolamentos da biela inferior

A biela inferior tem dois rolamentos: um no anel superior outro no anel inferior. Ambos são rolamentos auto compensadores de esferas da FAG, modelo 2304, com as dimensões 20x52x21.

A substituição destes rolamentos deve ser feita de dois em dois anos, ou sempre que estes apresentem indícios de estar a ficar estragados, como fazer ruído excessivo, ou apresentarem folga.

Para a sua substituição, deve-se sempre começar por tirar a biela para fora da máquina. Antes de realizar tal operação, deve sempre pressionar o botão de paragem de emergência, de modo a garantir que o motor não irá arrancar por qualquer motivo. Depois de devidamente desmontada a biela, tiram-se os rolamentos usados, tendo cuidado para não estragar os furos da biela onde estes estão inseridos, e colocam-se os novos rolamentos.

Com os novos rolamentos montados na biela inferior, deve-se primeiro ligar esta à biela superior (veio), introduzir o veio de ligação entre ambas, e só depois ligar a biela inferior ao excêntrico, através da devida peça de ligação.

7.3. Substituição dos rolamentos do cilindro

O cilindro tem dois rolamentos lineares de esferas no seu interior, da marca SFERAX, modelo 4060, com as dimensões 60x72.

A substituição destes rolamentos deve ser feita de dois em dois anos, ou sempre que estes apresentem indícios de estar a ficar estragados, como fazer ruído excessivo, ou apresentarem folga.

Para a sua substituição, deve-se sempre começar por tirar ambas as bielas para fora da máquina. Antes de realizar tal operação, deve sempre pressionar o botão de paragem de emergência, de modo a garantir que o motor não irá arrancar por qualquer motivo. Depois de devidamente desmontadas as bielas, deve-se remover a parte superior do cilindro, que permite depois tirar todo o cilindro para fora da máquina. Já com este à parte, devem tirar-se com o máximo cuidado os rolamentos usados, para não estragar o furo do cilindro onde estes estão inseridos, e colocam-se os novos rolamentos.

Após feita a substituição, volta a colocar-se o cilindro no respectivo local, apertar bem a tampa superior deste, introduzir novamente as bielas, e garantir que tudo ficou bem montado.

7.4. Substituição do óleo do redutor

O óleo do redutor também deve ser substituído num intervalo de dois em dois anos, sendo o óleo recomendado pelo fabricante da marca SHELL, do tipo Tivela Oil S 150. A quantidade a introduzir é de 4 litros.

Para realizar a substituição do óleo, deve-se em primeiro lugar pressionar o botão de paragem de emergência da máquina, de modo a garantir que esta não entra em funcionamento durante a operação de mudança de óleo. Depois, tiram-se as tampas laterais da máquina, e do lado esquerdo do redutor (visto da parte de trás da máquina), encontra-se o bujão de remoção do óleo, na parte inferior do redutor. Desaperta-se este bujão, e retira-se todo o óleo para um recipiente de óleo usado. Deve deixar-se escorrer o óleo durante uma hora, de modo a sair a máxima quantidade.

Depois de tirado o óleo usado, volta a introduzir-se o bujão de saída de óleo, aperta-se bem, tira-se o bujão de entrada de óleo, que está no cimo do redutor, e introduz-se a quantidade de óleo recomendada pelo fabricante, ou seja, 4 litros, com um funil adequado.

Quando tiver sido inserido o óleo, aperta-se o bujão de entrada de óleo, colocam-se as tampas laterais e desactiva-se o botão de paragem de emergência, estando a máquina pronta a funcionar.

7.5. Aperto dos parafusos do redutor

Periodicamente devem-se apertar os parafusos que apertam o redutor à estrutura da máquina. Para tal tira-se a tampa da traseira da máquina, e com uma chave calibrada deve-se apertar estes parafusos com uma carga de 20 [N.m].

Esta operação deve ser realizada uma vez por mês, de modo a garantir o aperto destes parafusos.

8. Calibração

Para calibrar a célula de carga, é necessário aplicar cargas conhecidas nesta, pelo que uma correcta calibração deve ser sempre feita por um laboratório acreditado e competente. A célula de carga deve ser calibrada nos espaços de tempo definidos pela entidade certificadora (CERTIF), que normalmente será uma vez por ano, ou uma vez de dois em dois anos.

Sob o ponto de vista do utilizador, este tem no programa computacional, na barra de menus, a opção *Calibração*, que ao ser seleccionada, permite abrir a janela de *Calibração da célula de carga*. Esta janela tem um campo de preenchimento, um botão *OK*, um botão *Cancelar*, e um botão *Terminar calibração*, como apresentado na figura XVIII.

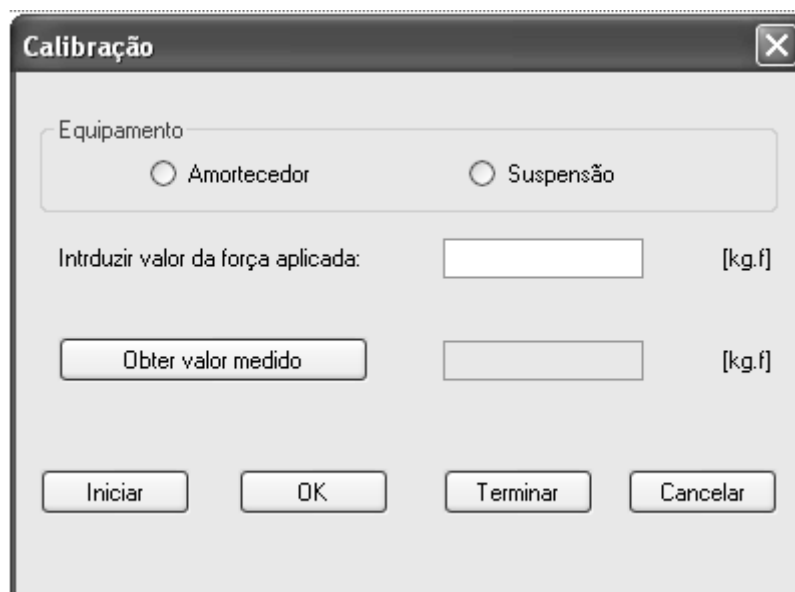


Figura XVIII – Janela de calibração do programa, para calibrar a célula de carga.

O processo de calibração é feito da seguinte forma:

- Em primeiro lugar, de referir que para realizar a calibração da célula de carga, não se deve estar a realizar nenhum ensaio em paralelo, sendo este um processo independente do funcionamento normal da máquina. Porventura, poder-se-á realizar com a célula de carga fora da máquina;
- O utilizador deve começar por seleccionar a opção *Calibração da célula de carga*, na barra de menus;
- Ao ser aberta a janela da calibração, deve-se em primeiro lugar seleccionar o equipamento (deve-se calibrar sempre para os dois, mas um de cada vez), e pressionar depois o botão iniciar;
- De seguida, aplica-se uma carga conhecida na célula de carga;
- No campo de preenchimento deve-se colocar o valor da força aplicada à célula de carga, em [kg.f], e pressionar depois o botão *Obter valor medido*. Ao aparecer o valor medido, deve-se de seguida pressionar o botão *OK*. Os valores são guardados, ficando os campos da força aplicada e do valor medido novamente limpos;
- Aplica-se uma nova carga à célula de carga, e repete-se novamente o processo atrás descrito, até o número de forças ensaiadas ser considerável (na ordem de 20 valores à tracção e 20 à compressão). Sugere-se que as cargas sejam aplicadas de 50 em 50 [kg], entre 50 e 1000 [kg], se possível, e que sejam do tipo à tracção e à compressão (obrigatório);
- No final, pressiona-se o botão *Terminar calibração*.

Depois, o computador irá adequar os valores introduzidos com os valores medidos, ficando assim calibrada a célula de carga.

Caso nalgum instante o utilizador pretenda cancelar o processo de calibração, basta pressionar o botão *Cancelar*.

Devido à importância desta operação, dependendo dela os resultados das forças apresentadas, aconselha-se o utilizador para que, sempre que possível, realize esta operação anualmente, ou de dois em dois anos no máximo, independentemente do prazo estabelecido pela entidade certificadora.

9. Transporte da máquina

Para se transportar a máquina, recomenda-se que seja usado um empilhador, colocando cuidadosamente as garras por baixo da máquina, virado de frente para esta, elevando-a a 20 [cm] do chão, e deslocando-se cuidadosamente para esta não cair.

Não esquecer de desligar as três fichas, e tirar o computador da máquina, de modo a evitar danos neste.

10. Limites de utilização

Todo o sistema mecânico da máquina é accionado por um motor eléctrico, o qual é controlado por um variador electrónico de velocidade (VEV), que controla a velocidade do motor através da frequência deste. Ou seja, quando um utilizador está a escolher uma velocidade de rotação do excêntrico, está no fundo a definir a frequência que a que o VEV faz o motor girar.

Contudo, o motor eléctrico tem limites de frequências de trabalho, pois tanto para elevadas frequências como para muito baixas frequências, o binário por ele realizado é muito menor que o binário nominal, não devendo por isso ser submetido a essas frequências por períodos de tempo relativamente elevados (superiores a 5 minutos, por exemplo).

É devido a isso que a velocidade mínima de ensaio é igual a 40 [rpm], e a máxima igual a 225 [rpm], não sendo aconselhado trabalhar próximo destes limites frequentemente.

Devido às características do motor utilizado na máquina de ensaio de amortecedores, recomenda-se que se trabalhe a velocidades de rotação mais próximas de 120 [rpm], preferencialmente entre 70 e 170 [rpm].

As consequências de não respeitar este conselho são o sobreaquecimento a que o motor estará sujeito, podendo mesmo queimar; apesar de a probabilidade ser pequena, não é aconselhável arriscar.

Outra desvantagem de se trabalhar a velocidades demasiado elevadas, com muita frequência, e por períodos de tempo relativamente elevados, é a vibração da máquina, que é considerável, são os esforços a que todos os componentes mecânicos estão sujeitos, e o desgaste dos rolamentos que é assim mais acelerado do que se a máquina trabalhar com velocidades de acordo com as atrás recomendadas.

Outro limite de utilização a respeitar é o do curso de ensaio. O excêntrico permite testar cursos entre 40 e 180 [mm]. Contudo, os cursos variam de equipamento para equipamento, devendo-se medir o curso máximo de cada equipamento, antes de se colocar este na máquina, e respeitar sempre esse limite, pois caso contrário a probabilidade de danificar o aparelho é muito elevada, o que pode provocar danos inclusivamente na máquina.

Anexo B – Desenhos de conjunto

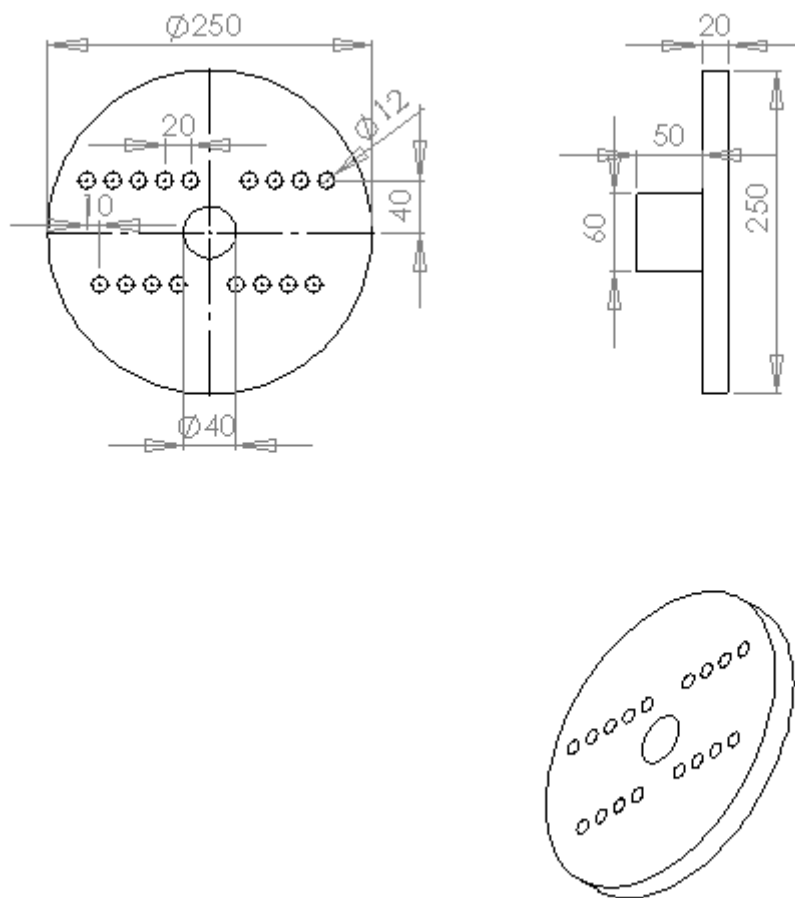


Figura XIX – Projecção do disco excêntrico.

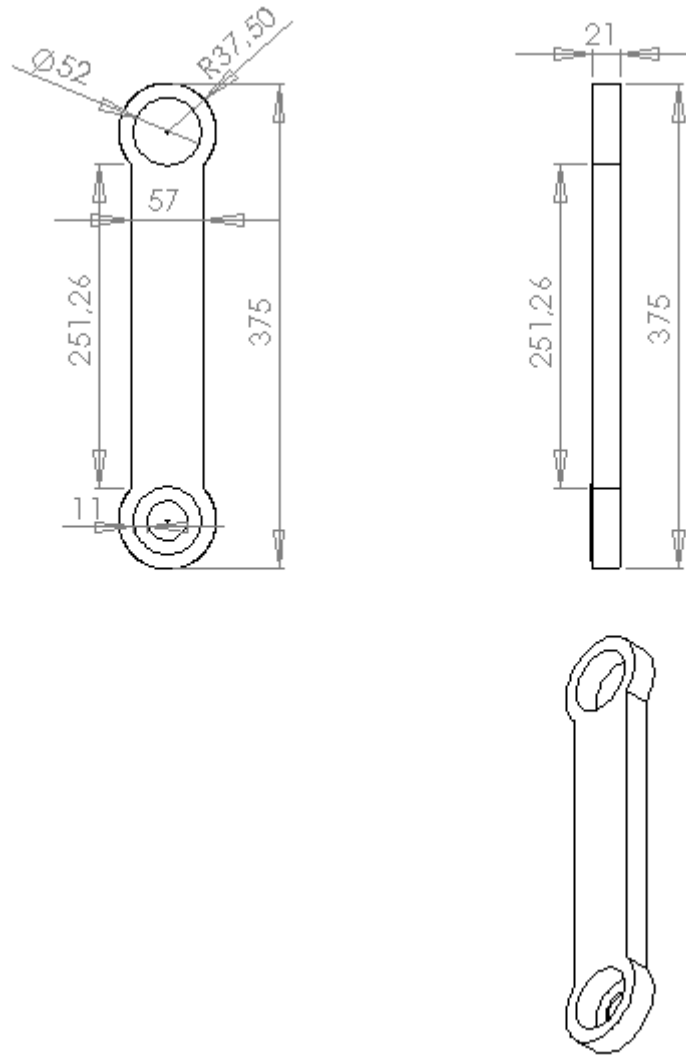


Figura XX – Projecção da biela inferior.

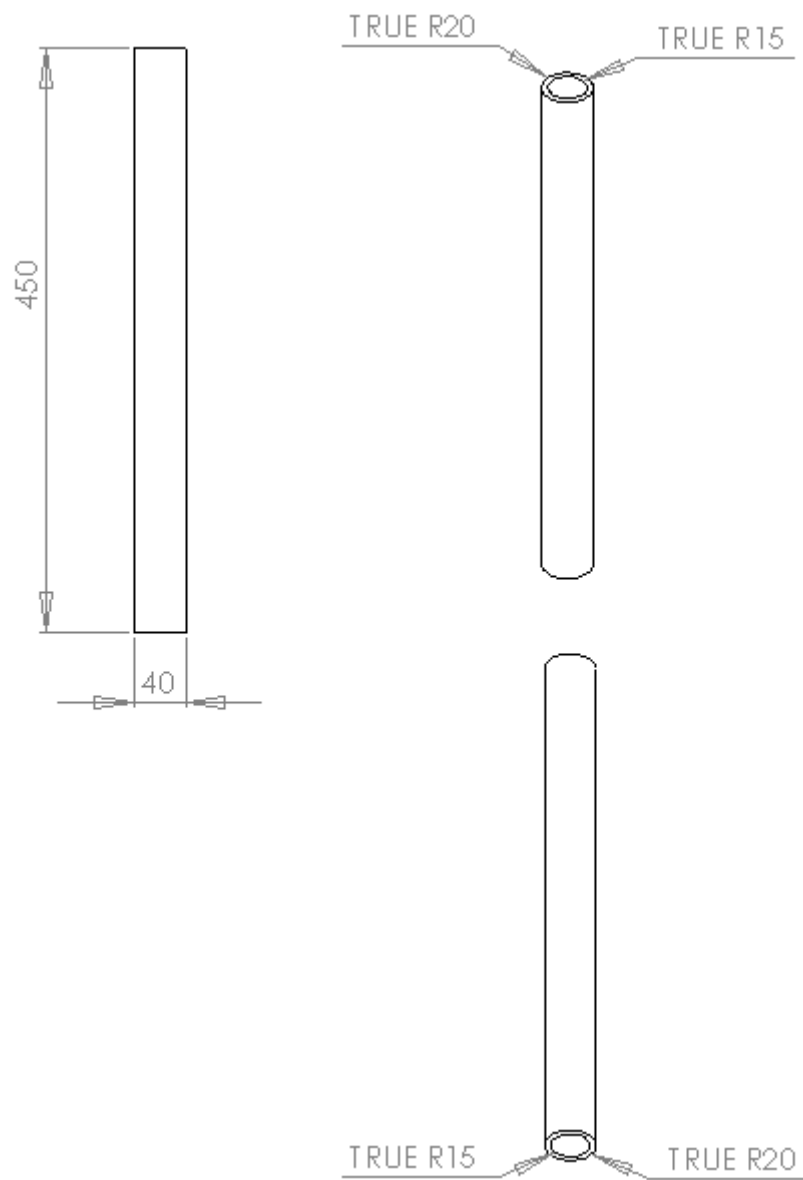


Figura XXI – Projecção da biela superior (veio).

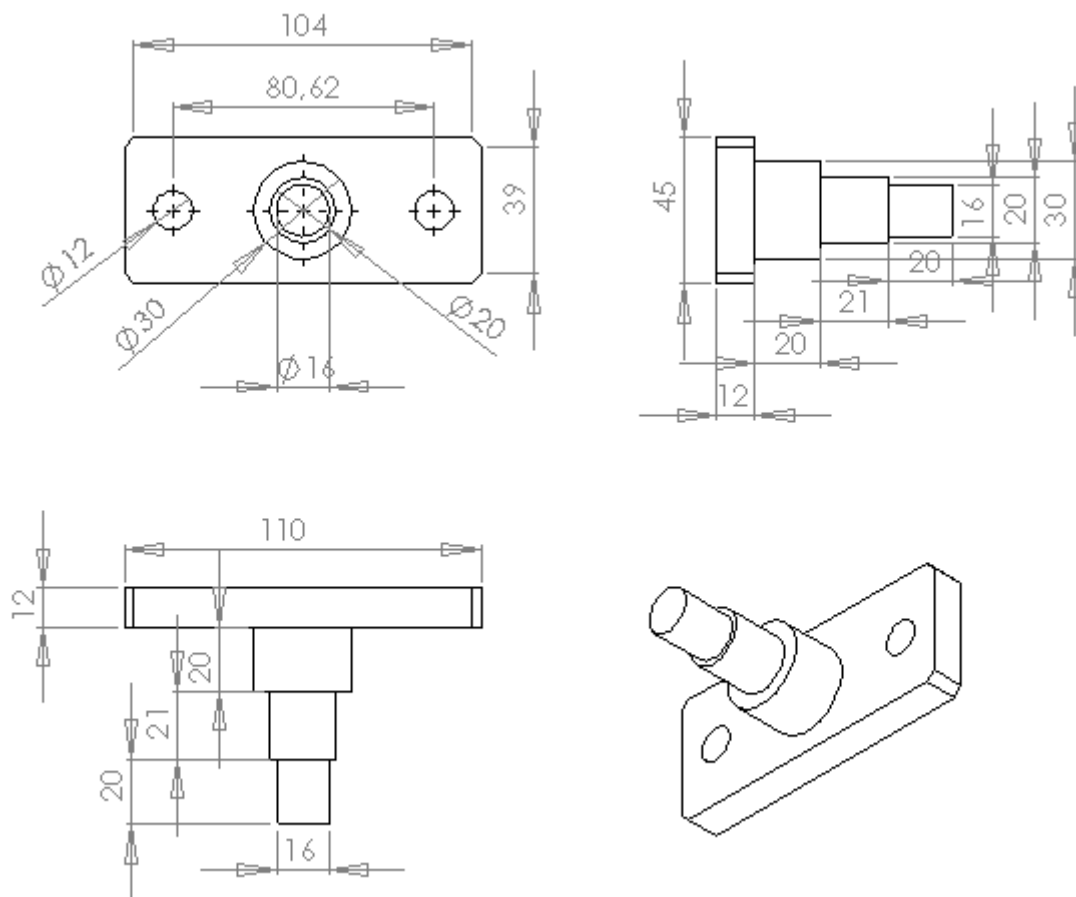


Figura XXII – Projecção da peça de ligação do excêntrico com a biela inferior.

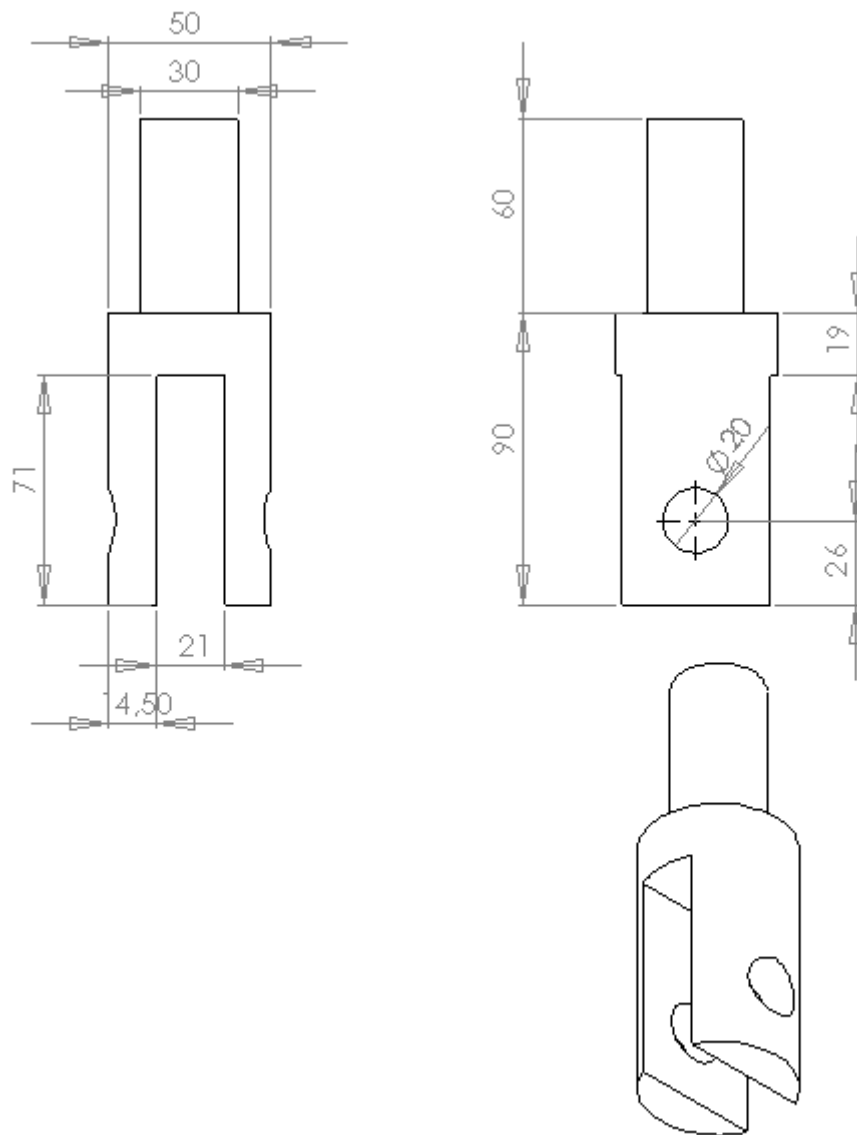


Figura XXIII – Projecção da peça de ligação das bielas inferior e superior.

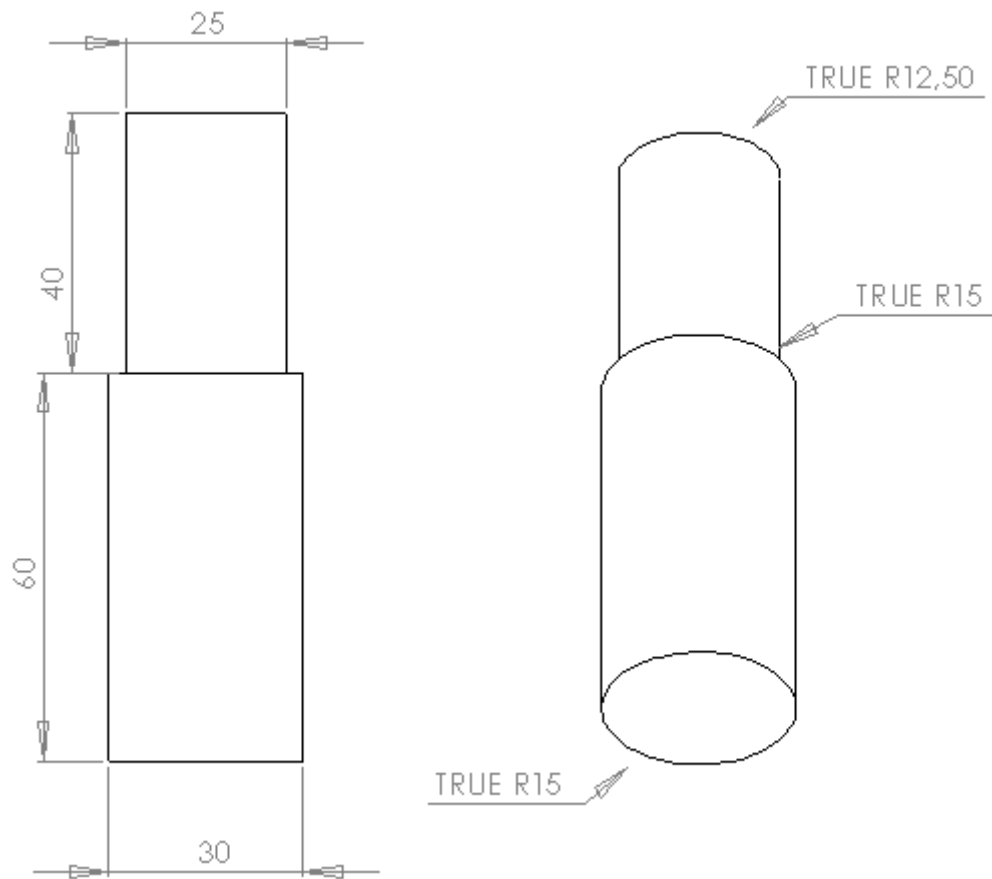


Figura XXIV – Projecção da peça de ligação da biela superior (veio) com o apoio inferior.

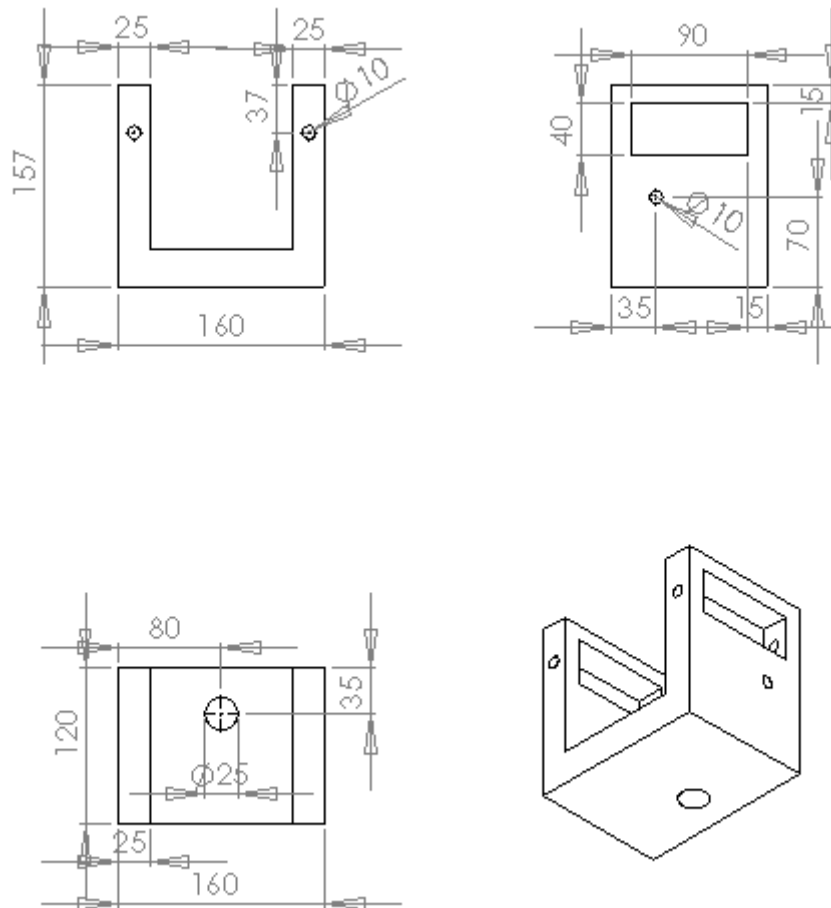


Figura XXV – Projecção do apoio inferior da suspensão.

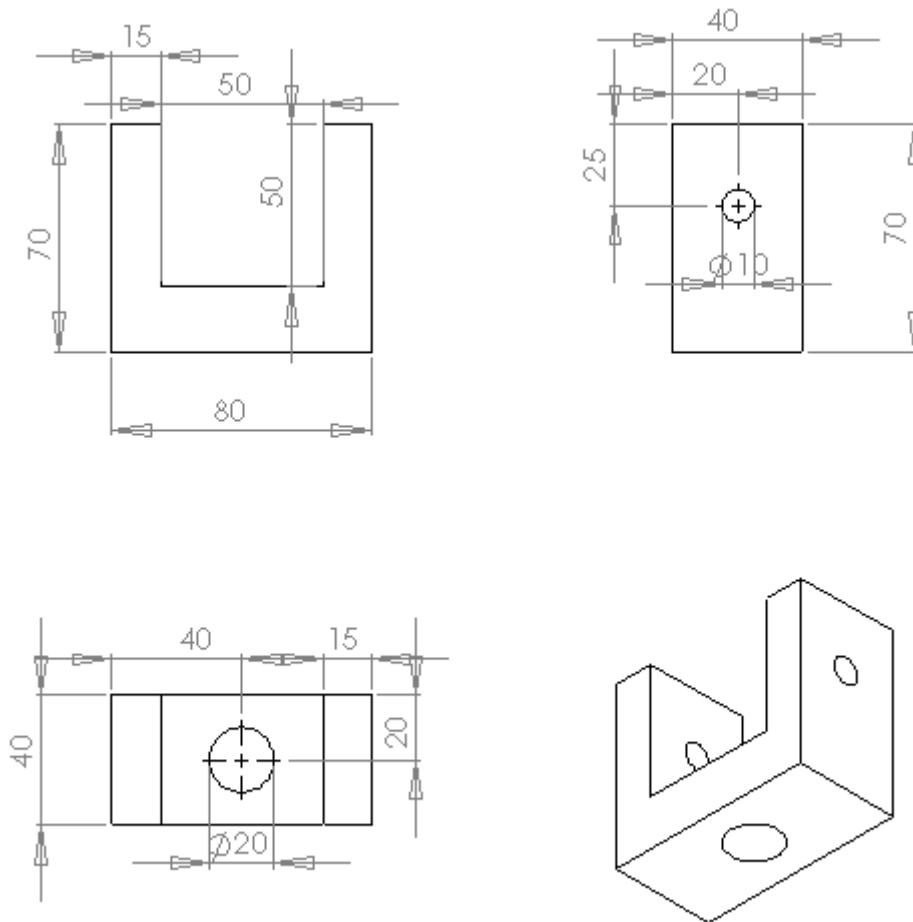


Figura XXVI – Projecção do apoio inferior do amortecedor.

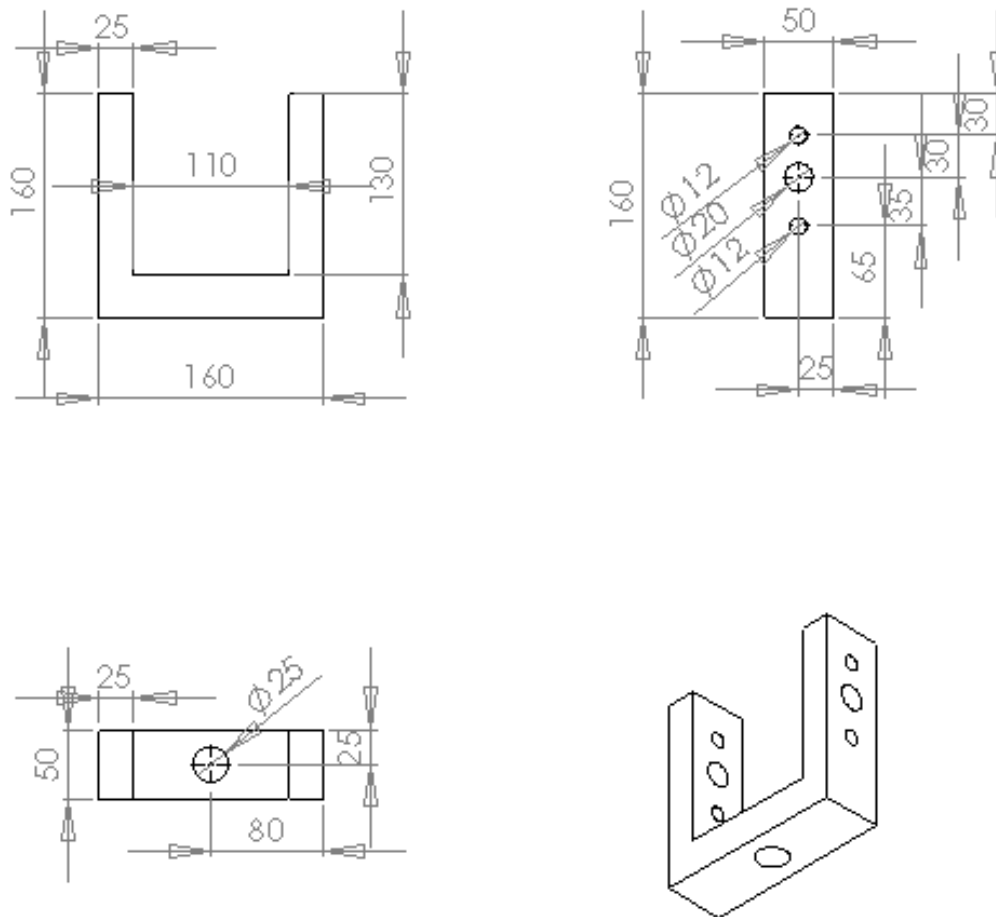


Figura XXVII – Projecção do apoio superior da suspensão.

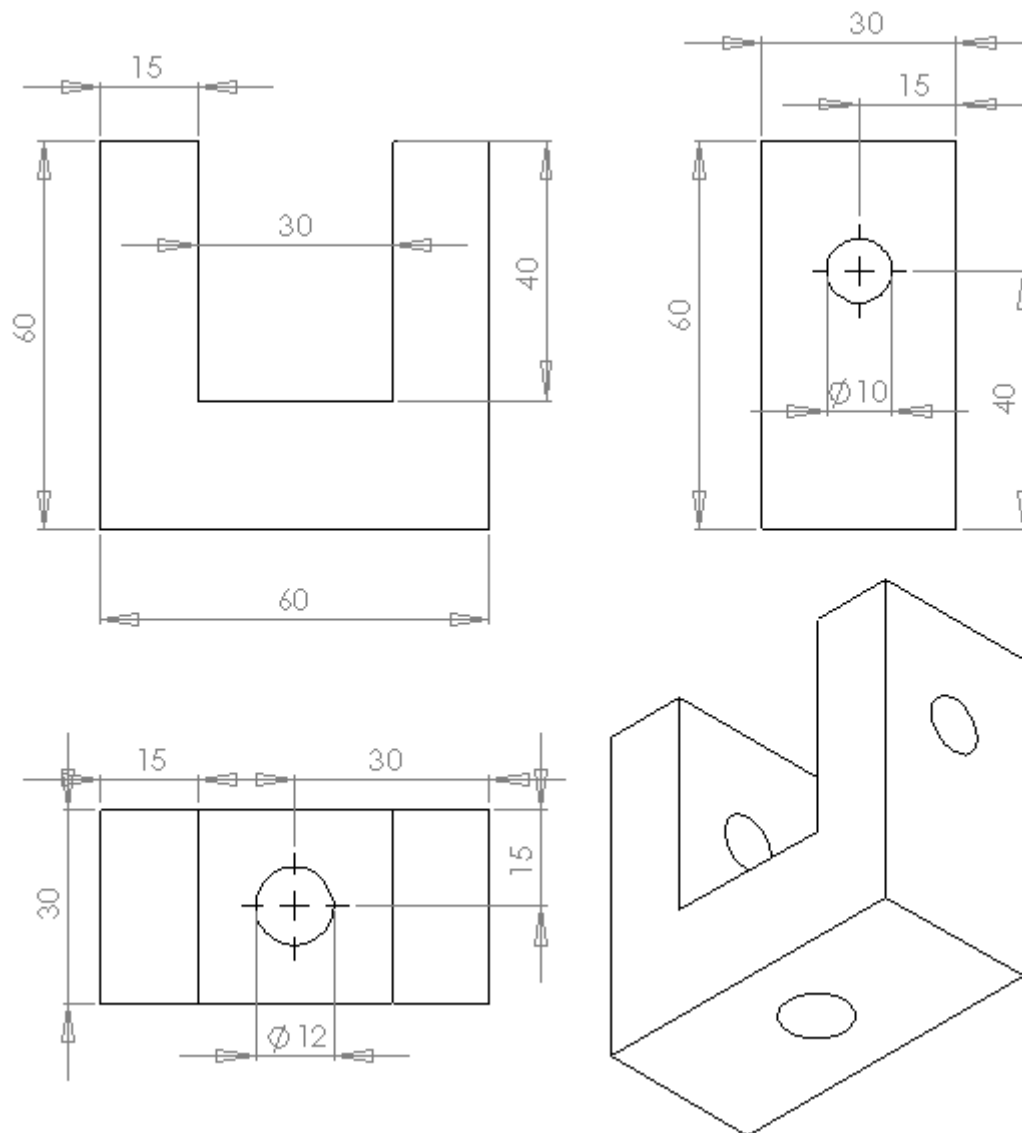


Figura XXVIII – Projecção do apoio superior do amortecedor.

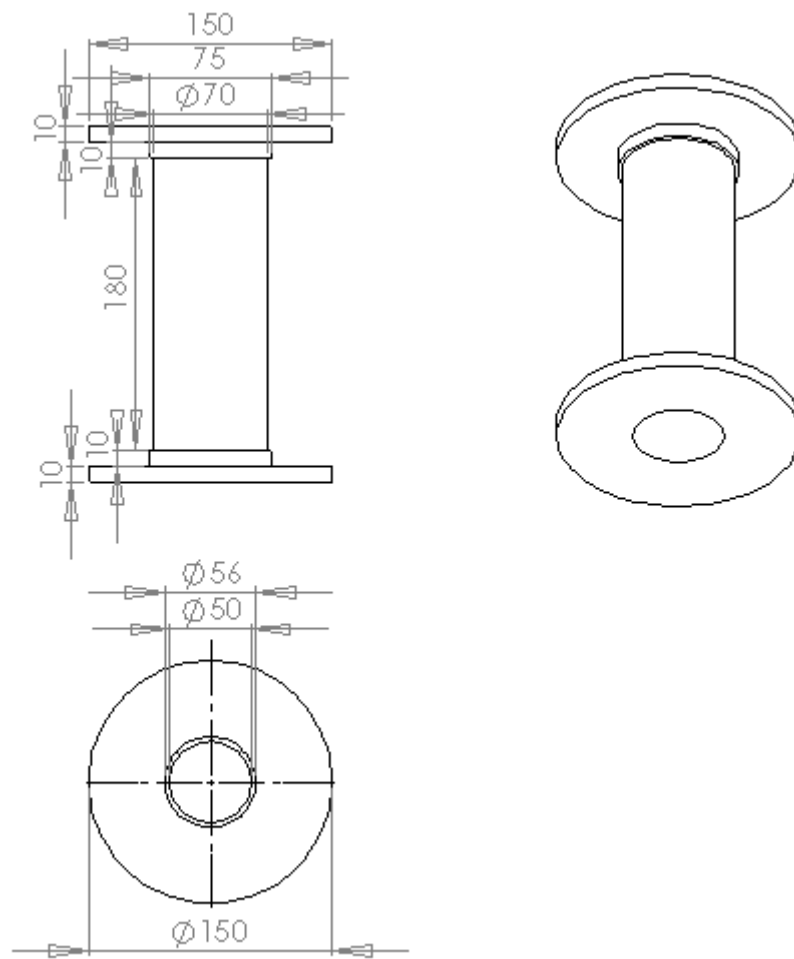


Figura XXIX – Projecção do cilindro.

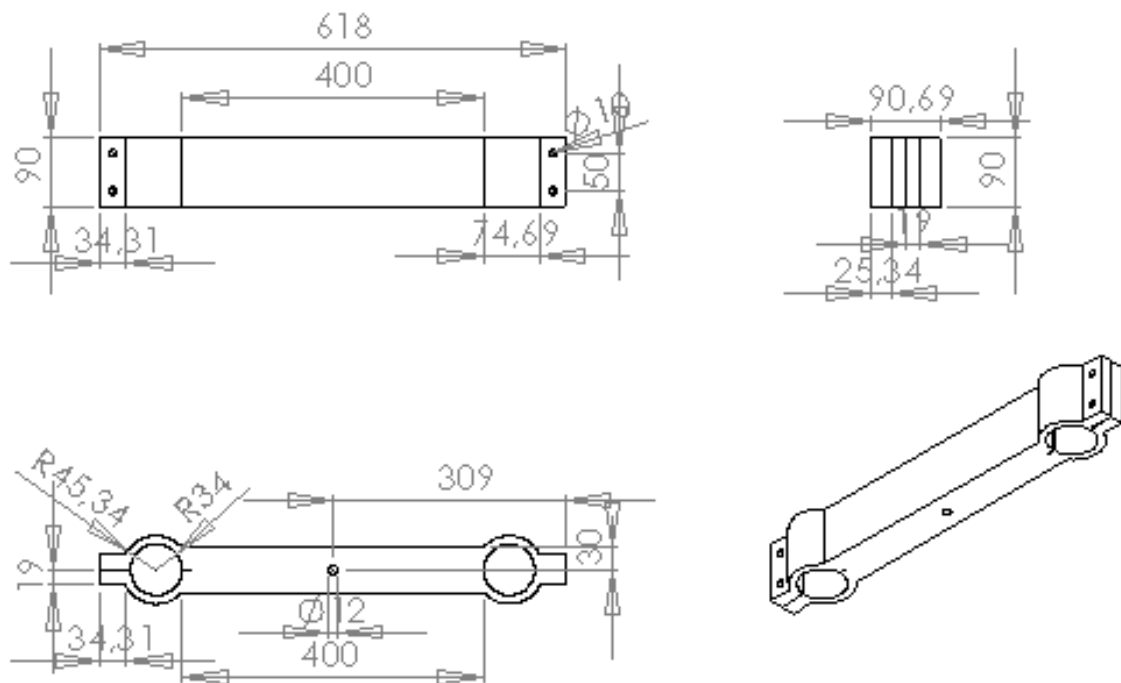


Figura XXX – Projecção da barra superior.

Anexo C – Desenhos de pormenor

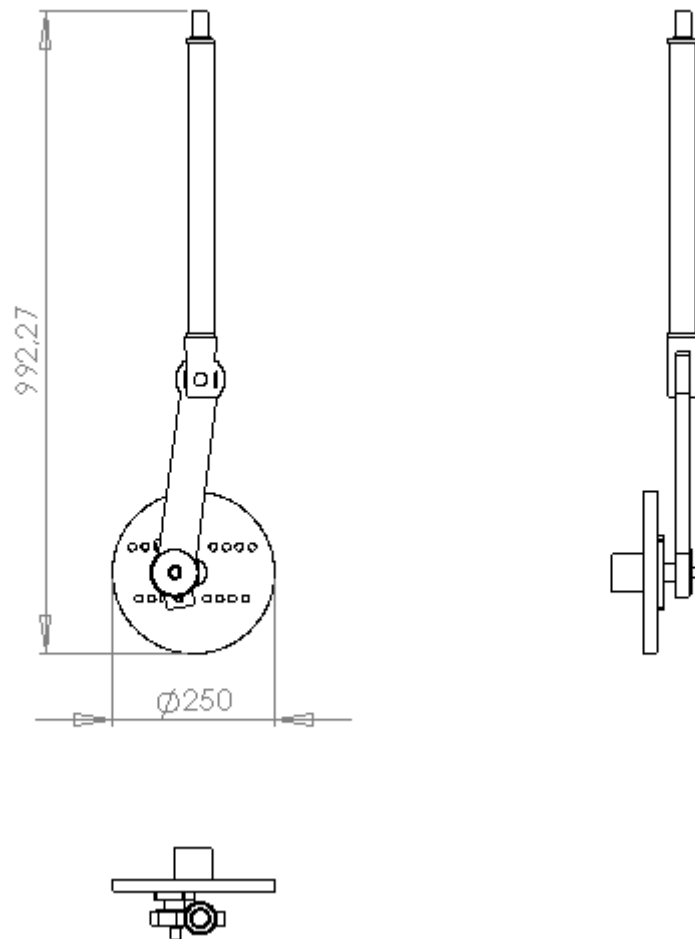


Figura XXXI – Desenho de pormenor do sistema biela-manivela.

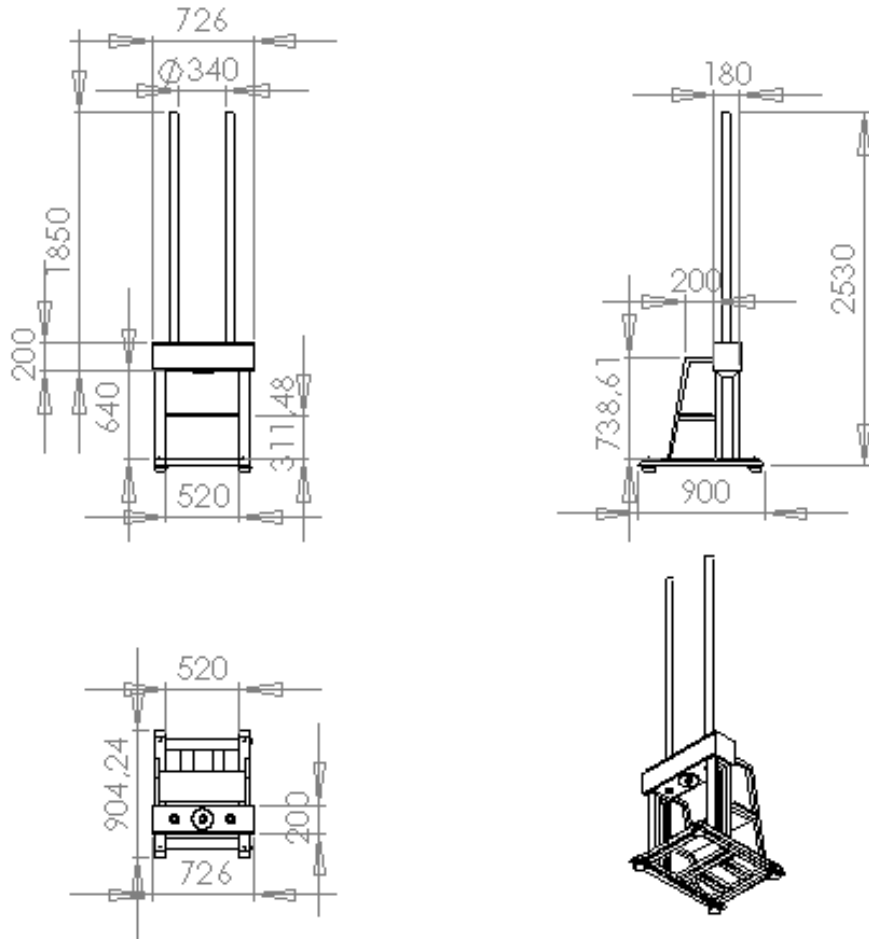


Figura XXXII – Desenho de pormenor da estrutura da máquina.

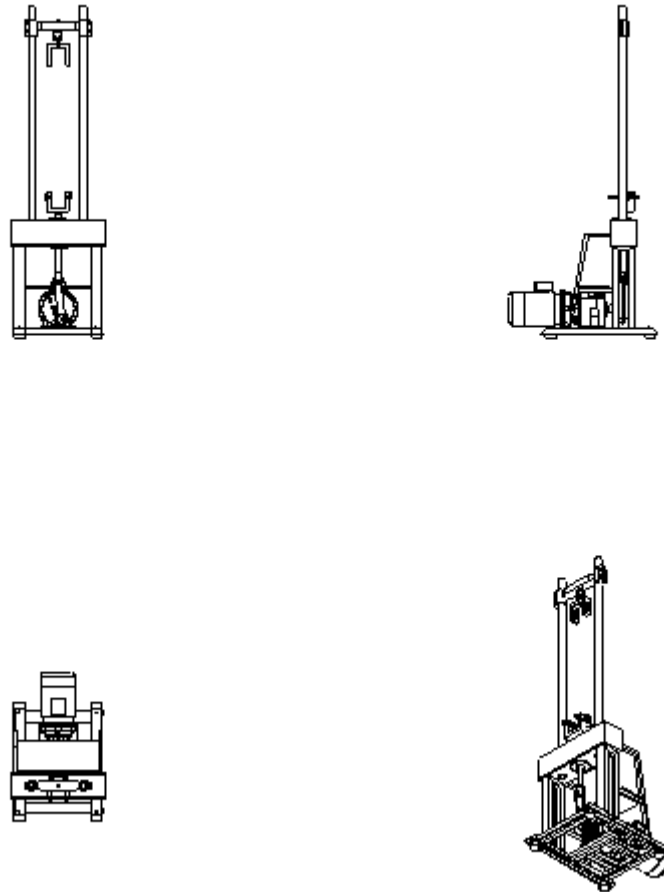


Figura XXXIII – Desenho de pormenor da máquina, com todos os componentes montados na estrutura.

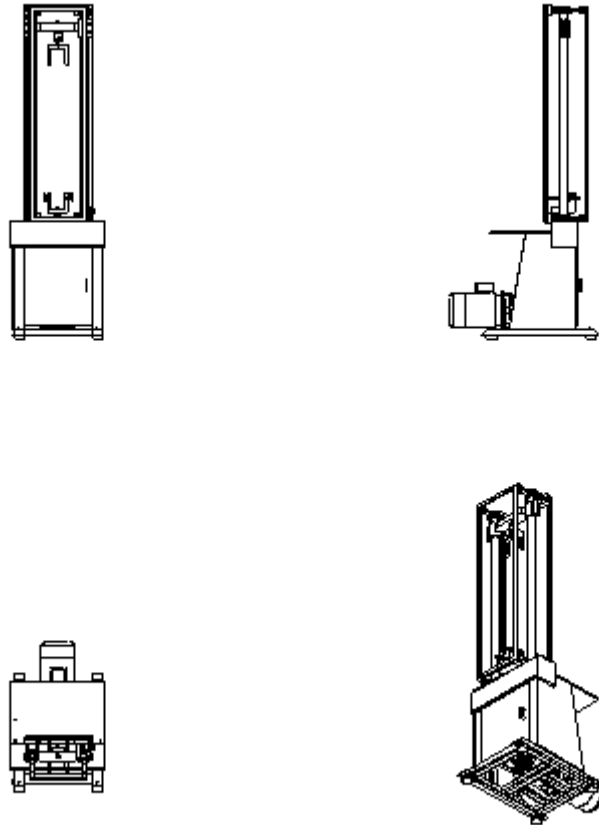


Figura XXXIV – Desenho de pormenor da máquina completa, com as protecções.