



**José André
Alves Sousa**

Melhoramento e Testes da Máquina de Ensaios de Fadiga



**José André
Alves Sousa**

Melhoramento e Testes da Máquina de Ensaios de Fadiga

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

Júri

presidente

Professor Doutor Robertt Angelo Fontes Valente
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

arguente

Professor Doutor António Gonçalves Magalhães
Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto

orientador

Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao meu Orientador, Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira, pela sua enorme dedicação e total disponibilidade para concretizar este projeto. A sua vontade genuína de ajudar e capacidade inata para ensinar fazem dele o engenheiro e o professor que eu gostaria de ser.

Ao meu Co-Orientador, Professor Doutor Alfredo Balacó de Morais, por toda a ajuda e acompanhamento, tanto na componente teórica, como no desenvolvimento e organização da dissertação. A sua genialidade e sentido de humor foram uma constante que marcaram o meu curso – da maneira que apenas um professor exemplar consegue marcar.

À minha namorada, Sofia, por todo o apoio incondicional ao longo desta caminhada. Sem ela, nada disto teria sido possível.

Aos meus Pais, por me terem dado a oportunidade de seguir os meus sonhos, e aos meus irmãos, pelo exemplo inspirador que sempre foram.

A todos os meus Amigos, por me proporcionarem tão bons e inesquecíveis momentos nesta etapa única da vida – a minha vida académica – em especial ao Hugo, por todas as novas ambições e pela visão otimista da realidade.

À Lúcia, por me ensinar a olhar para a vida de um modo diferente.

Palavras-chave

Máquina de Ensaios; Laminados Compósitos; Fadiga; Delaminação; Modo II; ENF;

Resumo

Os materiais compósitos são atualmente aplicados em larga escala nos mais diversos sectores. Apesar das suas características excepcionais, os laminados compósitos apresentam uma elevada susceptibilidade à fratura interlaminar, assunto que tem sido por isso objeto de muita investigação ao longo dos anos. O estudo deste fenómeno, também conhecido por delaminação, envolve frequentemente equipamentos dispendiosos e com elevados custos de manutenção, sobretudo quando se trata de caracterizar o comportamento à fadiga. O principal objetivo deste trabalho foi o melhoramento de uma Máquina de Ensaios de Fadiga de baixo custo desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Através de intervenções de diferentes naturezas – conceptual, mecânica, eletrónica, entre outras – tornou-se esta máquina mais atual, versátil e rigorosa. Por fim, foram realizados alguns ensaios de delaminação sob fadiga em modo II recorrendo ao provete End-Notched Flexure (ENF). Os resultados obtidos foram claramente consistentes com a Lei de Paris, que relaciona a taxa de propagação da fenda com a variação da taxa de libertação de energia de deformação, validando as alterações efetuadas neste trabalho.

Keywords

Testing Machine; Laminated Composites; Fatigue; Delamination; Mode II; ENF;

Abstract

Composite materials are currently extensively applied on a large scale in various sectors. Despite their exceptional characteristics, composite laminates are susceptible to interlaminar fracture. Therefore, this phenomenon, also known as delamination, has been thoroughly investigated over the years. The study of delamination often involves expensive equipment with high maintenance costs, especially for characterizing the fatigue behavior. This motivated the development of a low cost Fatigue Testing Machine at the Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro. The main objective of the present work was improving the versatility and accuracy of the test machine through modifications at various levels e.g. conceptual, mechanical, electronic, among others. Finally, Mode II delamination fatigue tests were performed using the End-Notched Flexure (ENF) specimen. The results were clearly consistent with the Paris Law, which relates the rate of crack propagation with the variation of the strain energy release rate, thereby validating the changes made in this work.

Índice

Índice de Abreviaturas e Nomenclatura

Índice de Figuras

Índice de Tabelas

1. Enquadramento e Objetivos [21]

- 1.1 Prefácio e Objetivos [23]
- 1.2 Breve Referência aos Materiais Compósitos [24]
- 1.3 Caracterização da Resistência à Delaminação [26]
- 1.4 Delaminação sob Fadiga [28]

2. Máquina de Ensaio de Fadiga [35]

- 2.1 Alterações Mecânicas [37]
 - 2.1.1 Enquadramento [37]
 - 2.1.1.1 MEF enquanto Projeto [37]
 - 2.1.1.2 Estrutura e Funcionamento da MEF Original [38]
 - 2.1.1.3 Motivação Científica [39]
 - 2.1.2 Identificação de Problemas [41]
 - 2.1.3 Intervenções Mecânicas [43]
 - 2.1.3.1 Soluções Intermédias [43]
 - 2.1.3.1.1 Porcas Duplas [43]
 - 2.1.3.1.2 Guiamento através de Varões [45]
 - 2.1.3.2 Solução Final [47]
 - 2.1.3.3 Outras Alterações [52]
 - 2.1.3.3.1 Apoio do Sensor Ótico [52]
 - 2.1.3.3.2 Acessórios da Célula de Carga [54]
- 2.2 Alterações Eletrónicas [57]
 - 2.2.1 Ganho [57]
 - 2.2.2 *Offset* [60]
 - 2.2.2.1 DAC [63]
 - 2.2.2.2 Cálculo do Número de Bits [64]
 - 2.2.2.3 Dual DAC [64]
 - 2.2.2.4 Comunicação SPI [66]

2.2.2.5	Controlo do <i>Offset</i>	[68]
2.2.2.6	Método da Bisseção	[69]
2.2.3	Calibração da Célula de Carga	[72]
2.2.4	Outras Alterações	[73]
2.3	Alterações na Metodologia de Tratamento de Informação	[75]
2.3.1	Tratamento de Dados	[75]
2.3.1.1	Análise do Sinal e do Ruído	[75]
2.3.1.2	Amostra Original	[78]
2.3.1.3	<i>Outliers</i>	[79]
2.3.2	Filtragens	[83]
2.3.2.1	Primeira Filtragem	[83]
2.3.2.1.1	Amostra Limpa	[83]
2.3.2.1.2	Diferenças Pontuais	[84]
2.3.2.1.3	Médias Deslizantes	[85]
2.3.2.2	Segunda Filtragem	[87]
2.3.2.2.1	Método da Regressão Linear pelos Mínimos Desvios Quadrados	[88]
3.	Ensaaios	[91]
3.1	Características dos Provetes	[93]
3.2	Medição do Módulo de Flexão	[94]
3.3	Criação da Pré-fenda	[95]
3.4	Ensaaios Estáticos	[96]
3.5	Ensaaios de Fadiga	[98]
3.6	Análise dos Modos de Fratura	[102]
4.	Conclusões e Trabalhos Futuros	[105]
4.1	Conclusões	[107]
4.2	Trabalhos Futuros	[108]
5.	Bibliografia	[109]
6.	Anexos	[115]

Índice de Abreviaturas e Nomenclatura

- G_{IIc} - Taxa de libertação crítica de energia de deformação em modo II
- G_{IImax} - Taxa de libertação máxima de energia de deformação em modo II
- G_{IImin} - Taxa de libertação mínima de energia de deformação em modo II
- G_j - Taxa de libertação de energia de deformação
- G_{jc} - Taxa de libertação crítica de energia de deformação
- G_{jmax} - Taxa de libertação máxima de energia de deformação
- G_{jmin} - Taxa de libertação mínima de energia de deformação
- K_j - Fator de intensidade de tensão
- R^2 - Correlação estatística
- ΔG_j - Variação da taxa de libertação de energia de deformação
- δ_{max} - Deslocamento máximo
- δ_{min} - Deslocamento mínimo
- 2L - Vão
- 4ENF - 4-Point End-Notched Flexure
- ADC - Analogue-to-Digital Converter
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- CAD - Computer-Aided Design
- CNC - *Computer Numerically Controlled*
- DAC - Digital-to-Analogue Converter
- DCB - Double Cantilever Beam
- DEM-UA - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
- ELS - End-Loaded Split
- ENF - End-Notched Flexure
- GND - *Ground*
- IEM - Interferência eletromagnética
- INEGI - Instituto de Engenharia e Gestão Industrial
- LMS - *Least Median Squares* (mínima mediana dos quadrados)
- LT - Condições de moldação com maior tempo de processamento
- LTS - *Least Trimmed Squares* (mínimos desvios quadrados)
- MEF - Máquina de Ensaio de Fadiga
- MIEM - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
- MISO - Master Input Slave Output
- MMB - Mixed-Mode Bending
- MOSI - Master Output Slave Input
- NM - Condições de moldação normais
- PC – Personal Computer

PTFE - Poly-Tetra-Fluor-Ethylene
SC - Condições de moldação com arrefecimento lento
SCK – Serial Clock
SNR - Sinal to Noise Ratio
SPI - Serial Peripheral Interface
SS - Slave Select
t - Tamanho do intervalo
USB - Universal serial bus
VBA - Visual Basic for Applications
Z0 - Posição zero inicial do fim de curso
 σ - Desvio padrão
B - Largura do provete
C - Flexibilidade / *Compliance*
D - Parâmetro da Lei de Paris
N - Número de ciclos
P - Carga
R - Rácio de tensões
a - Comprimento da fenda
n - Parâmetro da Lei de Paris
r - Cutoff/Threshold

Índice de Figuras

- Figura 1 | Pág. 24** – Representação esquemática de formas de reforço por fibras num compósito: fibras unidirecionais (a); tecido bidirecional (b); tecido tridimensional (c) (Moura e outros, 2009; Pardini, 2000).
- Figura 2 | Pág. 25** – Figura ilustrativa do fenómeno de delaminação (TU Delft, 2012).
- Figura 3 | Pág. 26** – Diferentes modos de solitação de um elemento com uma fenda.
- Figura 4 | Pág. 27** – Representação ilustrativa da configuração de alguns dos ensaios de fratura interlaminar (Moura e outros, 2009)
- Figura 5 | Pág. 28** – Representação ilustrativa do comportamento típico dos materiais à fadiga.
- Figura 6 | Pág. 29** – Representação esquemática do ensaio ELS.
- Figura 7 | Pág. 29** – Resultados obtidos por Brunner e outros (2013).
- Figura 8 | Pág. 30** – Ensaio ENF modificado usado por Matsubara e outros (2006).
- Figura 9 | Pág. 30** – Gráfico representativo das diferenças de comportamento à fadiga de provetes em ensaios ENF a partir do filme e da pré-fenda (O'Brien e outros, 2010).
- Figura 10 | Pág. 31** – Gráfico referente ao comportamento à fadiga de dois provetes ENF a partir de pré-fenda (azul) e do filme (laranja) (O'Brien e outros, 2010).
- Figura 11 | Pág. 31** – Microfissuras formadas na vizinhança da fenda (O'Brien e outros, 2010).
- Figura 12 | Pág. 32** – Efeito das condições de processamento na taxa de propagação de fenda em ensaios ENF (Bureau e outros, 2002).
- Figura 13 | Pág. 33** – Representação esquemática da geometria de um ensaio 4ENF utilizado por Shindo e outros (2009).
- Figura 14 | Pág. 33** – Taxa de propagação de fenda a diferentes temperaturas medida por Shindo e outros (2009).
- Figura 15 | Pág. 34** – Taxas de crescimento da fenda observadas em provetes unidirecionais (a) e multidirecionais (b) por Beghini e outros, (2006)
- Figura 16 | Pág. 37** – Componente estrutural da MEF original no início dos trabalhos em 2012.
- Figura 17 | Pág. 38** – Vista isométrica da MEF original e seus componentes: 1- mesa superior; 2- mesa inferior; 3- plataforma; 4- varões de suporte; 5- fuso; 6-correia dentada; 7-motor passo-a-passo; 8- porca trapezoidal; 9- célula de carga.
- Figura 18 | Pág. 39** – Imagem foto realista da modelação 3D da MEF no início do presente trabalho de investigação.
- Figura 19 | Pág. 41** – Imagem CAD da ligação porca/fuso: 3 - plataforma; 4 - varão de suporte; 5 - fuso; 8 - porca trapezoidal.
- Figura 20 | Pág. 41** – Vista lateral da plataforma e da folga existente entre o fuso e a porca.
- Figura 21 | Pág. 42** – Vista lateral da plataforma, da folga existente e da possível rotação em torno de um dos eixos horizontais.

Figura 22 | Pág. 43 – Figura ilustrativa da diminuição do ângulo máximo de rotação em função da altura das porcas: o ângulo máximo permitido com apenas uma porca (vermelho); o ângulo máximo permitido com recurso a duas porcas (azul).

Figura 23 | Pág. 44 – Desenho técnico de uma solução rudimentar para um dispositivo que alberga duas porcas.

Figura 24 | Pág. 44 – Esquema técnico de outra possível solução de um dispositivo que aloja duas porcas.

Figura 25 | Pág. 45 – Desenho técnico do dispositivo: 16– elemento superior; 17– adaptador superior; 18– porca trapezoidal.

Figura 26 | Pág. 46 – Vista superior da plataforma: a plataforma e os varões existentes (preto); as possíveis adaptações para englobar os varões no guiamento da plataforma (vermelho).

Figura 27 | Pág. 47 – Vista isométrica da plataforma em alumínio.

Figura 28 | Pág. 47 – Maquinagem da plataforma no centro de maquinagem CNC (esquerda); plataforma em alumínio já concluída (direita).

Figura 29 | Pág. 48 – Vista superior (direita) e lateral (esquerda) dos varões em aço cromado duro.

Figura 30 | Pág. 48 – Maquinagem das extremidades dos varões em torno convencional.

Figura 31 | Pág. 49 – Vistas bidimensionais de um casquilho adaptador.

Figura 32 | Pág. 50 – Vista isométrica superior da plataforma e restantes componentes: 4- varão; 3- plataforma; 10- casquilho deslizante; 11- casquilho adaptador.

Figura 33 | Pág. 50 – Vista isométrica inferior da plataforma e restantes componentes: 3- plataforma; 4- varão; 12- tampa do casquilho adaptador.

Figura 34 | Pág. 51 – Conjunto da plataforma, porcas e casquilhos por montar.

Figura 35 | Pág. 51 – Estrutura final da MEF já concluída.

Figura 36 | Pág. 52 – Sistema ótico original: sensor ótico móvel (esquerda); perfil de alumínio, apoio e pino (direita).

Figura 37 | Pág. 53 – Solução final para o sistema ótico: 14- sensor ótico; 15 –apoio do sensor.

Figura 38 | Pág. 54 – Construção do suporte para célula de carga modelo “disco”: não maquinada (esquerda); maquinada (direita).

Figura 39 | Pág. 56 – Sistema final de transmissão de força: 3 - plataforma; 9 - célula de carga; 10 - adaptador; 13 - pino de carregamento do provete.

Figura 40 | Pág. 57 – Esquema parcial do circuito elétrico da MEF: resistência de 120 Ohm.

Figura 41 | Pág. 58 – Representação gráfica da resolução obtida com a célula de carga original de 10kN e um ganho de 500 vezes no INA 125, durante um ensaio experimental de 300 ciclos.

Figura 42 | Pág. 59 – Célula de carga tipo “disco”.

Figura 43 | Pág. 60 – Representação gráfica da resolução obtida com um ganho de 250 vezes e a nova célula de 0,5kN.

Figura 44 | Pág. 61 – Representação gráfica dos efeitos de um aumento de 10 vezes no ganho (2500 vezes) do INA125.

Figura 45 | Pág. 61 – Representação gráfica dos efeitos de uma correção negativa no offset no mesmo ensaio da figura 44.

Figura 46 | Pág. 62 – Esquema parcial do circuito elétrico da MEF: Resistência de 215kOhm.

Figura 47 | Pág. 63 – Gráfico ilustrativo do comportamento de um DAC, onde é possível observar a relação entre a saída de tensão analógica em função da entrada digital comandada por computador.

Figura 48 | Pág. 65 – Esquema elétrico do Dual DAC MCP4822, utilizado na MEF.

Figura 49 | Pág. 66 – Esquema das ligações do Dual DAC MCP4822, utilizado na MEF.

Figura 50 | Pág. 67 – Esquema da comunicação SPI entre o Arduíno e o Dual DAC.

Figura 51 | Pág. 67 – Esquema da divisão da palavra enviada pelos 16 bits e respectivas funções.

Figura 52 | Pág. 68 – Diagrama do fluxo de informação ao longo do circuito.

Figura 53 | Pág. 70 – Fluxograma do método da bissecção implementado para ajuste do offset (ver anexo D).

Figura 54 | Pág. 71 – Figura ilustrativa do interface de monitorização de ajuste do offset.

Figura 55 | Pág. 72 – Gráfico referente à calibração de carga de 500N.

Figura 56 | Pág. 76 – Sinal com o driver do motor desligado.

Figura 57 | Pág. 77 – Sinal com o driver do motor ligado.

Figura 58 | Pág. 78 – Representação da amostra: original (azul); reta de regressão linear (vermelho).

Figura 59 | Pág. 83 – Representação gráfica da amostra: limpa manualmente (azul); reta de regressão linear (vermelho).

Figura 60 | Pág. 84 – Representação gráfica da amostra: filtrada pelo método das Diferenças Pontuais (azul); reta de regressão linear (vermelho).

Figura 61 | Pág. 86 – Representação do método implementado no Excel.

Figura 62 | Pág. 86 – Representação gráfica da amostra: filtrada pelo método das Médias Deslizantes (azul); reta de regressão linear (vermelho).

Figura 63 | Pág. 87 – Comparação gráfica entre a amostra original de um ensaio (azul) e da mesma amostra após uma primeira filtragem (vermelho).

Figura 64 | Pág. 89 – Comparação gráfica entre a amostra original de um ensaio oficial (azul claro) e os dois estágios de filtragem (1º-vermelho; 2º-azul escuro).

Figura 65 | Pág. 93 – Geometria do ensaio ENF adotada.

Figura 66 | Pág. 96 – Ensaio estático para medição de G_{IIC} .

Figura 67 | Pág. 97 – Curvas carga-deslocamento de ensaios ENF.

Figura 68 | Pág. 97 – Curvas R medidas em ensaios ENF.

Figura 69 | Pág. 98 – Evolução de Pmax (linhas vermelhas) e Pmin (linhas azuis) em ensaios de fadiga efetuados com $\delta_{max} = 3.5$ (linhas contínuas) e 2.7 (linhas tracejadas).

Figura 70 | Pág. 99 – Propagação da fenda em ensaios de fadiga efetuados com $\delta_{max} = 3.5$ (linha vermelha) e 2.7 (linha azul).

Figura 71 | Pág. 99 – Evolução de G_{Imin} (linhas azuis) G_{Imax} (linhas vermelhas) e ΔG_{II} (linhas amarelas) em ensaios de fadiga efetuados com $\delta_{max} = 3.5mm$ (linhas contínuas) e $2.7mm$ (linhas tracejadas).

Figura 72 | Pág. 100 – Identificação de zonas de taxa de propagação aproximadamente constante (assinaladas a vermelho) num ensaio de fadiga efetuado com $\delta_{max} = 3.5mm$.

Figura 73 | Pág. 101 – Taxa de propagação de fenda em função de ΔG_{II} em escala logarítmica para todos os ensaios, incluindo a curva ajustada da Lei de Paris.

Figura 74 | Pág. 102 – Superfície externa (acima) e superfície de fratura (abaixo) de um provete.

Figura 75 | Pág. 103 – Fotografia tirada através de uma lupa a um provete com dupla fenda.

Índice de Tabelas

Tabela 1 | Pág. 78 – Parâmetros da amostra original.

Tabela 2 | Pág. 83 – Parâmetros da amostra limpa manualmente.

Tabela 3 | Pág. 85 – Parâmetros da amostra obtida pelas Diferenças Pontuais.

Tabela 4 | Pág. 87 – Parâmetros da amostra obtida pelas Médias Deslizantes.

Tabela 5 | Pág. 93 – Propriedades mecânicas unidirecionais do HS 160 REM anunciadas pelo produtor.

Tabela 6 | Pág. 98 – Resumo dos parâmetros adotados nos ensaios de fadiga.

1 ■ Enquadramento e Objetivos

1.1 Prefácio e objetivos

A busca pelo conhecimento faz parte da essência humana. Esta curiosidade sobre o mundo que nos rodeia levou a que, desde muito cedo, a tecnologia fizesse parte da nossa realidade, sendo uma das principais ferramentas nesta busca interminável. Em resposta a questões cada vez mais complexas é exigida tecnologia cada vez mais específica, e os materiais compósitos não são exceção – a falta de capacidade dos materiais “tradicionais” para satisfazer as necessidades de sectores da indústria de ponta, como o automóvel e o aeroespacial, desencadeou a procura de uma alternativa, tendo os materiais compósitos e as suas propriedades singulares aparecido como resposta. Atualmente são aplicados em larga escala nos mais diversos sectores, sendo por isso também objeto de muita investigação.

Apesar das suas características excecionais, os compósitos apresentam elevada susceptibilidade à fratura interlaminar, um dos vários modos de rotura neste tipo de materiais. A caracterização da resistência à delaminação, como é mais conhecida, é feita, geralmente, no âmbito da Mecânica da Fratura, sendo as taxas críticas de libertação de energia de deformação, associadas aos três modos de propagação de fendas, os parâmetros mais utilizados.

A investigação do fenómeno de delaminação em compósitos envolve uma componente experimental apreciável, bem como meios tecnológicos que são frequentemente dispendiosos.

Este trabalho de investigação insere-se num projeto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (DEM-UA) que envolve uma máquina de ensaios de fadiga (MEF) de baixo custo, dedicada essencialmente à delaminação de materiais compósitos sob fadiga. O melhoramento da MEF era o principal objetivo do presente trabalho, tendo em vista corrigir falhas existentes que limitavam o correto funcionamento desta, tais como a presença de ruído electrónico e de folgas mecânicas. O *upgrade* da MEF foi conseguido mediante intervenções ao nível da eletrónica e dos algoritmos de tratamento de dados, que permitiram aumentar a versatilidade da MEF e o rigor dos resultados. Por fim, e com o objetivo de avaliar e validar as alterações levadas a cabo na MEF, realizaram-se alguns ensaios à fadiga em modo II.

1.2 Breve referência aos materiais compósitos

Um material diz-se compósito quando resulta da combinação de dois ou mais materiais distintos, que mantêm a sua integridade (Dowling, 2006). Existe na Natureza uma diversidade imensa de materiais compósitos, nomeadamente os de origem biológica. Como exemplos, temos a madeira que contém fibras de celulose que se encontram rodeadas por hemicelulose e lignina (que, só por si, são polímeros), os ossos são compostos por uma proteína fibrosa (o colagénio) envoltos numa espécie de matriz cerâmica de um mineral cristalino (hidroxilapatite). No entanto, esta abundância natural não impediu o Homem de criar compósitos. Ao combinar os mais diversos materiais, naturais e sintéticos, numa variedade cada vez maior de maneiras – compósitos reforçados por partículas, *whiskers*, fibras contínuas – criou uma vasta panóplia de novos materiais compósitos com propriedades singulares.

O estudo pormenorizado dos materiais, de novas técnicas de processamento, em conjunto com o avanço tecnológico registado nas últimas décadas, tem permitido criar compósitos com características e capacidades que respondem às necessidades de aplicações cada vez mais exigentes. Isto levou a que o leque de opções disponíveis para projetistas e engenheiros de materiais se alargasse substancialmente, e que o espectro de aplicações dos materiais compósitos, que já é bastante vasto atualmente, aumente de dia para dia.

Foi Griffith quem demonstrou que as fibras apresentavam propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos, na sua forma maciça. No entanto, apesar do seu papel fundamental no desempenho de compósitos, as fibras não podem ser diretamente utilizadas em aplicações estruturais de engenharia, devido à sua pequena secção resistente. Este problema foi resolvido na própria Natureza com a introdução destas fibras num meio capaz de assegurar a distribuição eficiente da carga pelas fibras, de proteger as suas superfícies e de conferir uma forma estável ao compósito – a matriz (Moura e outros, 2009). As fibras contínuas, que conferem, efetivamente, as excelentes propriedades mecânicas aos compósitos, podem ser incorporadas sob várias formas, com se exemplifica na figura 1.

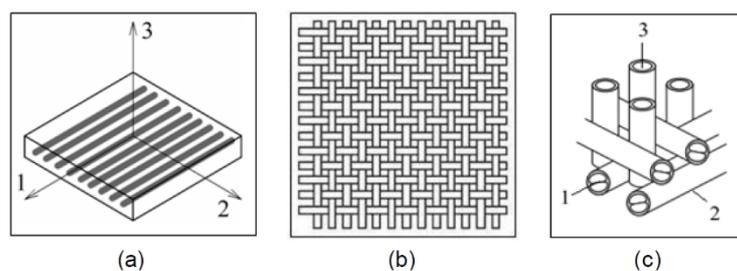


Figura 1 – Representação esquemática de formas de reforço por fibras num compósito: fibras unidireccionais (a); tecido bidirecional (b); tecido tridimensional (c) (Moura e outros, 2009; Pardini, 2000).

Os materiais compósitos podem ser classificados segundo vários critérios, sendo o tipo de matriz – polimérica, metálica, cerâmica e cimentosa - um dos mais relevantes (Dowling, 2006). No âmbito das aplicações estruturais, os materiais compósitos utilizados são tipicamente de matriz polimérica, reforçados com fibras contínuas de vidro, aramida ou carbono, e têm frequentemente a forma de laminados com camadas de fibras unidirecionais, ou tecidos bidimensionais (figura 1).

As excelentes propriedades mecânicas dos compósitos, como a rigidez específica, têm sido um fator determinante na utilização destes materiais nas mais diversas áreas, em particular em situações nas quais o peso é uma variável crítica. A isto acrescenta-se ainda a disponibilidade de processos de fabrico que permitem a obtenção de formas complexas e de grandes dimensões. No entanto, os compósitos obtidos a partir de laminados apresentam suscetibilidade ao aparecimento e propagação de fendas entre as suas camadas (figura 2). Este fenómeno, conhecido por delaminação, representa um dos modos de falha que mais compromete o desempenho estrutural de compósitos laminados (Moura e outros, 2009).

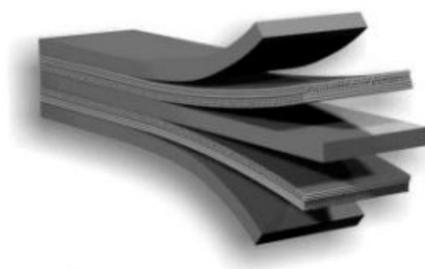


Figura 2 – Figura ilustrativa do fenómeno de delaminação (TU Delft, 2012).

A delaminação pode ser causada por defeitos induzidos durante o processo de fabrico, ou gerada nos elementos estruturais durante o seu ciclo de vida, devido a tensões interlaminares. Apesar de já terem passado várias décadas desde o reconhecimento da importância deste modo de falha, por O'Brien em 1982, ele continua a ser objeto de investigação e a condicionar o dimensionamento de estruturas compósitas (Paul e outros, 2002).

1.3 Caracterização da resistência à delaminação

A caracterização da resistência à delaminação é feita no âmbito da Mecânica da Fratura, que aborda o comportamento de materiais com fendas (Zehnder, 2007; Brunner e outros, 2008). Um elemento com uma fenda pode ser solicitado em três modos básicos representados na figura 3, ou em combinação destes. O modo I, (*opening mode*) consiste no afastamento das superfícies da fenda. No modo II (*sliding mode*) as superfícies da fenda deslizam uma em relação à outra na direção normal à frente da fenda. Por último, o modo III (*tearing mode*) envolve o deslizamento relativo das superfícies da fenda paralelamente à frente da fenda. O modo I é causado por tensões de tração locais, enquanto os outros dois modos são causados por tensões de corte locais.

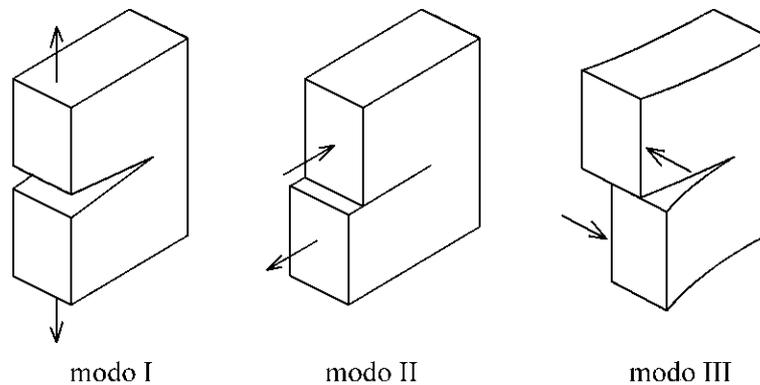


Figura 3 – Diferentes modos de sollicitação de um elemento com uma fenda.

Com o objetivo de compreender melhor o fenômeno de delaminação, foram criados, ao longo dos anos dispositivos e metodologias de ensaio que permitiram um estudo pormenorizado do comportamento dos materiais quando solicitados nos diferentes modos puros, ou em combinação destes. Algumas destas configurações de ensaios foram normalizadas por diferentes entidades (figura 4). O ensaio *Double Cantilever Beam* (DCB) [ISO 15204, 2001; ASTM D5528, 2001] gera sollicitação de modo I, enquanto o modo II é conseguido no ensaio *End-Notched Flexure* (ENF) [ASTM WK22949, 2011]. É ainda possível obter sollicitações combinadas do modo I e II através de um ensaio *Mixed-Mode Bending* (MMB) [ASTM D6671, 2006].

Estes ensaios permitem a obtenção de propriedades que traduzem a resistência à propagação de uma fenda. Entre as grandezas físicas mais usadas para esse fim os fatores de intensidade de tensão K_j ($j = I, II$ ou III), sobretudo para materiais metálicos. No entanto, a maior complexidade dos campos de tensão existente nos compósitos, resultante da elevada anisotropia, levou a que se usassem as taxas de libertação de energia de deformação G_j para este tipo de materiais (Moura e outros, 2009). Quando solicitados em modo puro j , a propagação da fenda ocorre quando é atingida a taxa crítica de libertação de energia de deformação G_{j_c} .

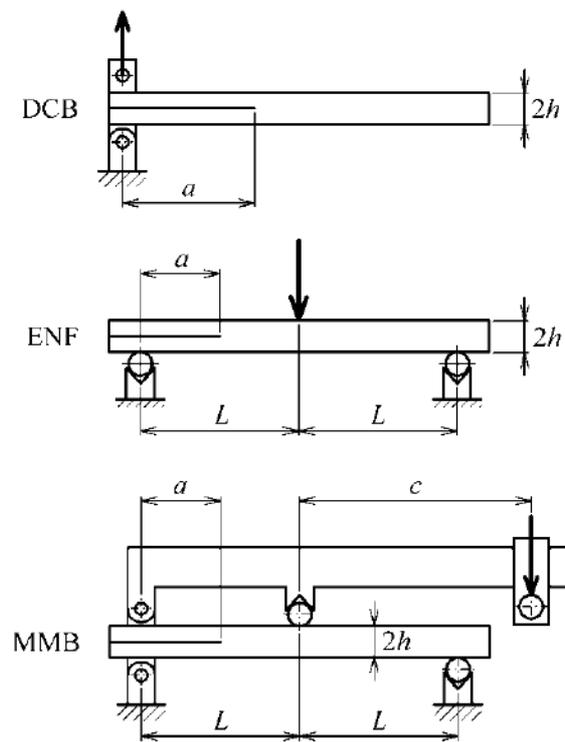


Figura 4 – Representação ilustrativa da configuração de alguns dos ensaios de fratura interlaminar (Moura e outros, 2009)

A maioria das metodologias para a obtenção de G_j baseia-se na monitorização do comprimento da fenda a e na medição da flexibilidade C do provete durante o ensaio. A flexibilidade C resulta do quociente entre o deslocamento δ no ponto de carregamento e a carga aplicada P . Obtidos os valores destas variáveis e com a descrição da flexibilidade em função do tamanho da fenda $C(a)$, através de expressões baseadas na Teoria de Vigas ou em polinómios de parâmetros ajustáveis, é possível calcular G_j a partir da relação de Irwin-Kies (Moura e outros, 2009)

$$G_j = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (1)$$

sendo B a largura do provete. Nos ensaios quase-estáticos o objetivo é medir G_{jc} , enquanto que nos ensaios de fadiga procura-se geralmente estabelecer uma relação entre G_{jmax} ou $\Delta G_j = G_{jmax} - G_{jmin}$ e a taxa de crescimento da fenda $\partial a / \partial N$, sendo N o número de ciclos de carregamento (Kenane & Benzeggagh, 1997; O'Brien e outros, 2010).

1.4 Delaminação sob fadiga

No comportamento típico dos materiais à fadiga identificam-se três regimes de propagação de fenda distintos (Dowling, 2006).

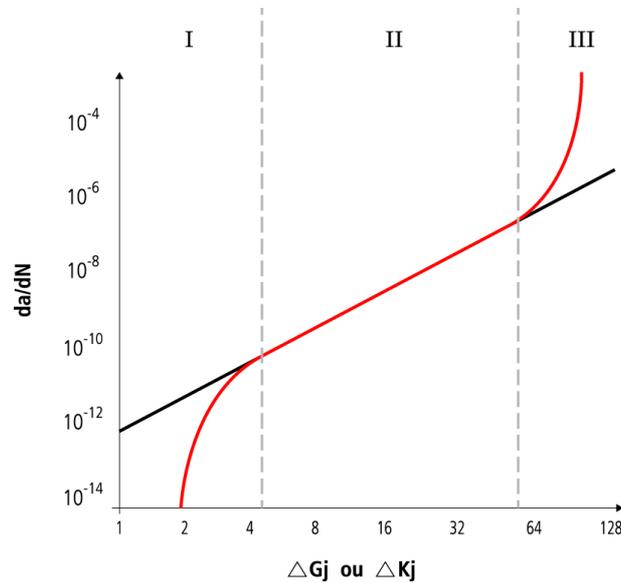


Figura 5 – Representação ilustrativa do comportamento típico dos materiais à fadiga.

O regime I, designado “sub-crítico”, é caracterizado por uma propagação lenta da fenda, que pode inclusive não ocorrer caso ΔG_j não atinja um valor limiar. Para valores superiores de ΔG_j dá-se o regime II, dito “estável”, no qual a taxa de propagação da fenda cresce de forma estável e aproximadamente linear quando se usa escala logarítmica em ambos os eixos. Por último, o regime III, em que se dá a propagação instável da fenda.

O regime II tem sido objeto de aturada investigação que serviu de base à formulação da bem conhecida Lei de Paris, que pode ser expressa por

$$\frac{\partial a}{\partial N} = D \Delta G_j^n \quad (2)$$

onde D e n são os parâmetros a determinar a partir do ajuste de resultados experimentais (Paris e Erdogan, 1963). Os bons ajustes obtidos numa grande variedade de situações fazem com que a Lei de Paris seja, atualmente, utilizada pela maioria dos investigadores na comparação e caracterização do comportamento dos materiais à fadiga. Além disso, esta Lei abrange a gama de taxas de propagação de fendas mais comum nos elementos estruturais da engenharia. De salientar que, segundo O'Brien e outros (2010) e Landry (2012), são por vezes usadas variantes da Lei de Paris, sendo uma das mais comuns a seguinte:

$$\frac{\partial a}{\partial N} = D \Delta G_{max}^n \quad (3)$$

No que diz respeito, especificamente, à delaminação em modo II sob fadiga, objeto deste trabalho, apesar de já haver bastantes trabalhos publicados, subsistem questões importantes a esclarecer e não há, atualmente, nenhum ensaio normalizado (Brunner e outros, 2013). Na realidade, parece haver algumas diferenças nos resultados que se obtêm de diferentes ensaios de modo II. Brunner e outros (2013) apresentaram um estudo envolvendo ensaios ENF e *End-Loaded Split* em dois tipos de laminados de fibra de carbono (ELS, figura 6). Os referidos autores constataram que os provetes ENF se deslocavam no dispositivo durante o ensaio, devendo esse movimento ser restringido.

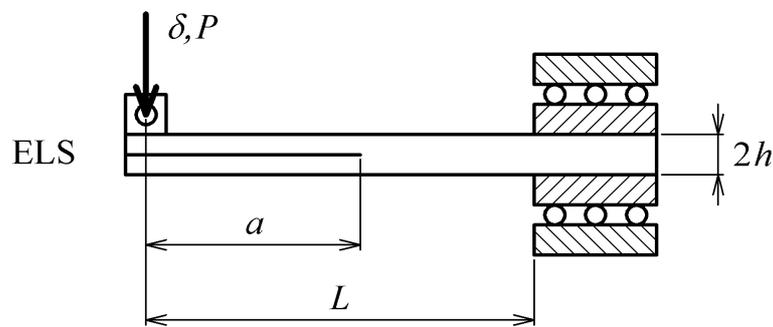


Figura 6 – Representação esquemática do ensaio ELS.

Ainda assim, Brunner e outros (2013) registraram diferenças entre os parâmetros da Lei de Paris obtidos a partir dos dois tipos de ensaios, diferenças essas cujas causas só poderão ser identificadas após mais investigação (figura 7).

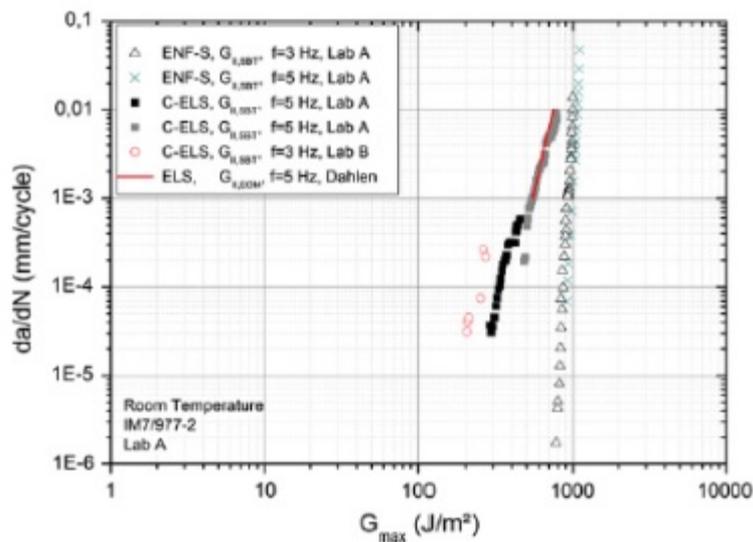


Figura 7 – Resultados obtidos por Brunner e outros (2013).

De resto, são vários os fatores que afetam potencialmente o comportamento da delaminação sob fadiga, e que têm por isso merecido atenção dos investigadores. É, desde logo, o caso de outra das características básicas do carregamento de fadiga imposto: o rácio R = tensão máxima/tensão mínima. Matsubara e outros (2006) estudaram o efeito das características dos ciclos de fadiga na propagação de fendas em laminados de fibras de vidro sujeitos a ensaios ENF modificados no sentido de permitirem inversões de carga (figura 8)

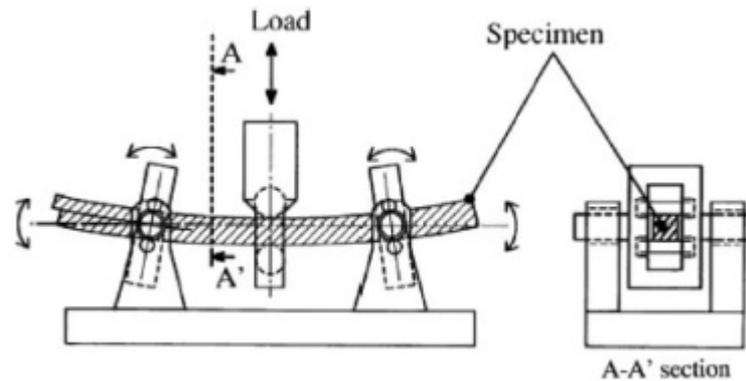


Figura 8 – Ensaio ENF modificado usado por Matsubara e outros (2006).

Outro fator que se tem demonstrado relevante é a natureza da fenda inicial. Os provetes usados nos ensaios têm uma delaminação inicial criada por um filme desmoldante aquando do fabrico (Brunner e outros, 2008). Não obstante, várias normas preveem a realização de um ensaio preliminar para gerar uma pré-fenda mais representativa. O'Brien e outros (2010) concluíram que o tipo de fenda inicial influenciava significativamente G_{IIc} e a resistência à fadiga nos estádios iniciais dos ensaios, embora as curvas $\partial a/\partial N$ versus G_{IImax} acabassem naturalmente por convergir (figuras 9 e 10).

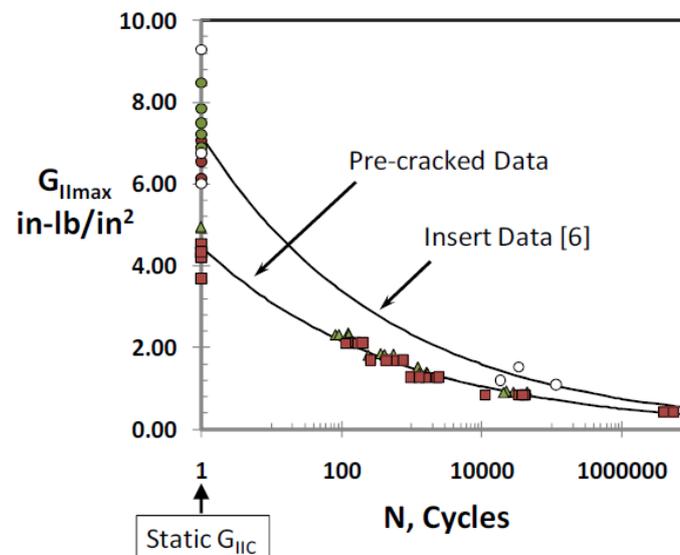


Figura 9 – Gráfico representativo das diferenças de comportamento à fadiga de provetes em ensaios ENF a partir do filme e da pré-fenda (O'Brien e outros, 2010).

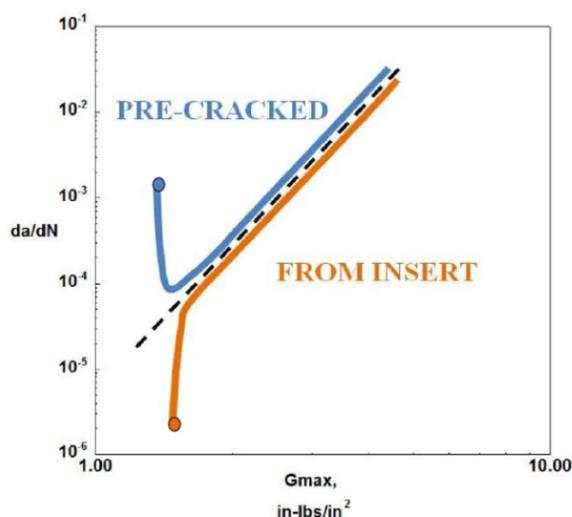


Figura 10 – Gráfico referente ao comportamento à fadiga de dois provetes ENF a partir de pré-fenda (azul) e do filme (laranja) (O'Brien e outros, 2010).

Nos provetes em que foi criada uma pré-fenda deu-se uma instabilidade inicial nos ensaios de fadiga, refletida no decréscimo brusco inicial da taxa de propagação da fenda. Por outro lado, nos ensaios a partir do filme foi registada uma taxa inicial de propagação bastante reduzida. Esta diferença de comportamento pode ser explicada a partir dos micromecanismos de propagação de delaminagens em modo II.

Há, inicialmente, formação de microfissuras desagregadas a partir da extremidade do filme (figura 11). A propagação da fenda corresponde à coalescência destas microfissuras. No caso dos ensaios a partir de pré-fenda, as microfissuras já estão formadas e portanto dá-se inicialmente uma propagação acelerada por coalescência daquelas.

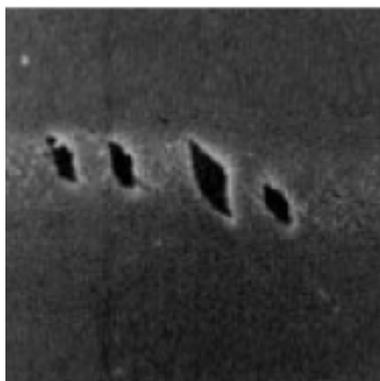


Figura 11 – Microfissuras formadas na vizinhança da fenda (O'Brien e outros, 2010).

Com base neste estudo, O'Brien e outros (2010) recomendaram a realização de ensaios a partir de pré-fenda por fornecerem propriedades mais conservadoras.

As condições de processamento dos laminados, dos quais são obtidos os provetes, também parecem ser muito relevantes para o comportamento à fadiga. Bureau e outros (2002) realizaram ensaios ENF em laminados vidro/polipropileno obtidos por moldação por compressão em condições consideradas normais (NM), e noutras com arrefecimento lento (SC) ou com tempo de processamento maior (LT). Estas diferentes condições tiveram efeito na taxa de propagação da fenda (figura 12). A explicação reside na influência das condições de processamento no grau de cristalinidade do polipropileno. De facto, observações das superfícies de fratura mostraram que a propagação ocorreu essencialmente nas regiões dúcteis, ricas em fase amorfa.

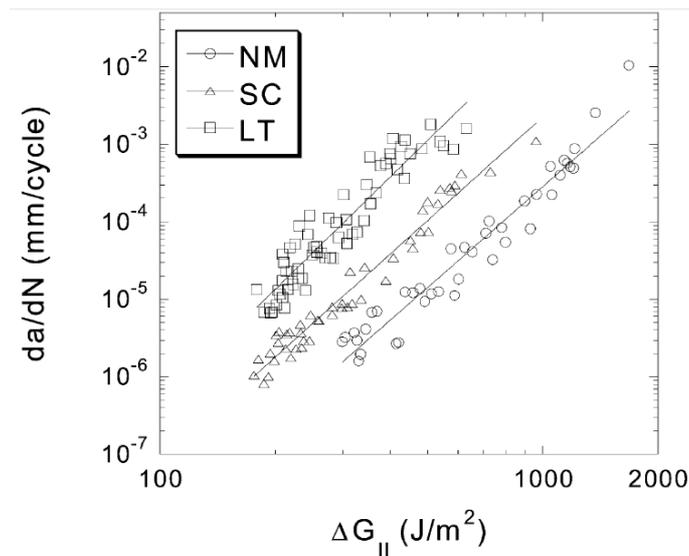


Figura 12 – Efeito das condições de processamento na taxa de propagação de fenda em ensaios ENF (Bureau e outros, 2002).

O comportamento à fadiga é também sensível às condições a que se realizam os ensaios. Shindo e outros (2009) realizaram ensaios *4-Point End-Notched Flexure* (4ENF) à fadiga em laminados de fibra de vidro sob condições criogénicas - temperatura do nitrogénio líquido ($-196^{\circ}C/77K$) e temperatura do hélio líquido ($-269^{\circ}C/4K$) – temperaturas estas que são relevantes para aplicações aeroespaciais (figura 13).

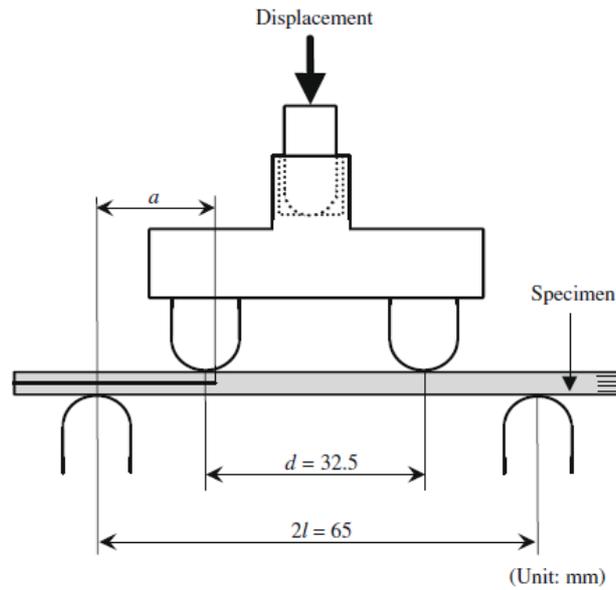


Figura 13 – Representação esquemática da geometria de um ensaio 4ENF utilizado por Shindo e outros (2009).

A taxa de propagação da fenda a baixas temperaturas foi inferior à verificada à temperatura ambiente (figura 14). Observações microscópicas das fendas e das superfícies de fratura revelaram, porém, mecanismos de deformação locais semelhantes (Shindo e outros, 2009).

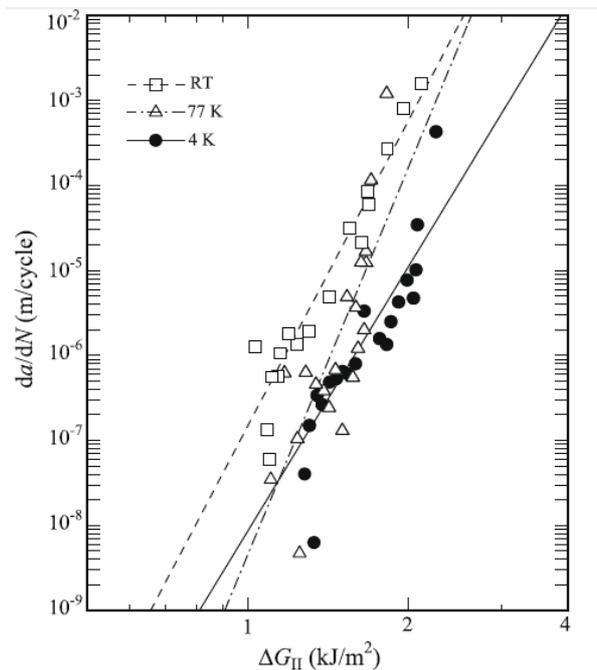


Figura 14 – Taxa de propagação de fenda a diferentes temperaturas medida por Shindo e outros (2009).

Finalmente, outro aspeto potencialmente relevante para o comportamento à fadiga é o tipo de laminado usado. Os ensaios de fratura normalizados são realizados em laminados unidirecionais, mas são os laminados multidirecionais os mais usados em aplicações estruturais (Brunner e outros, 2008). Beghini e outros (2006) estudaram a delaminação à fadiga em modo II

de laminados de fibra de carbono unidirecionais e cruzados (*cross-plyies*), isto é, com camadas a 0° e a 90° em relação à frente da fenda. Os resultados obtidos não revelaram diferenças significativas nas taxas de propagação das fendas para as diferentes orientações das fibras (figura 15). Por outro lado, os dados de taxa de crescimento da fenda em função da taxa crítica de liberação de energia de todos os ensaios estavam em boa concordância com a Lei de Paris (Beghini e outros, 2006).

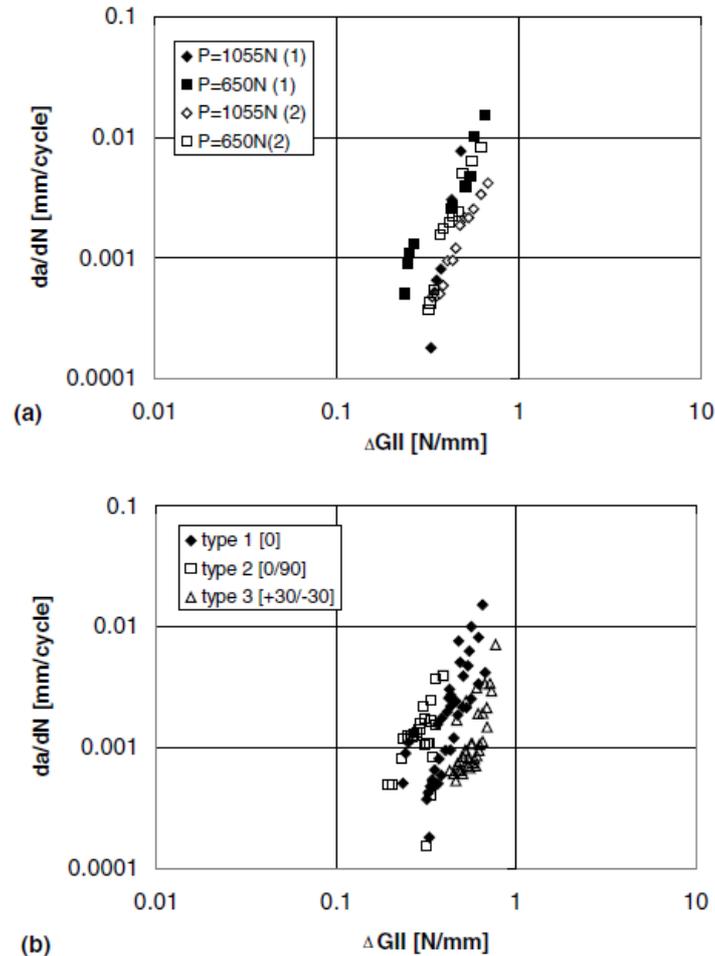


Figura 15 – Taxas de crescimento da fenda observadas em provetes unidirecionais (a) e multidirecionais (b) por Beghini e outros, (2006)

Em resumo, não sendo objetivo deste trabalho o estudo detalhado da delaminação à fadiga em modo II, esta revisão do estado do conhecimento permitiu compreender os mecanismos envolvidos e os métodos de ensaio e de análise de resultados. Assim, optou-se no trabalho experimental pelo ensaio ENF, que é o mais simples de realizar e que está em vias de normalização pela ASTM. Além disso, como o objetivo principal do trabalho era o melhoramento e validação de uma máquina de fadiga, adotou-se um programa de ensaios cujos resultados pudessem ser confrontados com a Lei de Paris, cuja aplicabilidade parece ser generalizada.

2 ■ Máquina de Ensaio de Fadiga

2.1 Alterações Mecânicas

2.1.1 Enquadramento

2.1.1.1 MEF enquanto projeto

Este trabalho científico insere-se num projeto do DEM-UA que envolve uma máquina de ensaios de fadiga (MEF) de baixo custo destinada essencialmente ao estudo da delaminação de materiais compósitos sob fadiga.

A estrutura da MEF foi concebida e construída por um grupo de alunos do DEM-UA, no âmbito de trabalhos práticos de uma disciplina do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM), no ano letivo de 2010-2011 (figura 16). No entanto, a máquina só se tornou funcional no decorrer do estudo do aluno de MIEM de Pedro Carvalho, em 2012. Apesar da MEF ter ficado operacional e de se terem realizado alguns ensaios de fadiga ao longo do referido estudo, o projeto da MEF não foi dado como concluído. A necessidade de se realizarem algumas intervenções de natureza diversa (conceptual, mecânica, eletrónica, entre outras), com o intuito de colmatar certas falhas existentes e de implementar alguns desenvolvimentos essenciais para a MEF deu na altura origem a conjunto de trabalhos futuros nos quais esta dissertação se insere.

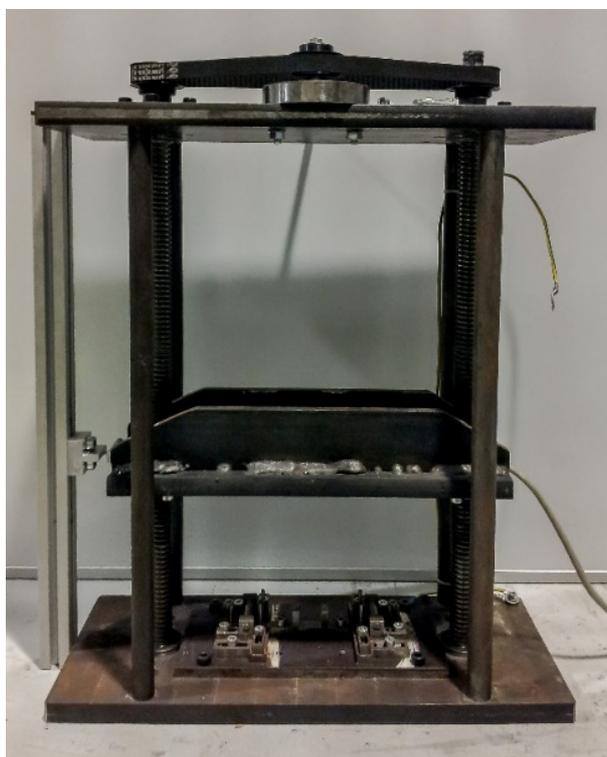


Figura 16 – Estrutura da MEF no início dos trabalhos em 2012 .

2.1.1.2 Estrutura e funcionamento da MEF original

A estrutura da MEF (figura 17) é constituída por duas mesas fixas ligadas por um conjunto de quatro varões de suporte. O elemento móvel, por seu turno, é uma plataforma que apresenta apenas um grau de liberdade, podendo efetuar movimentos ascendentes e descendentes num curso de 600mm. O movimento é transmitido à plataforma por um par de conjuntos porca/fuso (TR24x5) assentes nas mesas superior e inferior através de rolamentos. Os fusos são acionados por um motor elétrico passo-a-passo com relação de transmissão 1:1. Para garantir uma translação vertical coordenada da plataforma, recorreu-se a uma correia dentada para ligar ambos os fusos, impondo a estes um movimento de rotação sincronizado no sentido horário e anti-horário.

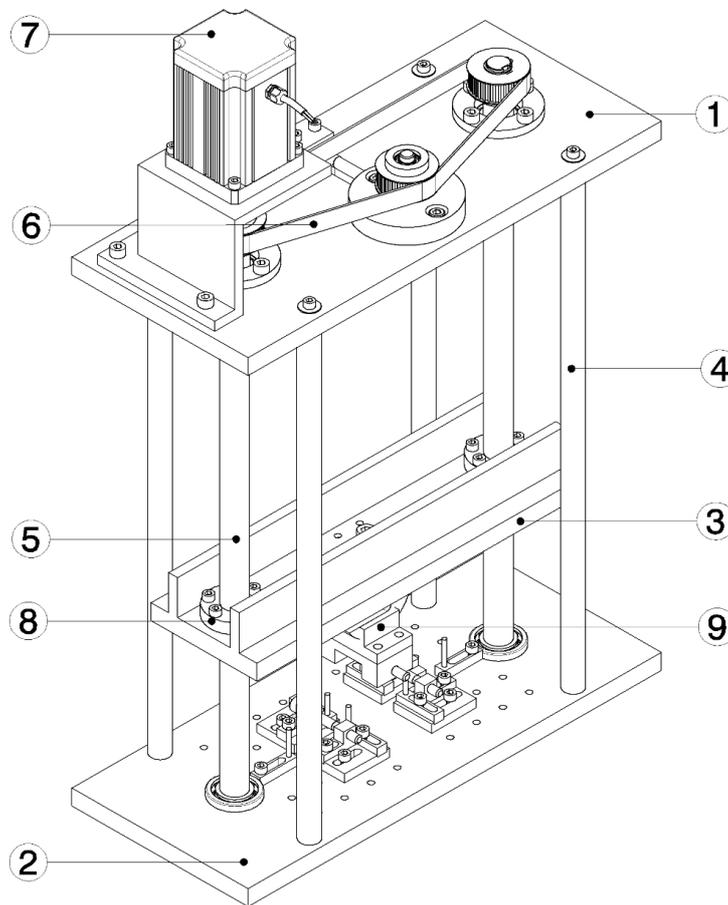


Figura 17 – Vista isométrica da MEF original e seus componentes: 1- mesa superior; 2- mesa inferior; 3- plataforma; 4- varões de suporte; 5- fuso; 6-correia dentada; 7-motor passo-a-passo; 8- porca trapezoidal; 9- célula de carga.

A mesa inferior está preparada para alojar dispositivos necessários para realizar os principais ensaio de fratura (ENF, DCB, ELS, MMB, etc), Existe na mesa inferior uma panóplia de dispositivos de fixação que possibilitam a realização dos mesmos, estando a área de trabalho

apenas limitada pelo curso dos fusos de 300mm. Numa das zonas laterais da MEF está implementado um sistema referencial – através de um sensor ótico – que permite a localização e correção ativa da posição da plataforma ao longo do ensaio.

Relativamente à aquisição de dados, existe ainda acoplada ao centro da plataforma uma célula de carga com 10kN de capacidade que permite a obtenção dos valores de força exercidos no provete no decorrer do ensaio. Na figura 18 encontra-se uma imagem foto realista da modelação em CAD da MEF com os seus principais componentes.



Figura 18 – Imagem foto realista da modelação 3D da MEF no início do presente estudo.

Neste capítulo serão então abordadas as diferentes intervenções mecânicas realizadas ao longo deste trabalho de investigação e apresentadas algumas soluções intermédias até à versão final da MEF.

2.1.1.3 Motivação científica

Foram diversas as motivações e interesses que impulsionaram este projeto, mas nenhuma outra guiou este trabalho e esteve tão presente como a busca do conhecimento científico, numa perspetiva mais geral. Para compreender melhor de que maneira este objetivo poderia contribuir para o projeto (no tipo de intervenções a realizar na MEF, na metodologia dos ensaios, na abordagem aos resultados, entre outros), foi necessário recuar até às suas origens, estudar os seus princípios e analisar os elementos e aspetos que o constituem – entender a sua essência.

Remontando ao século XVII, e a fim de se produzir conhecimento dito científico, o físico Isaac Newton desenvolveu empiricamente uma metodologia – com origem no pensamento do filósofo Descartes – que propunha chegar à verdade através da dúvida sistemática e da decomposição do problema em pequenas partes. Nasceram, deste modo, as bases do método científico, que passa por compreender, inicialmente, os sistemas mais simples e por ir incorporando gradualmente novas variáveis até à descrição do todo.

Neste sentido, tornou-se essencial a compreensão de vários pilares deste trabalho – teoria de flexão de vigas, fadiga de materiais, materiais compósitos, modos de sollicitação, criação e propagação de fendas, influência de defeitos, taxas de libertação de energia, Lei de Paris, entre muitos outros – para uma caracterização mais precisa e realista do fenómeno em estudo, a delaminação de materiais compósitos sob fadiga.

Ao longo dos anos, vários foram os princípios adicionados à metodologia científica, tal como a necessidade de verificação, o método indutivo, a refutabilidade, entre outros, que se juntaram a alguns outros elementos que já a compunham, como a experimentação (quantificações, observações e medidas), as hipóteses (explicações hipotéticas das observações) e as previsões (deduções lógicas das hipóteses).

No âmbito deste capítulo é, ainda, importante salientar alguns aspetos característicos do método científico: a observação sistemática e controlada (simples ou com recurso a instrumentos); a descrição (a experiência tem que ser replicável e os factos verificados); a previsão (as hipóteses têm que ser válidas para observações realizadas no passado, no presente e no futuro); e o controlo (para maior segurança nas conclusões, a experiência deve ser controlada e utilizar técnicas que maximizem a rejeição de variáveis que possam mascarar os resultados).

Para garantir a validade dos resultados obtidos pela MEF e a legitimidade dos estudos realizados, foi necessário efetuar uma identificação dos problemas existentes na máquina, que pusessem em causa a não verificação de algum dos aspetos do método científico, e desenvolver soluções para corrigir estas eventuais falhas.

2.1.2 Identificação de problemas

A realização de alguns testes funcionais de diagnóstico à MEF permitiu identificar prontamente a existência de um problema crítico, cuja resolução implicaria alterações conceptuais significativas. Sendo a MEF um instrumento de medição experimental, a presença de folgas apreciáveis que provocam oscilações era, evidentemente, inadmissíveis. De facto, verificou-se com um comparador, e a olho nu, que a plataforma móvel apresentava mais graus de liberdade do que o projetado, provenientes de uma folga radial existente entre as porcas de transmissão de movimento na plataforma e os fusos (figuras 19 e 20).

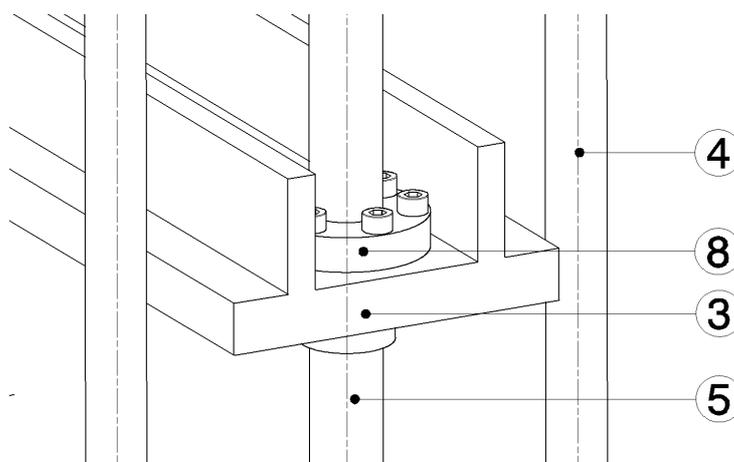


Figura 19 – Imagem CAD da ligação porca/fuso: 3 - plataforma; 4 - varão de suporte; 5 - fuso; 8 - porca trapezoidal.

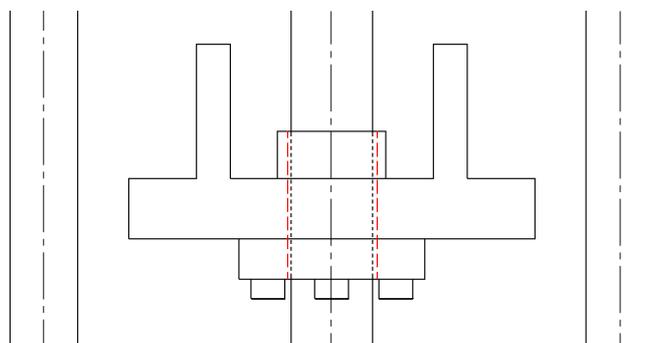


Figura 20 – Vista lateral da plataforma e da folga existente entre o fuso e a porca.

Devido ao facto de os dois pares porca/fuso serem o único guiamento existente na translação da plataforma, a diferença acentuada entre a dureza dos materiais – plástico na porca e aço C15 no fuso – levou a um desgaste acelerado e prematuro da parede interna das porcas, aumentando consideravelmente o seu diâmetro interno. Apesar de ainda conseguirem desempenhar com eficácia a sua função, enquanto conversores de movimento rotativo em linear, a sua capacidade de guiamento foi-se degradando com o evoluir dos ensaios realizados. Na figura 21, é possível verificar como a existência desta folga radial permite a rotação da plataforma móvel

(em torno de ambos os eixos horizontais) e o aparecimento consequente de oscilações durante os ensaios.

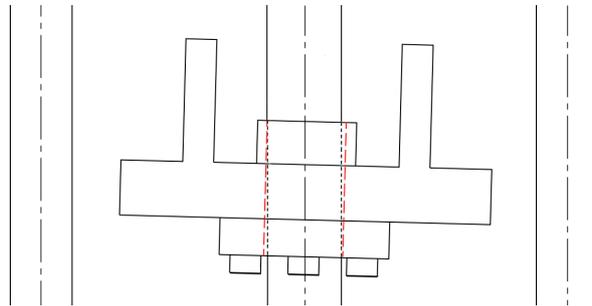


Figura 21– Vista lateral da plataforma, da folga existente e da possível rotação em torno de um dos eixos horizontais.

Este fenómeno já tinha sido documentado pelo Mestre Pedro Carvalho em 2012, o qual ainda sugeriu a substituição destas porcas no capítulo da sua dissertação reservado a trabalhos futuros na MEF (Carvalho, 2012). Apesar dessa substituição devolver as tolerâncias dimensionais e geométricas, originalmente projetadas e o correto guiamento da plataforma móvel, esta só poderia ser levada em conta como uma solução temporária, uma vez que com a passagem do tempo, o problema tornaria a reincidir.

O facto destas oscilações colocarem em causa a legitimidade dos resultados obtidos, e de não verificarem a existência de alguns aspetos básicos do método científico, como a observação sistemática e controlada e a previsão, levou a que fosse considerado como um problema incontornável. A busca de uma solução tornou-se assim uma necessidade premente.

2.1.3 Intervenções mecânicas

2.1.3.1 Soluções Intermédias

2.1.3.1.1 Porcas duplas

Após a identificação do problema foram consideradas várias soluções, desde pequenas intervenções, até alterações complexas que implicariam construção de novos elementos estruturais. A limitação orçamental, a dependência de fornecedores, o tempo de execução e a simplicidade da solução arranjada, foram os principais fatores na triagem das soluções.

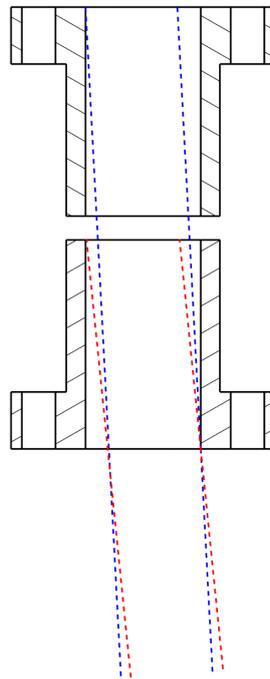


Figura 22 – Figura ilustrativa da diminuição do ângulo máximo de rotação em função da altura das porcas: o ângulo máximo permitido com apenas uma porca (vermelho); o ângulo máximo permitido com recurso a duas porcas (azul).

A solução escolhida acabou por ser o aumento da área de contacto entre o fusão e a porca, de modo a diminuir as tensões responsáveis pela deformação do plástico e pela criação da folga, e a reduzir o ângulo máximo de inclinação do fusão (figura 22).

O aumento da área de contacto entre os elementos podia ser conseguido de diversas formas. Com o de minimizar o custo da solução, optou-se por manter os fusos e por recorrer a um conjunto de duas porcas por fusão. Deste modo conseguir-se-ia duplicar a área de contacto, reduzindo teoricamente para metade as tensões envolvidas, prolongando assim o tempo de vida da solução e aumentando o período entre manutenções da MEF.

Além disso, a utilização de duas porcas por fuso iria aumentar o comprimento de contacto entre os elementos em questão, limitando o ângulo máximo de rotação possível entre estes, comparativamente à solução de uma só porca por fuso, algo demonstrável matematicamente, com recurso a trigonometria. Esta redução na amplitude de movimentos seria ainda responsável por uma atenuação significativa nas oscilações da plataforma móvel, solucionando quase por completo o único problema crítico da MEF.

Com vista à materialização do conceito da utilização de duas porcas trapezoidais por fuso, foram então desenvolvidas algumas soluções (figuras 23 e 24).

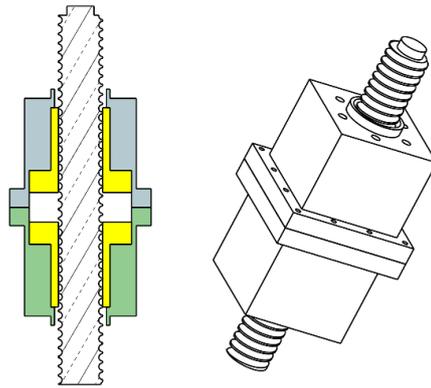


Figura 23 – Desenho técnico de uma solução rudimentar para um dispositivo que alberga duas porcas.

As soluções iniciais mostraram-se bastante rudimentares, verificando-se particulares dificuldades técnicas na gestão do espaço para as ligações aparafusadas entre as porcas e os dispositivos, e no processo de montagem dos diversos componentes dos mesmos.

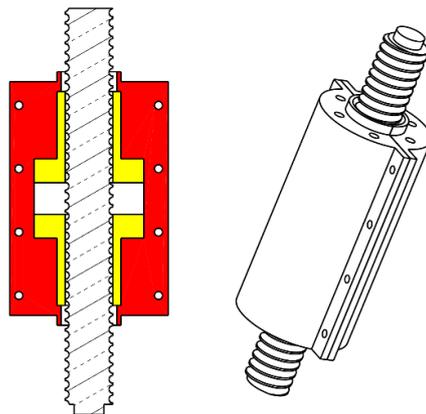


Figura 24 – Esquema técnico de outra possível solução de um dispositivo que aloja duas porcas.

O conceito foi, então, maturado e um novo dispositivo foi desenvolvido (figura 25). Este era composto por dois elementos: um inferior, com forma tubular, que alojava as duas porcas;

e um superior, tipo tampa, responsável pela ligação com plataforma móvel. A geometria da peça foi concebida a pensar numa montagem simples dos seus componentes, existindo espaço para parafusos corretamente dimensionados e acesso desimpedido ao interior do dispositivo, para uma manutenção pouco morosa e não complexa.

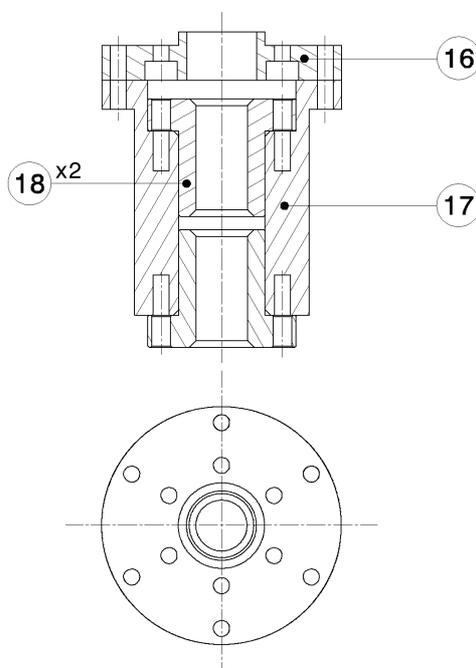


Figura 25 – Desenho técnico do dispositivo: 16– elemento superior; 17– adaptador superior; 18– porca trapezoidal.

Apesar de, aparentemente, esta solução ser viável na resolução do problema da folga, e dos desenhos técnicos do dispositivo já se encontrarem concluídos e prontos para serem entregues para produção, a constatação da existência de empenos nos fusos levou ao surgimento de diversas dúvidas relativas à implementação desta solução. As oscilações observadas durante o movimento da plataforma eram agora provenientes de duas origens distintas: das folgas radiais já descritas e do empeno dos fusos. A resolução de apenas uma destas questões seria insuficiente e infrutífera, relativamente à qualidade pretendida para os resultados a obter durante os ensaios.

Foi, então, ponderada a hipótese de substituição dos fusos juntamente com a aplicação deste dispositivo. No entanto, os custos associados a estas alterações e o facto de não garantirem a não reincidência dos problemas já existentes, motivaram o desenvolvimento de uma solução alternativa e mais robusta.

2.1.3.1.2 Guiamento através de varões

Na tentativa de resolver ambos os problemas – as oscilações causadas pelas folgas e pelo empeno dos fusos – com uma única solução, foi projetado um novo dispositivo que tinha

como característica principal o correto guiamento da plataforma. A ideia passava por conferir aos fusos apenas a função de transmissão de movimento, enquanto o guiamento (que era originalmente garantido por estes) seria assegurado por outros elementos. Os quatro varões metálicos já existentes, responsáveis pelo suporte das mesas superior e inferior, apresentavam as características principais para desempenhar esta função, sendo apenas necessário adaptar a plataforma móvel para que os fusos a atravessassem (figura 26).

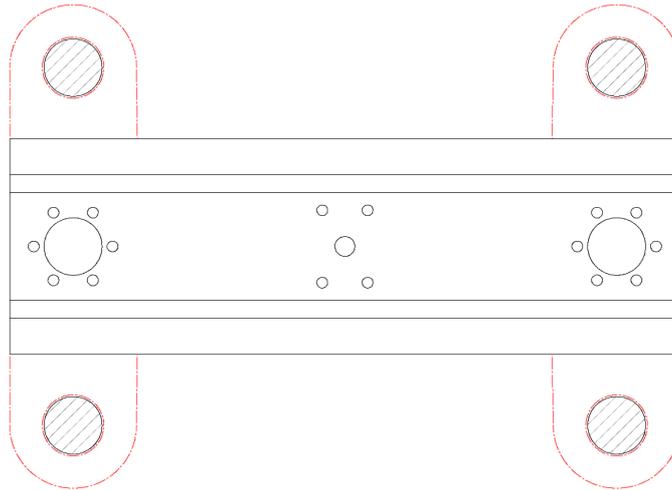


Figura 26 – Vista superior da plataforma: a plataforma e os varões existentes (preto); as possíveis adaptações para englobar os varões no guiamento da plataforma (vermelho).

Sendo os varões de suporte elementos estáticos, compostos por materiais resistentes e sujeitos a esforços relativamente reduzidos e com o correto dimensionamento das adaptações a realizar na plataforma e das tolerâncias radiais entre estas e os varões, seria possível eliminar as oscilações existentes e obter um guiamento da plataforma bastante satisfatório. Ao manter os conjuntos de fusos e porcas existentes, e as respectivas folgas entre estes, consegue-se ainda, no plano horizontal, concentrar as forças de guiamento junto dos varões, libertando as porcas e os fusos desta sua tarefa original. Já no plano vertical seria essencial que o inverso se verificasse, isto é, que as forças verticais se concentrassem, maioritariamente, nos conjuntos fuso/porca de forma a que o movimento da plataforma fosse fluído e para que não apresentasse um esforço adicional para o motor.

Conclui-se desta forma que o sucesso desta solução dependeria, fundamentalmente, de um correto e equilibrado dimensionamento de tolerâncias entre a plataforma e os varões – rigoroso o suficiente para garantir um guiamento eficaz da plataforma, mas suficientemente tolerante de modo a que o atrito entre os elementos não dificultasse a mobilidade da mesma.

Tendo em conta esta ideia e a dificuldade em garantir o alinhamento entre elementos ligados (ligações aparafusadas ou soldadas necessárias entre a plataforma original e as adaptações a realizar), optou-se por construir uma nova plataforma.

2.1.3.2 Solução final

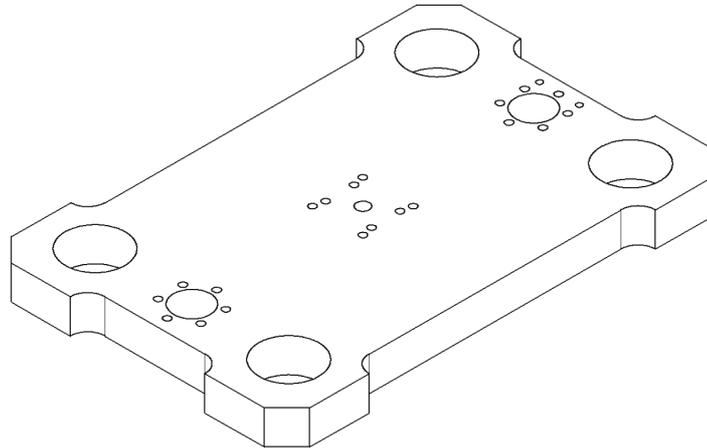


Figura 27 – Vista isométrica da plataforma em alumínio.

Feita totalmente a partir de um monobloco de duralumínio e com as principais características da sua antecessora, esta nova plataforma já contemplava as novas adaptações, respeitando ainda todas as tolerâncias dimensionais e geométricas exigidas, não apresentando assim partes móveis nem quaisquer tipo de ligações entre elementos (figura 27). Aproveitou-se para introduzir algumas alterações significativas, como o aumento da espessura da plataforma para 30mm, conferindo maior resistência à flexão, a mudança do material utilizado e a realização de alguns entalhes estratégicos, para redução de massa.

Todas as operações de maquinagem da nova plataforma foram realizadas nas oficinas do DEM, com recurso a um centro de maquinagem CNC (Mikron VCE 500) (figura 28).



Figura 28 – Maquinagem da plataforma no centro de maquinagem CNC (esquerda); plataforma em alumínio já concluída (direita).

Apesar de já existirem varões em ferro para o suporte das mesas, optou-se pela sua substituição, uma vez ser necessária uma interação de baixo atrito entre os varões e os casquilhos deslizantes a colocar na plataforma. Para o conjunto varões/casquilhos deslizantes foi escolhida uma solução sem manutenção, na qual foram utilizados varões de aço (RK 418) cromado duro com 25mm de diâmetro, e casquilhos deslizantes auto lubrificantes, de corpo metálico com revestimento em PTFE (Poli-tetra-fluoro-etileno), tipo INA PAP P10, com o mesmo diâmetro interno e 50 mm de altura (BSC, 2012) (figura 29).

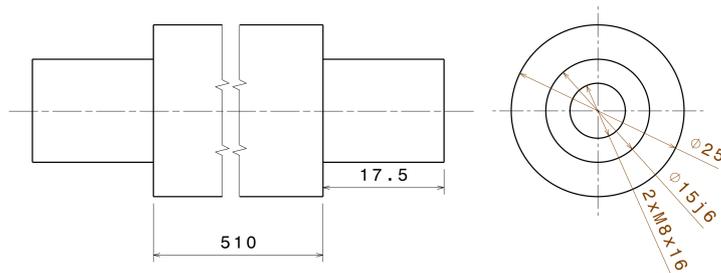


Figura 29 – Vista superior (direita) e lateral (esquerda) dos varões em aço cromado duro.

Após consultar diversos fornecedores para a aquisição dos varões, optou-se pelo que apresentou o orçamento economicamente mais viável. Apesar de já virem com as dimensões nominais requeridas, foi necessário recorrer a um torno mecânico convencional (Pinacho S-90/200) das oficinas do DEM para maquinar as suas extremidades (figura 30). Desta forma foi possível obter uma ligação coesa entre os elementos (varões e mesas superior e inferior) e uma estrutura rígida.

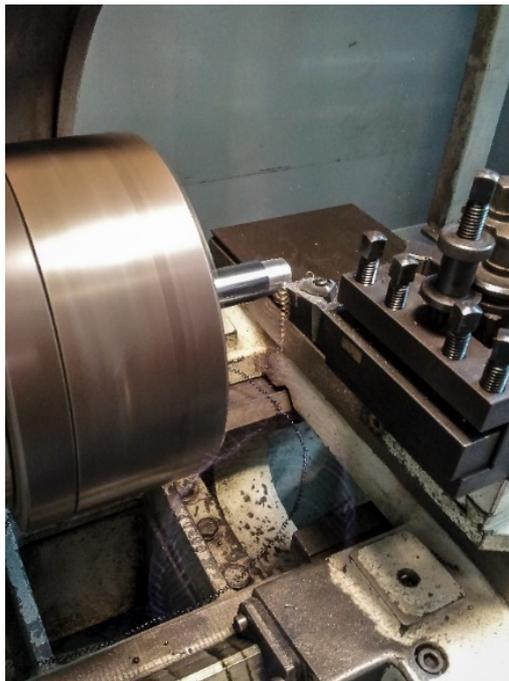


Figura 30 – Maquinagem das extremidades dos varões em torno convencional.

Tendo como objetivo principal o guiamento eficaz da plataforma, optou-se pelo aumento da área de contacto entre os casquilhos e os varões, como explicado anteriormente. Isto foi conseguido com o recurso a casquilhos deslizantes com 50 mm de altura (comparativamente aos 30mm de altura da plataforma). Apesar de estes serem enviados pelo fornecedor prontos a instalar, a diferença entre alturas levou a que fosse necessário utilizar casquilhos adaptadores para a sua aplicação na plataforma. Desta forma foram projetados e construídos 4 casquilhos adaptadores, um para cada varão, em duralumínio (figura 31).

Estes casquilhos adaptadores permitiram alojar no seu interior os casquilhos deslizantes em toda a sua altura, tendo sido os primeiros aplicados na plataforma. Foi necessário recorrer a uma prensa hidráulica para montagem dos diferentes elementos em questão, uma vez não existirem quaisquer tipos de folgas entre os diâmetros internos dos casquilhos adaptadores e externos dos casquilhos deslizantes. A flange externa existente nos casquilhos adaptadores permitia ainda o travamento destes durante os movimentos de ascensão da plataforma, tendo sido necessário procurar uma solução para a fixação dos mesmos durante o movimento inverso (figura 32).

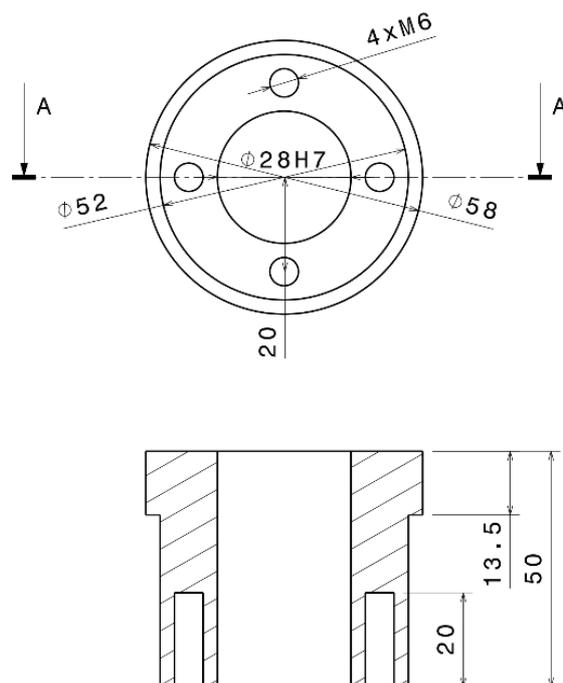


Figura 31 – Vistas bidimensionais de um casquilho adaptador.

Em resposta a este problema, foi criada uma tampa que, através de uma ligação aparafusada na extremidade inferior do casquilho adaptador, traciona este no sentido da plataforma, proporcionando assim o travamento pretendido nos movimentos descendentes da plataforma.

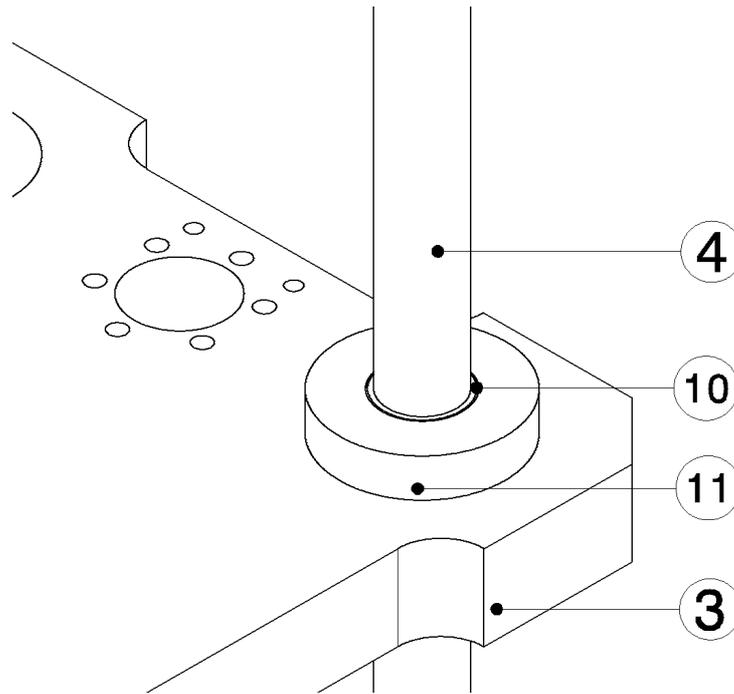


Figura 32 – Vista isométrica superior da plataforma e restantes componentes: 4- varão; 3- plataforma; 10- casquilho deslizante; 11- casquilho adaptador.

Desta forma foi possível obter a imobilização dos casquilhos, garantindo o funcionamento conjunto dos diferentes elementos e reduzindo, conseqüentemente, o aparecimento de eventuais folgas (figura 33).

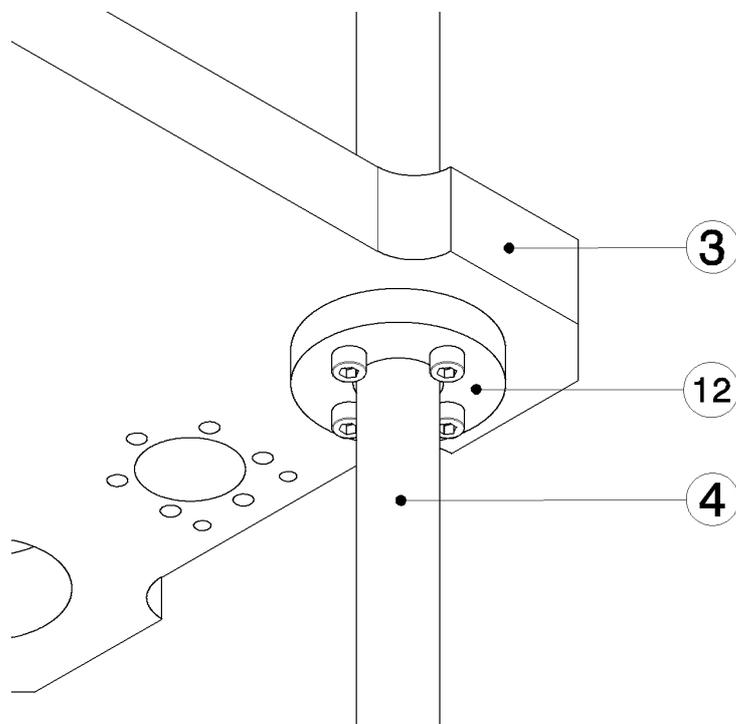


Figura 33 – Vista isométrica inferior da plataforma e restantes componentes: 3- plataforma; 4- varão; 12- tampa do casquilho adaptador.

A construção dos casquilhos adaptadores e das respetivas tampas foi também realizada nas oficinas do DEM com recurso ao centro de maquinagem CNC já referido (figura 34).



Figura 34 – Conjunto da plataforma, porcas e casquilhos por montar.

Após a sua construção, todos os elementos foram montados nas suas posições finais e foi verificada a existência de eventuais folgas (figura 35).



Figura 35 – Estrutura final da MEF já concluída.

Para a verificação da viabilidade e do sucesso das intervenções efetuadas, foram levados a cabo diversos testes, que incidiram nas questões já identificadas anteriormente. Foram realizados testes de mobilidade nos quais o motor elétrico foi acoplado aos fusos que movimentaram com sucesso o sistema. Verificou-se uma mobilidade fluida da plataforma ao longo de todo curso disponível, inclusivamente sobre carga, confirmando a existência de níveis reduzidos de atrito entre os varões e os casquilhos deslizantes, como pretendido. A inexistência de folgas significativas foi, ainda, comprovada com alguns ensaios e com recurso a um comparador, responsável por medir as oscilações na plataforma durante estes.

Numa primeira análise, todas as soluções e medidas tomadas colmataram os problemas identificados na versão original da MEF. Contudo, apenas o tempo e a utilização poderiam confirmar o sucesso destas intervenções.

2.1.3.3-Outras alterações

2.1.3.3.1-Apoio do sensor ótico

Salvo raras exceções, apenas são efetuadas intervenções num projeto quando a solução original apresenta algum tipo de problema, ou quando a solução alternativa apresenta algum tipo de melhoria. A alteração levada a cabo no sensor ótico enquadra-se nas exceções, tendo sido motivada por modificações do *layout* da MEF e não por qualquer melhoria ou resolução de problema na solução original.

Na versão anterior da MEF, o sistema ótico era responsável pela monitorização ativa da posição da plataforma. Era composto por um perfil de alumínio com um apoio e um pino como referência fixa, e um sensor ótico diretamente aparafusado a uma das extremidades da plataforma. O sistema conseguia determinar, com relativo sucesso, a posição da plataforma, através da interrupção cíclica do feixe de luz do sensor ótico provocada pela passagem do pino fixo (figura 36).

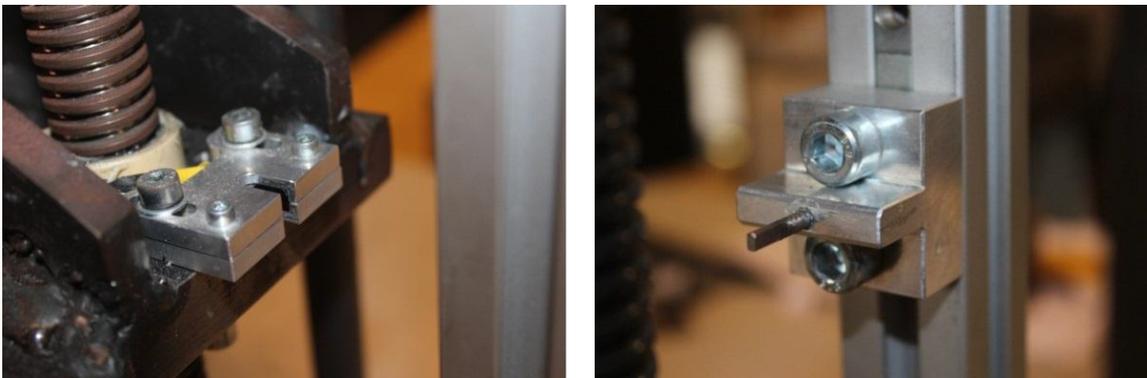


Figura 36 – Sistema ótico original: sensor ótico móvel (esquerda); perfil de alumínio, apoio e pino (direita).

Para a alimentação e comunicação com o sensor ótico era utilizada uma ligação elétrica que, como é possível observar a amarelo na figura 36 à esquerda, passava entre uma das paredes verticais da plataforma e o topo da porca trapezoidal. Desta forma impedia-se o contacto entre a ligação elétrica e algumas partes móveis da MEF, evitando assim o desgaste do cabo e outras eventuais complicações.

-No planeamento da conversão para a plataforma em duralumínio, este pormenor passou despercebido. Só se notou o problema quando se montou o sensor na plataforma. O facto de ter 30mm de espessura, o dobro da plataforma original, levou a que o topo da porca

trapezoidal ficasse totalmente inserido na plataforma, expondo por completo o fuso à ligação elétrica do sensor. Dado o sistema original se encontrar perfeitamente alinhado com os fusos, incluindo a sua componente fixa (perfil de alumínio, suporte e pino), e o espaço disponível entre os componentes ser bastante reduzido, foi necessário projetar uma nova solução, que impedisse o contacto entre a ligação elétrica do sensor e o fuso.

A solução passou por deslocar lateralmente todo o sistema – tanto a componente móvel como a fixa – para uma zona onde o fuso não obstruísse a passagem da ligação elétrica do sensor. Isto foi conseguido através da construção de um apoio para o sensor em duralumínio, que utilizava a furação original do sensor na plataforma para se acoplar e um conjunto de furos na sua extremidade oposta para a nova localização do sensor ótico (figura 37). Por último, o perfil de alumínio e o pino tiveram que ser movidos em conformidade com o novo posicionamento do sensor, tendo sido necessário efetuar dois novos furos na mesa inferior e superior para o seu apoio.

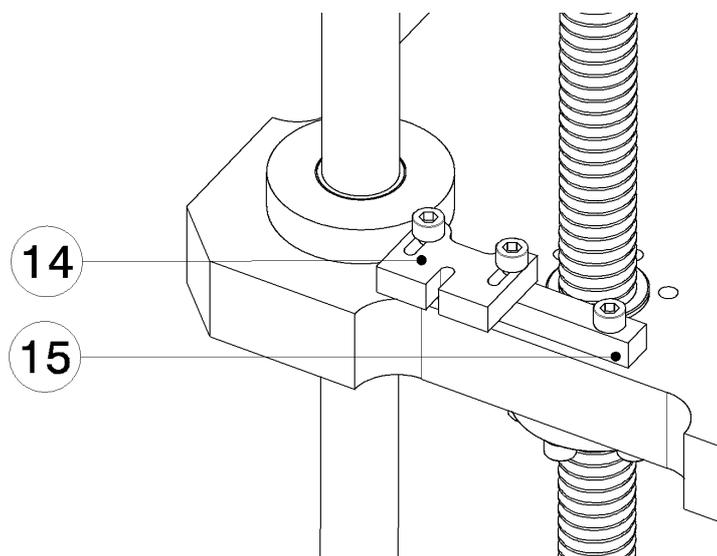


Figura 37 – Solução final para o sistema ótico: 14- sensor ótico; 15 –apoio do sensor.

Após calibrar o sistema na sua nova disposição e verificar que o feixe de luz do sensor era interrompido pelo pino ao longo de todo o curso possível da plataforma, foi traçada uma trajetória desobstruída para a passagem da ligação elétrica até ao PC, tendo esta sido fixa à plataforma, através de abraçadeiras. Esta solução permitiu a utilização do mesmo sistema de monitorização da posição, na nova plataforma. Apesar de não apresentar nenhuma melhoria significativa, relativamente à versão original, a passagem do cabo do sensor até ao PC ficou facilitada.

2.1.3.3.2 Acessórios da célula de carga

Independente de se terem realizado diversas alterações significativas na MEF, o conceito original para obtenção de dados manteve-se. O recurso a uma célula de carga, localizada entre a plataforma e o provete em estudo, continuou a ser o método utilizado para obtenção dos valores de força exercida ao longo dos ensaios.

Passamos a apresentar as alterações introduzidas na MEF, em relação aos acessórios da célula de carga.

Na versão anterior da MEF, era utilizada uma célula de carga do tipo "S", em conjunto com um adaptador superior em plástico, cuja função era permitir o acoplamento entre esta e a plataforma, e o seu isolamento elétrico de qualquer eventual ruído existente na estrutura da MEF. Já na versão atual da MEF, optou-se por não recorrer a nenhum dos dois elementos: a célula de carga tipo "S" foi substituída por uma célula modelo "disco"; o adaptador isolante foi dispensado pelo facto da plataforma já contemplar um conjunto de furações para diferentes tipos de células de carga, e por se ter conseguido mitigar, consideravelmente, os efeitos indesejáveis do ruído na MEF.

Deste modo, a célula de carga encontra-se, atualmente, instalada na parte inferior da plataforma, através de uma ligação aparafusada, o que constitui uma solução mais apropriada do que a versão anterior. De facto, não só o material da plataforma é mais rígido do que o do adaptador isolante, e a área de contacto entre elementos é consideravelmente superior na solução atual, resultando em deformações inferiores.

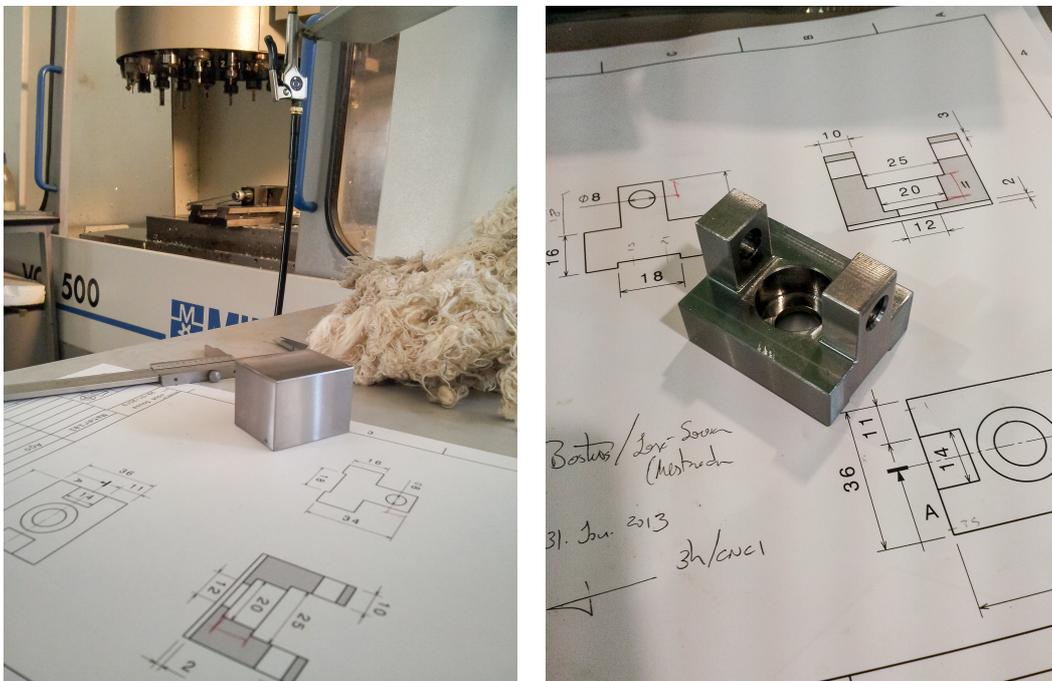


Figura 38 – Construção do suporte para célula de carga modelo "disco": não maquinada (esquerda); maquinada (direita).

Por se ter recorrido a uma célula de carga diferente da original, foi necessário rever, para além da superfície de ligação com a plataforma, a sua extremidade oposta, que é a de transmissão de força para o provete. Para os ensaios em modo II (ENF) era utilizado um suporte com uma base retangular, que permitia o seu encaixe na superfície inferior da célula tipo "S", e um pino com 8mm de diâmetro no lado oposto, responsável pela transmissão de força para o provete. Visto a extremidade inferior da célula de carga modelo "disco" ser circular, e não retangular, houve a necessidade de criar um novo suporte que desempenhasse a mesma função (figura 38). Este foi construído em aço DIN ck45 com recurso ao mesmo centro de maquinagem CNC utilizado na construção dos restantes elementos.

O furo central (passante) existente no suporte permitiu, através de uma ligação aparafusada, o seu acoplamento à célula de carga (roscada) sem qualquer tipo de folga. O mesmo se verificou com as duas furações laterais do suporte, que, por terem sido dimensionadas com o mesmo diâmetro nominal que o pino utilizado, possibilitaram um encaixe sem folgas, entre estes elementos.

Numa configuração típica de um ensaio ENF, é requerido que o movimento transmitido ao provete seja aplicado perpendicularmente ao comprimento deste. De outro modo, a distribuição indevida da carga imposta pelo pino irá induzir momentos no provete, resultando numa torção do mesmo, e sujeitando-o a outros modos de solitação que não apenas o modo II. Apesar do suporte estar aparafusado à célula de carga, e de esta se encontrar fixa à plataforma, esta configuração, só por si, não garante a satisfação da condição já referida para um ensaio ENF, ou seja, a ligação aparafusada central entre os elementos não impede a rotação dos mesmos, não assegurando assim uma aplicação correta da força no provete.

Com este problema em vista, optou-se por uma solução que passou por uma intervenção nos dois componentes em questão: em vez de existir apenas contacto entre as extremidades inferior da célula de carga e superior do suporte, os componentes foram alterados de modo a existir, também, contacto entre as suas superfícies laterais, o que impede a rotação do suporte sob a célula de carga. Para isso, foi criada uma caixa retangular com 2mm de profundidade, no suporte, onde a extremidade da célula de carga iria agora encaixar. Devido à forma cilíndrica da célula, foi ainda necessário efetuar um rasgo lateral para que apresentasse uma superfície de contacto plana. Deste modo, conseguiu-se criar um encaixe, em vez de um encosto, entre os elementos, garantido uma correta aplicação da força da MEF no provete (figura 39).

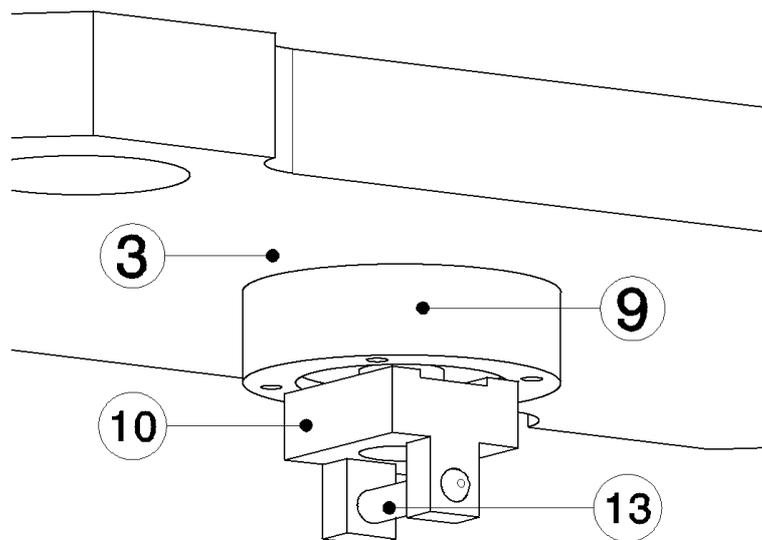


Figura 39 – Sistema final de transmissão de força: 3 - plataforma; 9 - célula de carga; 10 - adaptador; 13 - pino de carregamento do provete.

Esta configuração possibilitou não apenas uma transmissão integral do movimento de translação da plataforma para o provete, dado não existirem folgas entre os elementos, nem deformação significativa dos mesmos, como também um registo eficaz das forças envolvidas ao longo dos ensaios.

Com esta alteração, deu-se por concluída a fase das intervenções mecânicas na MEF, dando início a uma nova etapa do projeto, as alterações eletrónicas.

Na versão original optou-se pela colocação de uma resistência fixa de 120 Ohms, que conferiu ao INA125 um ganho fixo de 500 vezes, amplificando o diferencial de 20mV para 10V. Como já foi referido, este sinal analógico é convertido, posteriormente, em digital pelo ADC (*Analog-to-Digital Converter*) do Arduino, que aceita, no máximo, metade destes 10V (0-5V), correspondentes a metade da capacidade máxima da célula de carga (5kN). Tendo em conta que, para esta conversão em sinal digital, são utilizados 10 *bits*, pode-se calcular um valor fixo de resolução máxima deste *setup* de 4,88N, por cada um dos 1024 valores (figura 41).

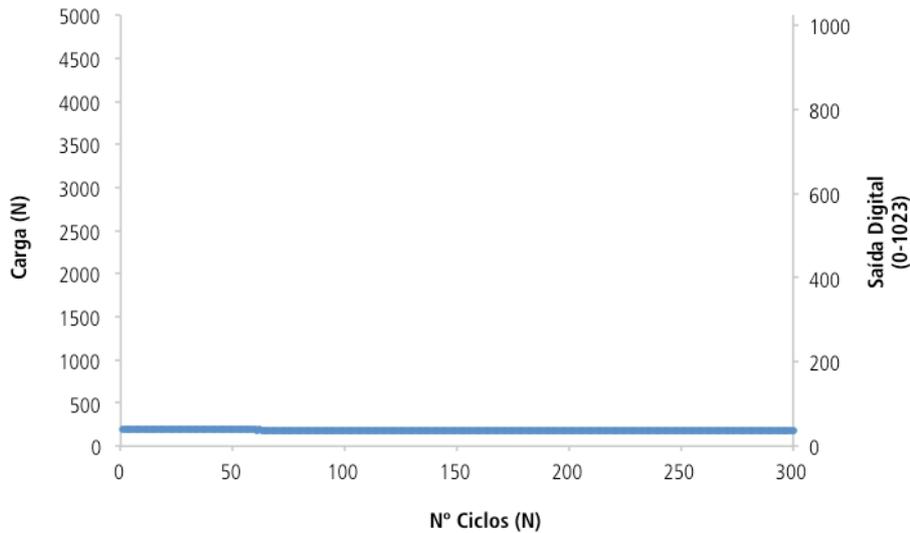


Figura 41 – Representação gráfica da resolução obtida com a célula de carga original de 10kN e um ganho de 500 vezes no INA 125, durante um ensaio experimental de 300 ciclos.

Ao analisar estes dados concluiu-se que existia uma margem significativa para otimização do sistema, não só na melhoria da sua resolução, mas também da sua versatilidade.

O facto de apenas se conseguirem medir variações mínimas de aproximadamente 5N revelou-se problemático, especialmente porque se sabia que as forças envolvidas nos ensaios a provetes de carbono em modo II raramente ultrapassariam os 300N. Com esta limitação em vista, procedeu-se à primeira intervenção eletrónica na MEF, substituindo a célula de carga tipo “S” de 10kN por uma modelo “disco” com capacidade máxima de 500N, (anexo A), aumentando consideravelmente a resolução da amostragem (figura 42 e Cf. no Anexo A – Características da célula de carga tipo “disco”, de acordo com o fabricante).

A utilização inicial da célula “S” devia-se essencialmente a questões financeiras. De facto, uma célula “disco” é, habitualmente, mais cara que uma “S”, mas apresenta maior robustez perante solicitações laterais devidas a erros de fixação ou acidentes durante os ensaios. No entanto, para pequenas cargas (por exemplo de 500N), o custo das células é idêntico, pelo que a substituição da configuração “S” para “disco” tornou-se óbvia.



Figura 42 – Célula de carga tipo “disco”.

O facto do ganho de amplificação do INA125 depender, unicamente, de uma resistência fixa soldada no circuito, tornava impossível o seu ajuste em função da célula de carga utilizada e das necessidades dos ensaios. Desta forma, optou-se por substituir a resistência de 120 Ohm por um potenciômetro de resistência variável até 1kOhm, possibilitando um ajuste rápido e fácil do ganho, tornando a MEF mais versátil.

Esta nova configuração, e definido um ganho de 250 vezes no INA125, permitiu utilizar toda a capacidade da célula de carga (500N) e obter uma resolução 10 vezes superior à conseguida inicialmente (0,488N/valor), o equivalente a conseguir medir variações mínimas de força de aproximadamente 0,5N durante um ensaio.

Apesar das forças máximas envolvidas nos ensaios ENF realizados em provetes de carbono raramente terem ultrapassado os 300N (figura 43), as suas variações ao longo de todo o ensaio podem ser relativamente pequenas.

Analisando o gráfico da figura 43, é possível notar um aumento significativo da resolução do sistema de amostragem utilizado, que é uma ordem de grandeza superior ao sistema original, e também, identificar melhor a relação inversamente proporcional existente entre a força e o número de ciclos, comportamento típico e esperado neste tipo de ensaios. Um eventual reajuste do ganho poderia produzir uma análise ainda mais incisiva e detalhada sobre as forças em estudo, ao aumentar consideravelmente a resolução do sistema concebido.

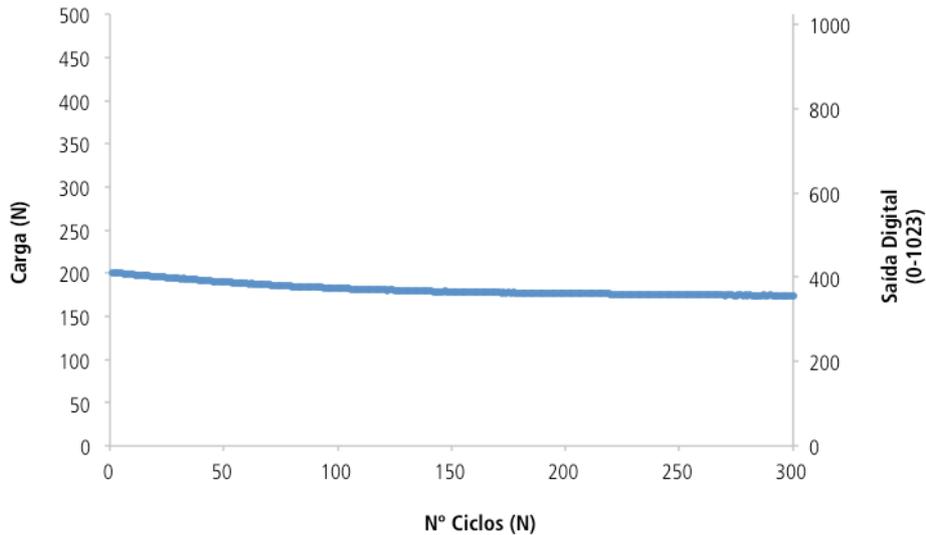


Figura 43 – Representação gráfica da resolução obtida com um ganho de 250 vezes e a nova célula de 0,5kN.

2.2.2 Offset

Recorrendo a uma analogia matemática, pode-se verificar que, não só o ganho e o *offset* têm um papel fundamental na preparação e no sucesso de um ensaio, como também devem ter um carácter variável, ao contrário do que estava originalmente implementado na MEF. A equação reduzida de uma reta pode ser descrita por

$$y = mx + b \quad (4)$$

se y representar o sinal analógico de entrada no Arduino ([0-5]V) e x o sinal analógico proveniente da célula de carga ([0-20]mV ou [0-500]N), então m representa o ganho, factor responsável pelo tamanho do intervalo de valores de célula de carga (x) a ser convertido em sinal digital (y). Graficamente, uma alteração no ganho do INA125 corresponde a um aumento ou redução do intervalo de forças amostradas (figura 44).

Apesar do sistema beneficiar bastante com um reajuste no poder de amplificação do INA125 para 2500 vezes, é possível verificar que, para valores elevados de ampliação, existe o risco da gama de forças registadas pela célula de carga ser superior ao tamanho do intervalo de valores a serem convertidos ou, como no caso da figura 44, estarem apenas desfasados.

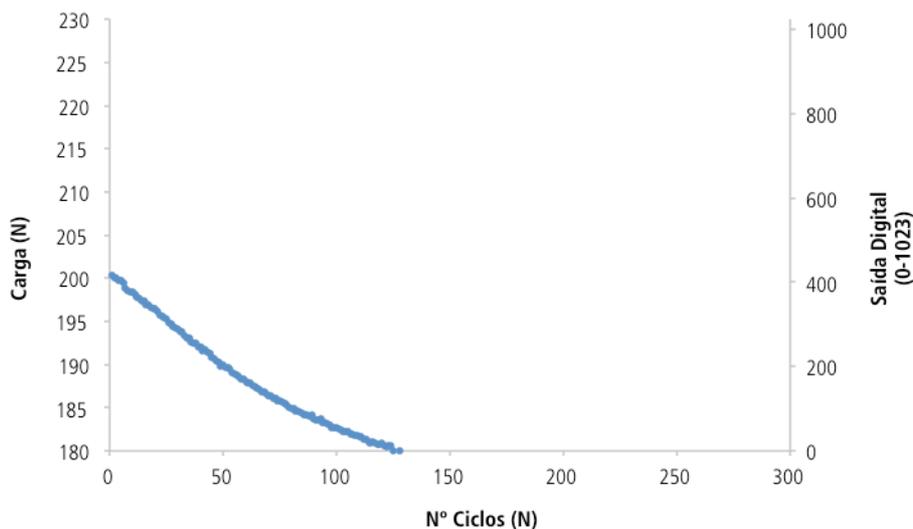


Figura 44 – Representação gráfica dos efeitos de um aumento de 10 vezes no ganho (2500 vezes) do INA125.

Do mesmo modo que, na equação (4), a constante m corresponde ao ganho, b representa o *offset*, fator que situa este intervalo (mx) dentro de toda a gama de valores da célula de carga (x). Graficamente, uma alteração no *offset* traduz-se numa translação vertical do intervalo em questão, como é possível verificar na figura 45.

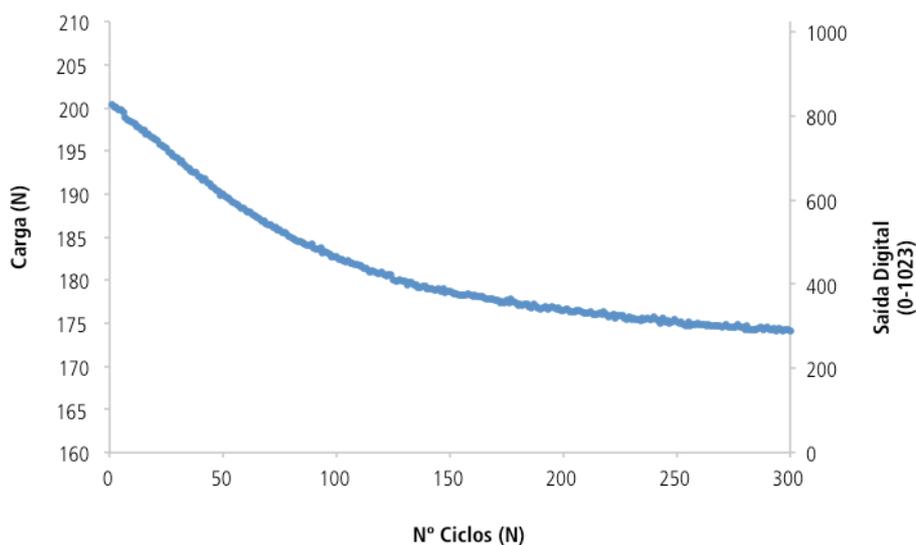


Figura 45 – Representação gráfica dos efeitos de uma correção negativa no *offset* no mesmo ensaio da figura 44.

É possível verificar, também, que um aumento da resolução em 100 vezes, relativamente à configuração original (para 0.0488N/valor) permitiria obter resultados bastante mais representativos das forças envolvidas, assim como dos fenómenos presentes neste tipo de ensaios. Para além do decréscimo da força registada ao longo do ensaio, é possível, agora,

descrever com precisão a curva associada a este decréscimo, essencial para cálculos posteriores de tamanhos efetivos de fenda, *compliance*, taxas de libertação de energia, entre outros.

Por conseguinte, tanto o ganho como o *offset* são parâmetros que devem ser escolhidos em conjunto, para otimização do sistema de registo de dados da MEF, a fim de se obterem resultados os mais fidedignos possíveis. De facto, basta haver alterações na espessura do provete ou nos deslocamentos impostos, para que os intervalos de carga se alterem significativamente, tornando convenientes correções do ganho e do *offset*, para melhor acomodar as necessidades do ensaio. É, portanto, altamente vantajoso que estes parâmetros sejam facilmente ajustáveis. Do mesmo modo que na versão original da MEF o ganho era fixo, também o *offset* se encontrava fixo e associado a uma resistência de 215kOhm, como é possível verificar na figura 46.

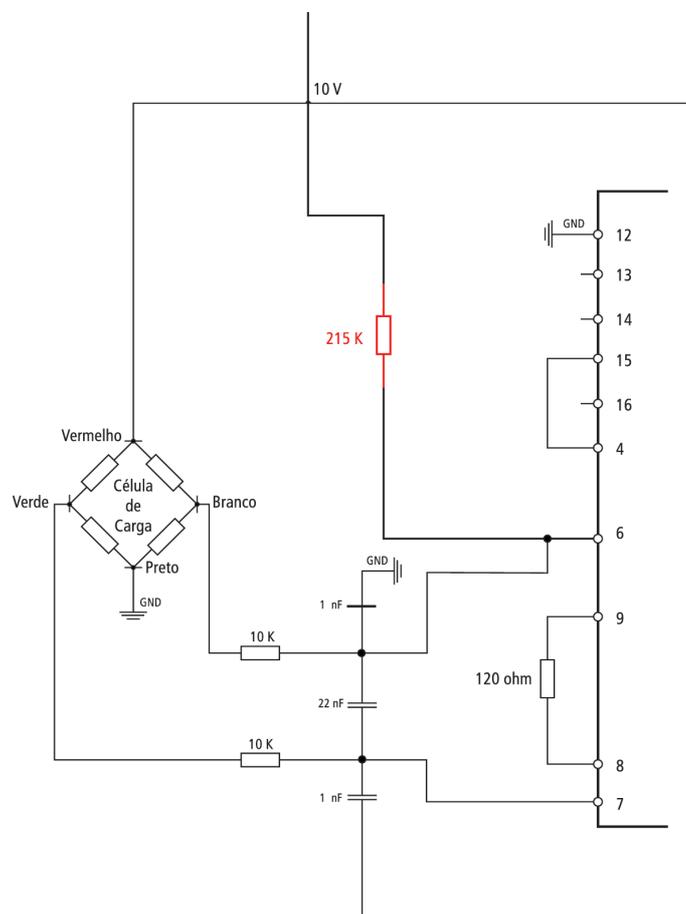


Figura 46 – Esquema parcial do circuito elétrico da MEF: Resistência de 215kOhm.

O objetivo desta resistência era reduzir uma tensão de 10V em apenas alguns microvolts que eram, posteriormente, injetados numa das “pernas” de saída da célula de carga, aumentando assim o diferencial entre as mesmas, criando o *offset*. Pelo facto do *offset* e do ganho estarem originalmente fixos, a MEF encontrava-se calibrada para ter o seu “zero carga” em torno do valor digital 512 (valor intermédio do sinal digital). Isto permitia ter duas janelas de igual tamanho, 512 valores, para ensaios de compressão ([512-1023]) e para os de tração ([0-512]), sem

ter que recorrer a alterações nas resistências do circuito. Apesar de esta solução inicial permitir realizar estes dois tipos de ensaios, não possibilitava o seu ajuste, o que nos parecia ser essencial.

Foram, então, ponderadas diversas hipóteses (nomeadamente o recurso a uma resistência variável idêntica à utilizada para o ajuste do ganho) com o mesmo princípio de funcionamento da solução original, a injeção de tensão numa das pernas de saída da célula de carga, para obtenção de um *offset* variável. Devido ao facto de se procurar um ajuste fácil e preciso, optou-se por recorrer à solução que, apesar de ser a mais complexa, era a que melhor satisfazia estas necessidades, o DAC.

2.2.2.1 DAC

Tecnicamente, um DAC (*Digital-to-Analogue Converter*) é um conversor de sinal digital em analógico. Na prática, esta conversão de sinal permite a interação entre computadores e sinais analógicos. Neste caso, a conversão da tensão a ser adicionada à perna da célula de carga para gerar o *offset*.

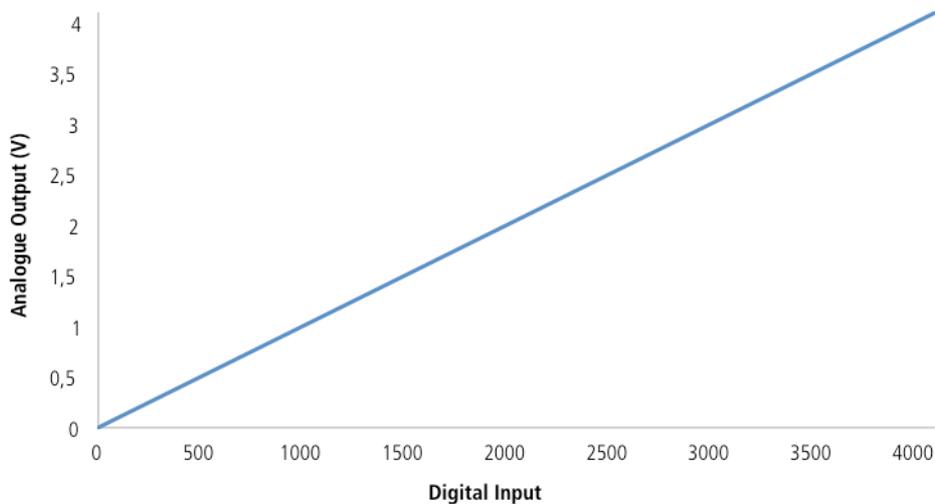


Figura 47 – Gráfico ilustrativo do comportamento de um DAC, onde é possível observar a relação entre a saída de tensão analógica em função da entrada digital comandada por computador.

Existindo no mercado uma panóplia de DACs para diversos fins e aplicações, foi necessário optar por um com as características adequadas às necessidades já referidas. Apesar da tensão a injetar à saída da célula de carga ser de aproximadamente 5V, as variações em torno deste valor, responsáveis pelo *offset*, são bastante inferiores, na casa dos microvolts. Por esta razão, foi dada uma importância especial à componente digital deste dispositivo, visto ser esta a principal responsável por conferir a resolução máxima do DAC.

2.2.2.2 Cálculo do número de *Bits*

Para o cálculo da resolução necessária - número de *bits* - do conversor digital-analógico, foram levados em conta alguns fatores, como a resolução conferida pelo ganho do INA125 e uma margem adicional de resolução, na eventualidade de se necessitar de uma maior sensibilidade, em eventuais alterações futuras. Visto a resolução do ganho do INA125 ($0.0488\text{N}/\text{valor}$) ser bastante satisfatória, optou-se por utilizar este valor como referência, não degradando a sensibilidade de medição do sistema, nem limitando a operacionalidade da MEF.

Sabendo que existe uma diferença de potencial à saída da célula de carga utilizada de 20mV, quando solicitada à sua capacidade máxima de 500N, e que esta apresenta um comportamento linear, é possível calcular uma variação mínima de, aproximadamente, 2 μV por cada 0.0488N de força aplicada. É obtido assim, através do quociente entre a tensão máxima de saída da célula de carga (20mV) e a variação mínima de tensão calculada ($1.952 \times 10^{-6}\text{V}$), um valor mínimo de 10246 níveis de quantização, correspondendo a pouco mais de 13 *bits* (8192 níveis). Existem no mercado DACs de 14 *bits* (16384 níveis), que satisfazem a condição de manter a resolução obtida pelo ganho do INA125. No entanto, não deixam uma margem satisfatória para uma eventual melhoria significativa de resolução, como é necessário no caso de serem utilizadas células com cargas nominais superiores. Apesar de existirem soluções de 16, 20 e até 24 *bits* (com mais de 16 milhões de níveis de quantização), os seus custos de aquisição são relativamente elevados. Optou-se, assim, por recorrer a uma solução economicamente mais viável e com características e capacidades semelhantes às dos dispositivos de 24 bits já referidos, o *Dual DAC* (DAC duplo).

2.2.2.3 Dual DAC

Em termos técnicos, um *Dual DAC* é um componente idêntico a um DAC convencional, mas com a particularidade de apresentar dois canais de saída analógicos independentes. Na prática é equivalente a ter dois DACs convencionais a funcionar em paralelo (DAC A e DAC B, por exemplo), os quais são controlados, independentemente, pela respetiva porta digital, e cujas tensões de saída analógicas são independentes. Se estas tensões de saída de ambos os DACs forem somadas e injetadas numa perna de saída da célula de carga, obtém-se o efeito de *offset*, tal como é pretendido. No entanto, a resolução final do conjunto será igual à resolução individual dos DACs (no caso de serem iguais), ou à maior das resoluções dos DACs (no caso de serem diferentes), pelo que a adição das tensões, só por si, não resolve a questão de se obter uma resolução alta, sem o recurso a DACs de elevado desempenho.

Este problema pode ser resolvido através da colocação de uma resistência à saída de cada um dos DACs e somando posteriormente as tensões (figura 48).

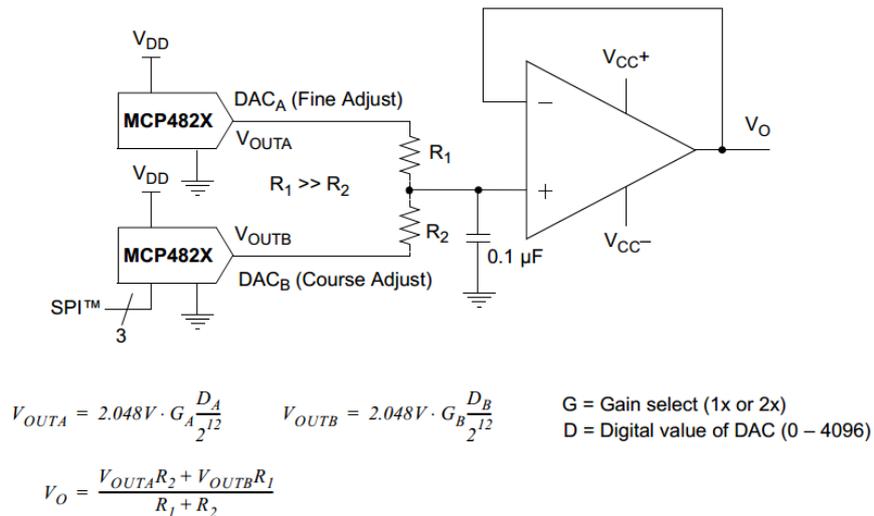


Figura 48 – Esquema elétrico do Dual DAC MCP4822, utilizado na MEF.

A colocação destas resistências (R1 e R2) causa uma queda na tensão em cada uma das saídas dos DACs. Na eventualidade das resistências serem diferentes, a contribuição de cada DAC para a tensão final é diferente, o que atribui um grau de ajustamento do *offset* distinto a cada um dos DACs: ajustamento grosseiro para o que tiver a resistência de menor capacidade e ajustamento fino para o que apresentar a resistência de maior capacidade.

Sendo as contribuições individuais dos DACs para a tensão final diferentes, é possível verificar que a resolução do conjunto é melhorada (é possível obter resoluções superiores a 12 *bits* com recurso a apenas DACs de 12 *bits*) e que depende, unicamente, da relação entre as resistências R1 e R2, e da resolução intrínseca dos DACs. Tomando como referência dois DACs de 12 *bits* e uma relação de resistências de 1/16 (R1=100Ω e R2=1,6kΩ, por exemplo), obtém-se uma resolução final de 65536 níveis, o equivalente a 16 *bits*, uma quantização bastante mais apelativa do que os 4096 níveis disponíveis com os 12 *bits* iniciais. Neste exemplo, uma variação na componente digital do DAC responsável pelo ajuste fino (R2=1,6kΩ) de 0 para 4095 (do mínimo para o máximo) corresponderá a uma variação de 0 para 256 (R1/R2*4096=256) no DAC responsável pelo ajuste grosseiro (R1=100Ω). Por outras palavras, um intervalo de 256 valores do “DAC grosseiro” está subdividido em 4096 partes pelo “DAC fino”. Existindo 16 intervalos de 256 valores no “DAC grosseiro” (4096/256=16), é possível calcular, através do produto entre estes intervalos e o seu número de subdivisões, a resolução final do conjunto, já referida de 65536 (16x4096=65536 níveis), o equivalente a 16 bits.

No limite, é possível alcançar uma resolução máxima de 24 *bits* com recurso a dois DACs de 12 *bits* e uma relação de resistências de 1 para 4096 ($R_1=100\Omega$ e $R_2=409.6k\Omega$, por exemplo, onde uma variação entre o mínimo e o máximo (0-4095) do “DAC fino” corresponde a uma variação unitária no “DAC grosseiro”, o que perfaz um total de 16777216 (4096 intervalos subdivididos em 4096 partes) níveis de quantização. O mesmo se aplica à componente analógica dos DACs pelo que, se existir uma tensão máxima à saída de 4,096V, é possível calcular uma variação mínima de $0.244\mu V$ ($4.096V/16777216=0.244\mu V$), que corresponde a uma variação mínima no *offset* de 6mN, com a célula de carga e o ganho já referidos, um valor de resolução bastante superior ao necessário e que deixa uma margem bastante significativa como era pretendido.

Com estes valores em vista, optou-se por recorrer ao *Dual DAC* MCP4822 da Microchip, com 12 *bits* de resolução máxima e com uma tensão máxima de saída de 4.096V (figura 49). Apesar de ser possível, tal como já foi demonstrado, obter uma resolução equivalente a 24 *bits*, foi utilizada uma relação de resistências de 1 para 1000 ($R_1=100\Omega$ e $R_2=100k\Omega$), o que conferiu uma resolução de mais de 21 *bits* e uma sensibilidade máxima de 25mN. Com estas especificações, a utilização de um *Dual DAC* possibilitou, ao contrário da solução inicial de uma resistência fixa, um ajuste do *offset*, de forma computadorizada, precisa e rápida.

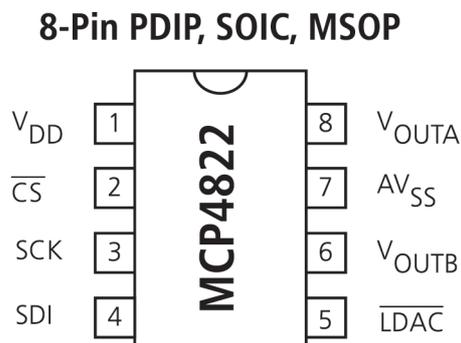


Figura 49 – Esquema das ligações do Dual DAC MCP4822, utilizado na MEF.

2.2.2.4 Comunicação SPI

A programação dos DACs foi conseguida através do Arduino R3 Uno já existente no sistema, atuando como um intermediário entre os DACs e o PC. Foi mantida a ligação USB entre o PC e o Arduino e foi utilizada uma ligação do tipo *Serial Peripheral Interface* (SPI) entre o Arduino e os DACs (figura 50). Esta é uma ligação de dados síncrona, que permite a comunicação entre dispositivos de um modo *master/slave* e que opera em *full duplex mode* (em ambos os sentidos e em simultâneo).

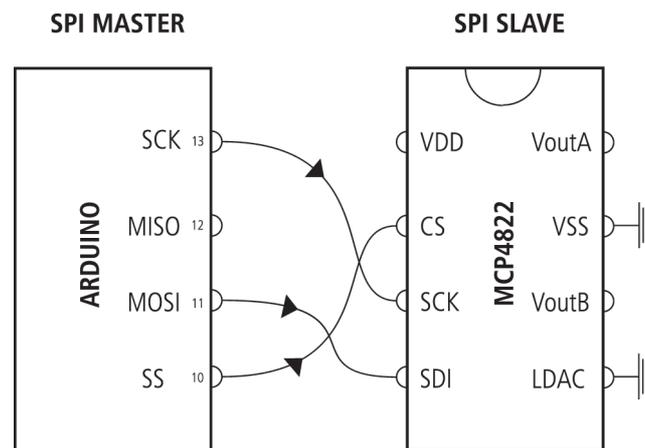


Figura 50 – Esquema da comunicação SPI entre o Arduino e o Dual DAC.

Para a comunicação SPI são utilizados, por norma, 4 ligações para os sinais lógicos:

- SCK: *serial clock* (enviado pelo *master*);
- MOSI ou SDI: *master output, slave input* (enviado pelo *master*);
- MISO ou SDO: *master input, slave output* (enviado pelo *slave*);
- SS ou CS: *slave select (active low, enviado pelo master)*;

O Arduino foi definido como *master* e o MCP4822 como *slave*, através do envio de um sinal *active low* (que representa uma condição lógica através da mais baixa das tensões) pela porta SS do Arduino. Antes do início de uma comunicação, o *master* configura a taxa de transferência de dados, utilizando uma frequência igual ou inferior à máxima suportada pelo *slave*, neste caso 20Mhz suportados pelo DAC, frequência que é controlada ao longo de toda a comunicação pelo relógio do Arduino e enviada ao DAC, através da ligação SCK. A cada ciclo deste relógio, uma transmissão SPI *full duplex* é realizada: é enviado pelo *master* 1 *bit* pela porta MOSI (*bit* este que é lido pelo *slave* pela mesma porta), e enviado 1 *bit* pelo *slave* pela porta MISO (que é recebido pelo *master* pela mesma porta). Apesar de este ser o protocolo de uma comunicação SPI, não foi utilizada neste projeto a ligação MISO, uma vez que só interessa o *feedback* relativo à tensão analógica de saída por parte do DAC, o que foi monitorizado pelo Arduino à saída do INA125. Deste modo, a comunicação SPI utilizada no circuito da MEF é caracterizada por ser unidirecional.

Tipicamente, uma comunicação envolve a transmissão de uma “palavra” de 8 *bits*, sendo utilizado no caso do MCP4822 uma com 16 *bits* (figura 51). (MICROCHIP, 2005).

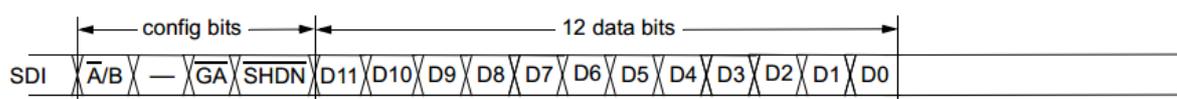


Figura 51 – Esquema da divisão da palavra enviada pelos 16 bits e respetivas funções.

O conjunto dos 16 *bits* enviado (uma “palavra”), está subdividida em dois conjuntos: o primeiro composto por 4 *bits* (15, 14, 13 e 12), responsáveis pela configuração do MCP4822 (seleção do DAC, ganho DAC e função *shutdown*) e o segundo pelos restantes *bits* (11 até 0), responsáveis por definir o valor da tensão de saída do DAC (contêm um valor de 0 até 4095).

Com este método de comunicação, o Arduino consegue transmitir o número de “palavras” que necessitar ao DAC, algo que acontece, sempre, antes de se iniciar um ensaio. Foi por isso implementada uma rotina no *Arduino programming language* (Anexo B) que foi adicionada ao código já existente da versão anterior da MEF.

2.2.2.5 Controlo do Offset

Como já foi referido, um dos objetivos principais da alteração do *offset*, é possibilitar um “zero carga” preciso e poder situá-lo onde se desejar, ao longo da janela de 1024 valores (5V de entrada do Arduino), possibilitando um aumento de resolução e maximizando a qualidade dos resultados obtidos ao longo do ensaio.

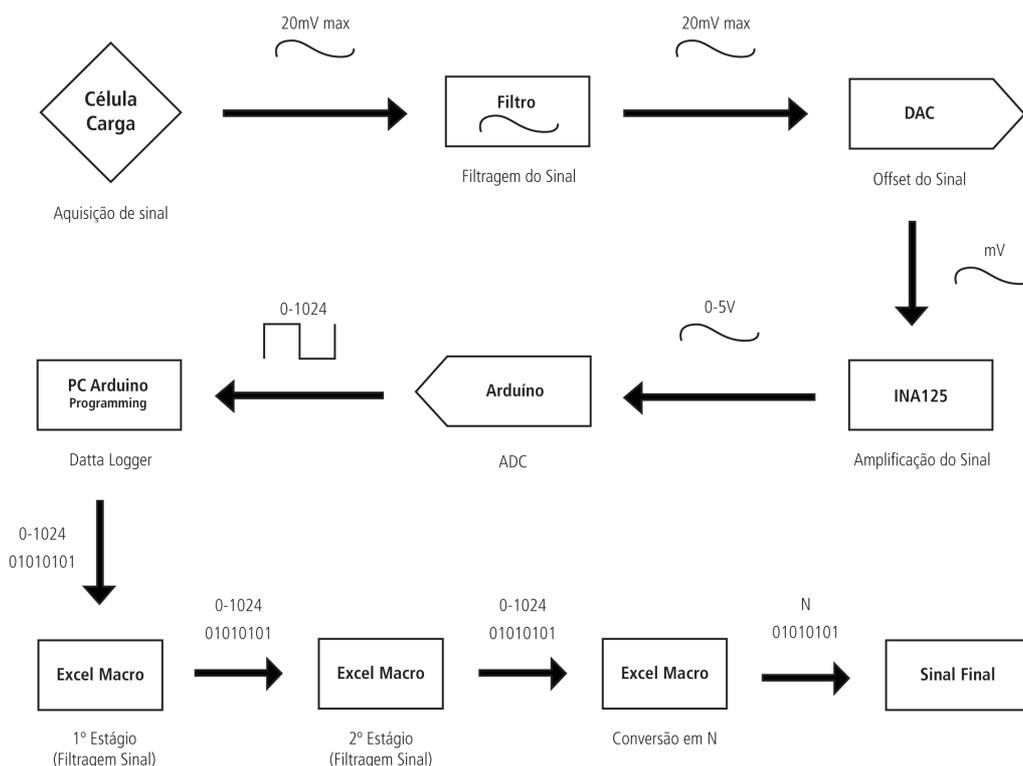


Figura 52 – Diagrama do fluxo de informação ao longo do circuito.

Com o *Dual DAC* implementado no circuito e com uma via de comunicação SPI para a sua configuração, é possível adicionar alguma tensão à existente na saída da célula de carga, amplificando o sinal e criando o *offset* (figura 52). Este sinal de mV é, por sua vez, amplificado pelo ganho do amplificador INA125, transformado-se num sinal de Volts. São os valores na gama 0-5V

deste sinal que dão entrada no ADC do Arduino, que são convertidos em 1024 valores digitais e que são enviados para o PC, a fim de serem registados, filtrados e analisados.

Com o intuito de automatizar o processo de calibração do “zero carga” – que, de outra forma, implicaria programar o *Dual DAC* e verificar, manualmente, se o valor digital obtido no sinal de saída corresponde ao pretendido – tornando-o menos moroso, mais simples e *user friendly*, criou-se uma rotina no Arduino que possibilita um ajuste automático do valor digital do sinal (0-1023) à saída do Arduino para o zero da carga, em função do valor digital de *input* (0-4095) dos DACs do MCP4822. Naturalmente, a rotina de *offset* (anexo C) está contida no mesmo programa de controlo da MEF e chama a rotina de comunicação (anexo B) para programar o DAC, automaticamente. A indicação do valor pretendido para o “zero carga” (*offset*), bem como de determinadas variáveis utilizadas nesta rotina, são efetuadas no início do programa geral.

Sendo necessário realizar uma observação do sinal de saída, a cada ajuste no DAC, optou-se por recorrer a um método numérico que garantisse a convergência do sinal de saída para o valor pretendido em poucas interações.

2.2.2.6 Método da Bisseção

Os métodos numéricos recursivos ou iterativos consistem em, a partir de uma estimativa inicial, aplicar repetidamente o mesmo procedimento, utilizando numa iteração a estimativa obtida na iteração anterior, até se alcançar o resultado com a precisão desejada.

No caso em estudo, optou-se por utilizar o método da bisseção, que consiste em reduzir o intervalo $[x, x_0]$ que contem a solução (0-4095) correspondente ao *offset* pretendido (0-1023) dividindo-o sucessivamente ao meio (x_m).

Para verificar se a solução está contida na primeira ou na segunda metade do intervalo inicial, é efetuada uma comparação entre a medição do valor digital da tensão final (p) e o valor do *offset* desejado. Em seguida, o processo é repetido para aquela metade que contém a solução. O processo iterativo é finalizado quando a diferença entre o valor lido (p) e o *offset* é inferior a uma precisão pré-definida (erro), ou quando o número máximo de iterações ($niter$) for atingindo.

Visto o sistema de controlo do *offset* contemplar um *Dual DAC*, o método da bisseção foi aplicado em duas fases distintas sucessivas: uma primeira em que é aplicada ao DAC de ajuste grosseiro (enquanto o de ajuste fino se encontra fixo com o valor 2048); e uma segunda onde é aplicado ao DAC de ajuste fino (enquanto o de ajuste grosseiro fixo no valor da última iteração). Isto permite uma aproximação rápida ao *offset* pretendido, através das iterações iniciais, com o ajuste grosseiro, e uma precisão elevada na segunda fase de aplicação do método, com o ajuste fino (figura 53).

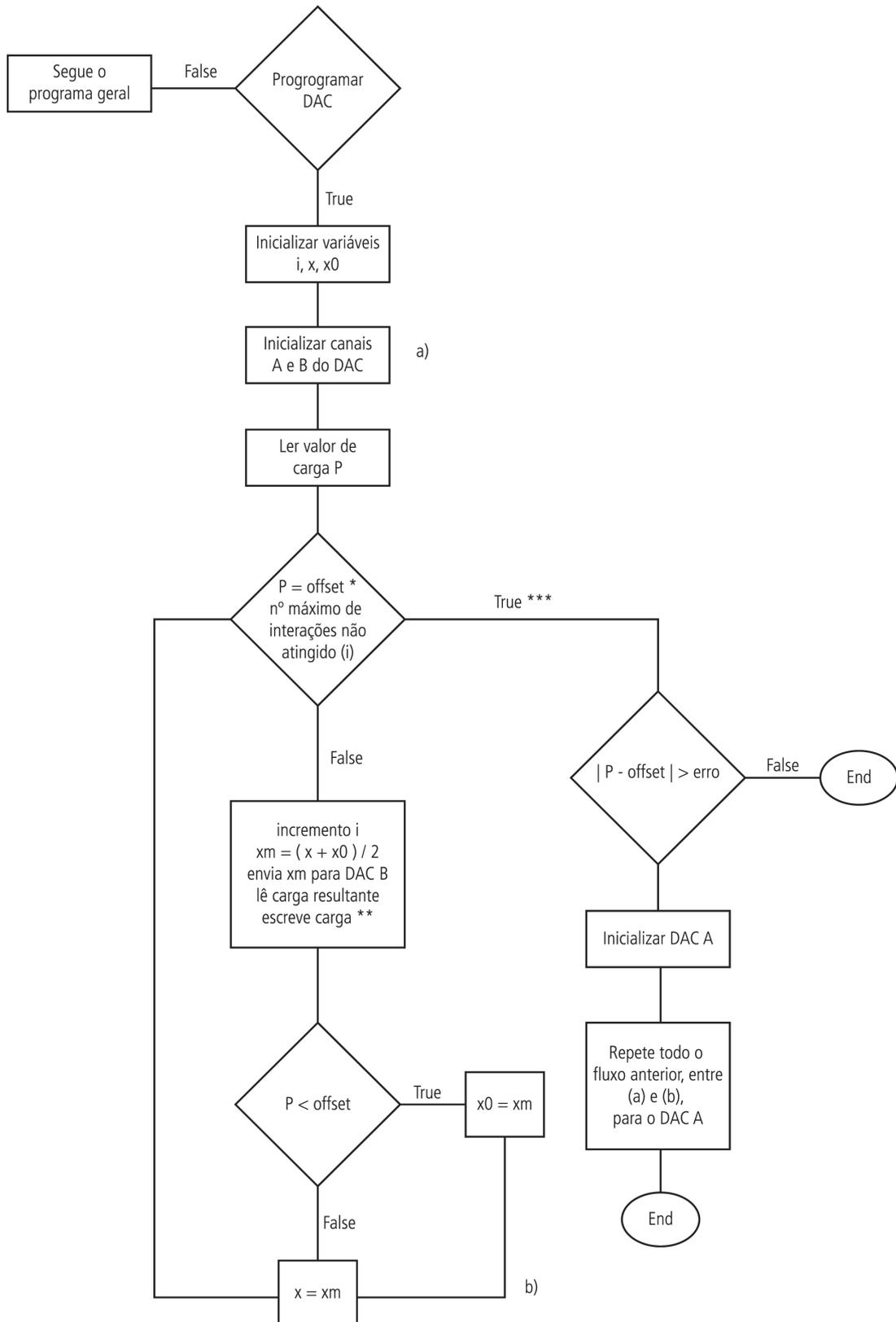


Figura 53 – Fluxograma do método da bissecção implementado para ajuste do offset (ver anexo D).

A interface para a monitorização do ajuste do *offset* em tempo real, efetuada a partir da função “Serial Monitor” do Arduino, é apresentada na figura 54. No exemplo apresentado, o

valor do *offset* pretendido foi de 1015 e o do erro de 1. É possível verificar que foram necessárias 10 iterações com o DAC de ajuste grosseiro (com o DAC fino fixo em 2048), para se alcançar um valor cuja diferença para o *offset* pretendido fosse inferior ou igual a 1 ($p=1014$), satisfazendo a condição para iniciar a segunda fase de aplicação do método, o ajuste com o DAC fino. Repetindo o procedimento, e com o DAC de ajuste grosseiro fixado com o valor da última iteração ($x_m=2132$), foi possível em duas iterações alcançar o *offset* desejado com o valor 1015, atingindo assim um dos critérios de paragem do algoritmo, terminando-o.

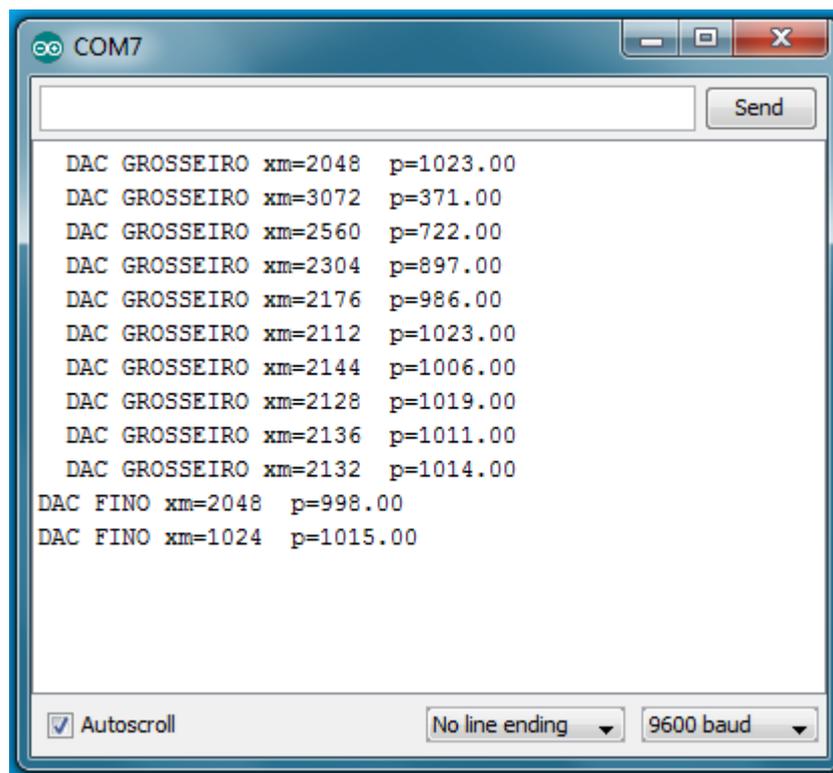


Figura 54 – Figura ilustrativa da *interface* de monitorização de ajuste do *offset*.

Com o algoritmo do método da bissecção implementado e com o sistema de monitorização de ajuste do *offset* operacional, foi possível verificar a eficiência deste ajuste, que revelou ser bastante satisfatória. Apesar de muito esporadicamente, e devido ao ruído presente no circuito, o algoritmo terminar por alcançar o limite máximo de iterações pré-definidas (e sem devolver um valor digital p admissível), na grande maioria das vezes converge para uma solução aceitável e idêntica ao *offset* pretendido, comprovando a viabilidade e eficiência deste método.

Realizadas as alterações do ganho fixo para um ganho ajustável – através de uma resistência variável – e de um *offset* fixo para um *offset* ajustável – através da implementação de um *Dual DAC* e dos respetivos sistemas de controlo e monitorização – deram-se por concluídas as intervenções ao nível do *hardware* da MEF. No anexo E mostra o novo circuito electrónico de comando.

2.2.3 Calibração da Célula de Carga

Apesar da MEF se encontrar mais versátil do que na sua versão anterior, dos sistemas implementados revelarem ser eficientes e dos resultados dos ensaios a realizar serem, conseqüentemente, legítimos e se afigurarem fidedignos, os valores digitais obtidos (0-1023) ainda não apresentavam qualquer significado físico. Para se obterem os valores de carga (N) pretendidos, foi necessário estabelecer uma correspondência direta entre os valores digitais e estes, através da calibração da célula de carga (figura 55).

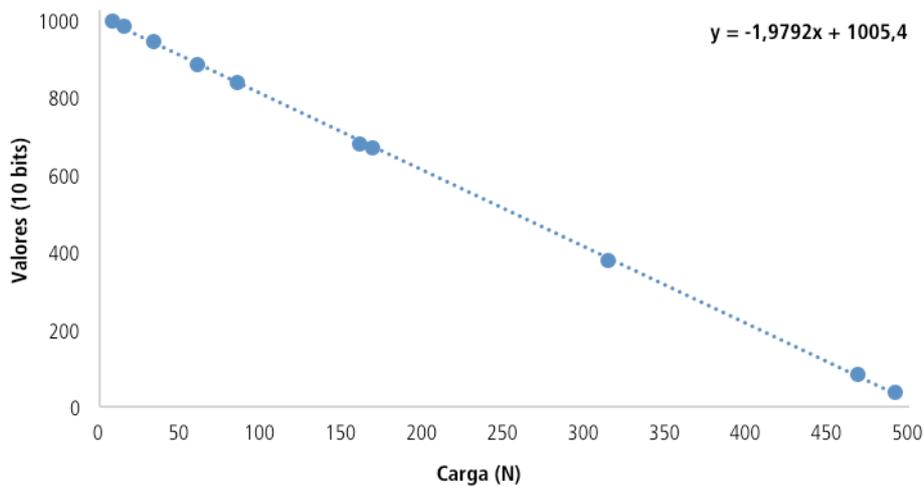


Figura 55 – Gráfico referente à calibração de carga de 500N.

A calibração da célula de carga foi conseguida por comparação. Recorreu-se a um dispositivo externo à MEF (máquina Universal de ensaios Shimadzu AG 50KNG) já calibrado para a medição de diversos níveis de força aplicada na célula de carga da MEF. Efetuando a medição de alguns valores digitais obtidos pela MEF e conhecendo a força aplicada pelo instrumento de referência em cada uma das medições, foi possível estabelecer uma relação direta entre as duas variáveis em questão. Como já era previsto, a célula de carga apresentou um comportamento linear pelo que foi possível realizar uma regressão linear, com base nas 10 medições efetuadas, e obter a força correspondente a cada um dos 1024 valores.

Esta calibração da célula de carga foi efetuada apenas uma vez e permitiu obter os valores de força pretendidos para todos os ensaios realizados. Contudo, antes de cada ensaio de fadiga na MEF, foi realizado um ensaio estático de referência, na Shimadzu, sob as mesmas condições (deslocamento máximo) ao provete a ensaiar, de modo a validar a calibração da célula de carga da MEF e o ensaio. É importante referir que uma alteração no *offset* (algo que acontece no início de todos os ensaios) não implica uma nova calibração da célula de carga, visto apenas

provocar uma translação vertical da reta. O mesmo já não se verifica para uma alteração no ganho, pois este influencia o declive da reta, sendo por isso necessário realizar uma nova calibração.

2.2.4 Outras Alterações

A plataforma da MEF adquire o seu movimento vertical, através de um par de fusos que são comandados por um motor passo a passo. Isto significa que, a cada ciclo ascendente ou descendente da plataforma, corresponde um dado número de passos. Na versão anterior da MEF, o sensor ótico era responsável pela monitorização destes passos e pelo posicionamento da plataforma, corrigindo eventuais desvios no decorrer do ensaio. Apesar do sistema funcionar corretamente e como o previsto, era normal a perda de um ou dois passos por ciclo. Ainda que a perda desta quantidade possa não parecer problemática (cada ciclo é composto por centenas ou milhares de passos, consoante a distância máxima definida), o facto de um ensaio típico englobar centenas de milhares de ciclos torna essa perda de passos inadmissível. Este erro cumulativo levava a que, por vezes, no final de um ensaio existisse uma diferença na ordem de algumas décimas de milímetro entre o posicionamento final e inicial da plataforma da máquina, alterando os valores de força registados e corrompendo a validade do ensaio. Deste modo, um controlo eficaz dos passos era essencial, tendo sido, por isso, dedicado algum tempo deste trabalho à correção deste problema.

O conceito do sistema já implementado foi reanalisado, assim como o seu algoritmo de monitorização e correção do posicionamento. Foi encontrada uma falha conceptual no algoritmo que depois de corrigida melhorou consideravelmente o desempenho do sistema e os resultados: a primeira etapa do algoritmo era composta pelo rastreio de uma posição Z0, que servia de referência para o resto do ensaio, através da realização de um determinado número de ciclos de subida e descida do travessão, a uma velocidade reduzida e inferior à do ensaio para garantir um posicionamento mais correto e eficaz possível desta referência. Após a localização e confirmação desta posição Z0, o algoritmo ordenava o início do ensaio, realizando o número de ciclos pré-definidos pelo utilizador, a uma velocidade consideravelmente superior, comparando a cada ciclo a posição da plataforma através do número de passos efetuados ao passar pela posição Z0 e efetuando os ajustes necessários para a compensação da posição no ciclo seguinte (Carvalho, 2012).

A origem da perda de passos encontrava-se na diferença de velocidades a que se realizava o rastreio da posição Z0 e o ensaio. A nossa solução passou por alterar a velocidade a que se realizava a primeira etapa, sendo agora igual à velocidade do ensaio. Foram realizados vários testes, monitorizando a perda de passos a cada ciclo dos ensaios e medindo fisicamente, com um comparador, o posicionamento da plataforma ao longo do ensaio. Os resultados revelaram que a perda de passos já não constituía um problema. Apesar do sucesso das alterações realizadas, para a

validação dos ensaios, foi elaborado um procedimento baseado na medição física do posicionamento inicial e final da plataforma. Com estas medições e com o registo da perda de passos, a cada ciclo, através do sensor ótico, foi possível verificar a validade dos ensaios e analisar em pormenor, a origem da perda de passos, no caso de um ensaio não válido.

A tabela do Anexo F apresenta todos os ensaios realizados após esta alteração, assim como a duração do ensaio e o diferencial posicional entre o fim e o início do mesmo. É possível verificar que foram efetuados mais de 5 milhões de ciclos ao longo de 38 ensaios validados. A média registada da diferença entre a posição inicial e final de todos os ensaios foi apenas de 0.03mm, tendo sido o máximo registado de 0.07mm. Estes valores comprovam o sucesso das alterações levadas a cabo e da eficácia da versão atual da MEF.

2.3 Alterações na Metodologia de Tratamento de Informação

2.3.1 Tratamento de Dados

2.3.1.1 Análise do Sinal e do Ruído

O ruído é um fenómeno de interferência eletromagnética (IEM) que afeta, frequentemente, os sistemas eletromecânicos e que pode ser proveniente de diversas fontes. Os distúrbios causados pelo ruído podem interromper, obstruir, degradar e limitar o correto funcionamento do circuito, resultando numa degradação dos dados recolhidos, em casos extremos, na perda total dos mesmos.

É possível classificar a IEM através do meio pelo qual se propaga, sendo os mais comuns a interferência por condução e a interferência por indução. No primeiro tipo, a interferência é causada pelo contacto físico de condutores e pode ser evitada com o devido isolamento dos componentes e correta ligação dos mesmos. Por sua vez, os distúrbios causados pela IEM por indução são mais problemáticos, uma vez que não necessitam do contacto físico dos componentes para a sua propagação. É de salientar que os distúrbios no campo eletromagnético de um condutor não se confinam à superfície deste, sendo também irradiados a partir do condutor. O correto isolamento das fontes emissoras e de todo o circuito elétrico é por isso prioridade para a minimização dos efeitos causados por este fenómeno.

Tendo em consideração esta informação, foram revistas todas as ligações entre componentes da MEF, especialmente as ligações terra (GND), e corretamente isolados os principais cabos elétricos, com recurso a malha blindada. Estas alterações permitiram eliminar alguns distúrbios existentes antes das intervenções e referidas por Carvalhoso (2012), como por exemplo, eliminar a interferência existente no *driver* do motor durante a comunicação entre o computador e o Arduino, tornando todo o processo de preparação e realização de um ensaio possível e melhorando a relação entre o sinal e ruído (SNR) presente nas medições da célula de carga. Optou-se por não adicionar quaisquer tipos de filtros físicos ao circuito para além dos já existentes, uma vez que o desempenho da MEF e a qualidade dos resultados obtidos eram bastante satisfatórios, ainda que a presença de algum ruído nas medições efetuadas fosse uma constante.

Com o intuito de identificar as origens do ruído residual presente em todas as amostras de dados recolhidas ao longo dos ensaios experimentais, realizaram-se diversos testes de eliminação de variáveis, desligando, gradualmente, os diferentes componentes da MEF e analisando o impacto nos valores registados pela célula de carga. O *driver* de comando do motor foi identificado como sendo a única fonte apreciável de ruído, mesmo quando o motor não se

encontrava em funcionamento. Diversos esforços foram levados a cabo na tentativa de eliminar ou reduzir a IEM causada pelo *driver*, alterando a sua ligação à terra, blindando as suas ligações e isolando-o fisicamente, do restante sistema. Não obtendo melhorias significativas, alterou-se a abordagem a este problema, tendo-se optado por uma filtragem por *software* ao sinal registado na amostra de dados.

Antes de qualquer tentativa de filtragem foi necessário analisar, pormenorizadamente, o sinal recolhido pela célula de carga, assim como o ruído adicionado pelo *driver*, com vista a determinar o melhor método de filtragem. Na figura 56 está representado o sinal registado pela célula de carga ao longo do tempo, a uma frequência de 66Hz, com o *driver* de controlo do motor desligado.

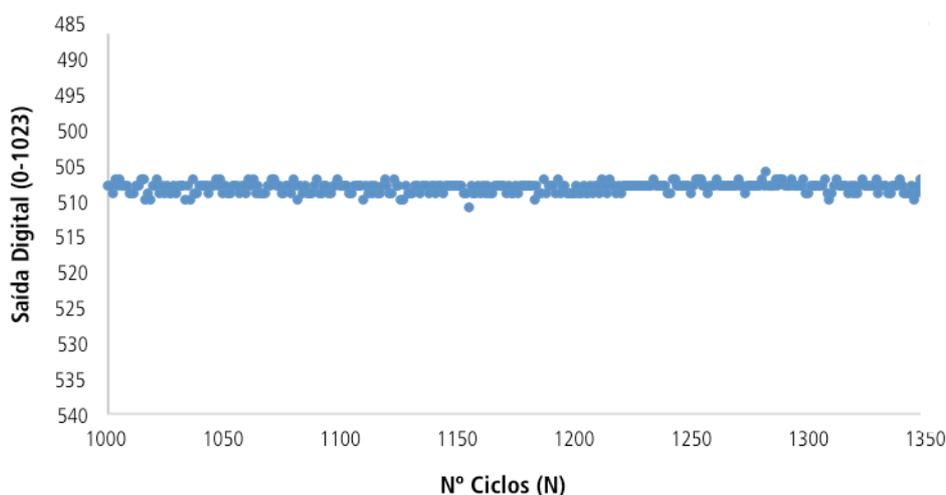


Figura 56 – Sinal com o *driver* do motor desligado.

Pode-se observar a presença de uma pequena oscilação em torno do valor 508, com uma amplitude de 6 valores, associada a outras fontes de ruído. No entanto, trata-se de uma variação com amplitude bastante reduzida e a qual não necessita de filtragem por se encontrar dentro dos parâmetros aceitáveis. Como foi visto no ponto 2.2.1, a resolução da MEF é de 0,488N/valor, ou seja, o erro era de 1,5N em torno do valor médio.

Posteriormente, ligou-se o *driver* à corrente para perceber o impacto da IEM no sinal registado pela célula de carga. Neste caso, identificou-se a existência de picos com desvios consideráveis do sinal de base, causados pelo funcionamento do *driver*. Pode-se verificar na figura 57 que o ruído provoca distúrbios unilaterais no sinal, resultando numa amostra assimétrica e não normalmente distribuída. É possível, ainda, calcular uma frequência de aproximadamente 0.9Hz associada a este fenómeno, pois os picos encontram-se igualmente distados uns dos outros, espacial e temporalmente.

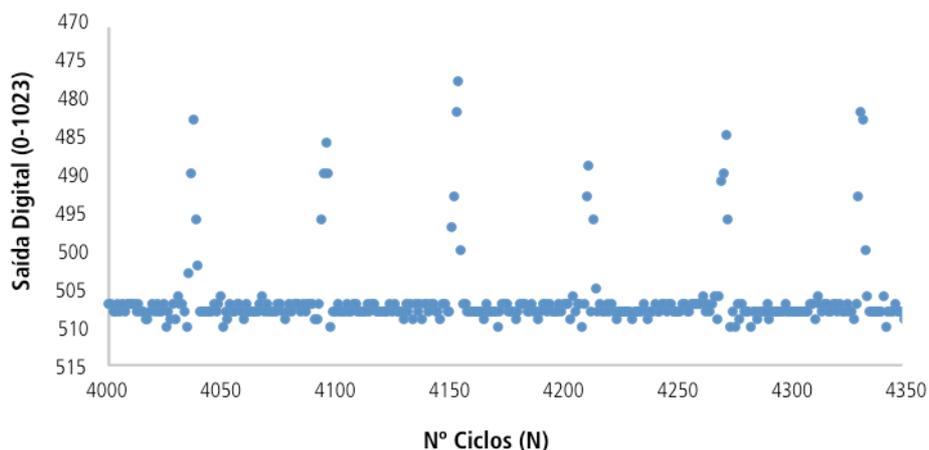


Figura 57 – Sinal com o *driver* do motor ligado.

Tendo em conta que os valores de frequência tipicamente utilizados em ensaios de fadiga se encontravam entre os 0.5 e 10Hz, e que se registam dois valores de carga a cada ciclo de subida e descida da MEF, ponderou-se desenvolver um método que tivesse por base uma frequência de trabalho igual à frequência do ruído. Deste modo, os resultados só seriam afetados na escassa eventualidade de ambos os sistemas se encontrarem em perfeita sincronia de fase. O facto do sistema ficar permanentemente dependente de um parâmetro físico de um fenómeno indesejado, ditou o abandono da tentativa de implementação deste método de trabalho. Ainda assim, a análise desta solução hipotética foi essencial para perceber como as diferentes características da IEM afetam o sinal registado, e como se pode ter por base estas mesmas características, na definição dos parâmetros de funcionamento da MEF, tendo em vista a minimização e otimização do processo de filtragem.

A frequência a que se realiza um ensaio é um dos principais parâmetros a ser definidos e a eficácia de um processo de filtragem por *software* será, tanto maior quanto melhor os algoritmos da mesma estiverem adaptados às características do ruído presente no sinal. A homogeneidade temporal dos distúrbios numa amostra é, ainda, uma característica importante na definição da robustez dos métodos de filtragem a implementar, isto é, uma amostra mais heterogénea necessita de técnicas mais complexas de filtragem.

Foi verificado que a frequência associada ao ruído causado pelo *driver* era de aproximadamente 0,9Hz, e testes experimentais na MEF revelaram uma velocidade máxima estável (entenda-se, sem perda de passos) de cerca de 30mm/s. Estando previstos deslocamentos máximos entre 2 e 4mm durante os ensaios, a MEF encontra-se limitada superiormente a uma frequência de trabalho máxima de 7,5 e 3,75Hz para os respetivos deslocamentos. A desvantagem de se optar por uma frequência de ensaio relativamente baixa e idêntica à do ruído (0,9Hz), é que não conduz a ensaios consideravelmente longos, como também produz uma amostra bastante heterogénea devido aos longos períodos em que os sinais principal e de ruído se encontram em fase e fora de

fase. Por outro lado, e apesar da opção de utilização de uma frequência de trabalho mais elevada resultar numa amostra mais homogénea, facilitando bastante a filtragem, valores demasiado elevados podem induzir efeitos dinâmicos no provete, alterando significativamente os resultados e levar a um desgaste acelerado e prematuro da MEF. Tendo em conta as limitações físicas e analisando as vantagens e desvantagens das diferentes opções, definiu-se o valor da frequência a que os ensaios iriam ser realizados, em 2Hz.

2.3.1.2 Amostra Original

Antes de se implementar qualquer método de filtragem, realizou-se um ensaio experimental sob as mesmas condições a que iriam ser ensaiados os provetes, a fim de se obter uma amostra representativa dos valores obtidos pela MEF durante um ensaio, e na qual fosse possível aplicar e comparar os diferentes métodos de filtragem. Foram registados 1674 valores ao longo do ensaio de 14 minutos, realizado a 2Hz. A figura 58 ilustra a amostra original, sem qualquer tipo de tratamento dos dados, cujas características principais são resumidas na tabela 1.

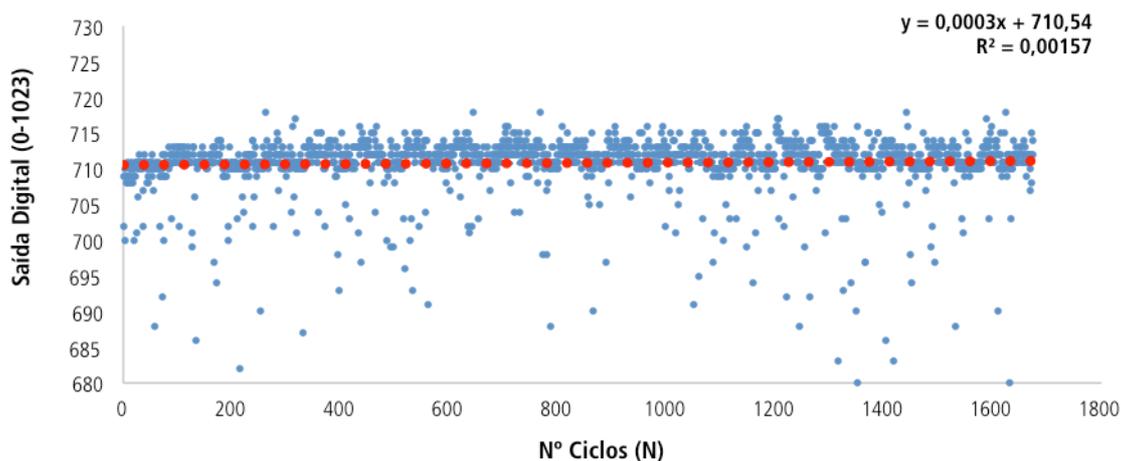


Figura 58 – Representação da amostra: original (azul); reta de regressão linear (vermelho).

Da análise da figura 58 depreende-se que a maioria dos valores varia em torno do sinal original recolhido pela célula de carga, existindo, ainda, uma distribuição assimétrica do ruído causado pelo funcionamento do *driver*

Tabela 1 – Parâmetros da amostra original.

Valores	1674
Eliminados	0
Média	710,82
Desvio Padrão	4,11

Foi conseguida, ainda, uma distribuição temporal do ruído relativamente homogênea, devido ao afastamento das frequências de trabalho e da IEM, o que facilitou o processo de filtragem. Os pontos mais afastados da tendência geral do sinal são denominados *outliers* e tanto a sua identificação, como a sua remoção, ou não, da amostra, constituem uma etapa fulcral no tratamento de dados. No intuito de seguir as tendências dos principais especialistas e mais conceituados investigadores nesta matéria, o tema dos *outliers* foi alvo de uma pequena revisão bibliográfica, a qual é exposta e explorada de seguida.

2.3.1.3 *Outliers*

Apesar de existirem diferentes definições, um *outlier* é, geralmente, considerado um ponto de informação que se encontra bastante afastado da norma de uma variável ou de uma amostra (Jarrell, 1994; Rasmussen, 1988; Stevens, 1984). Hawkins (1980:1) descreveu um *outlier* como sendo uma observação (medição) que “se desvia de tal maneira das restantes medições que levanta suspeitas se não terá sido criada por um mecanismo diferente”. Os *outliers* foram também definidos como valores que são “duvidosos aos olhos do investigador” (Dixon, 1950: 488) e contaminados (Wainer, 1976).

Wainer (1976:286) também introduziu o conceito de “*frindgelier*”, referindo-se a “acontecimentos incomuns que ocorrem mais regularmente do que raramente”. Estes pontos caem perto de três desvios padrões da média e por isso, podem ter uma influência desproporcional nos parâmetros das estimativas. No entanto, não são facilmente identificáveis como *outliers* ordinários devido à sua proximidade relativa ao centro da distribuição. Sendo os *frindgeliers* um caso especial de *outliers*, será utilizado daqui para a frente o termo genérico “*outlier*” para referir qualquer ponto de dado singular, cuja origem seja duvidosa ou que a sua influência seja desproporcional.

Os *outliers* podem surgir de diversos mecanismos e causas. Anscombe (1960) classifica-os em duas categorias principais: os decorrentes de erros nos dados e aqueles decorrentes da variabilidade inerente dos dados. Nem todos os *outliers* são contaminantes ilegítimos, e nem todos os resultados ilegítimos aparecem como *outliers* (Barnett & Lewis, 1994). Por conseguinte, é importante ter em conta a variedade de causas que pode ser responsável pela presença de *outliers*, num dado conjunto de dados. O que deve ser feito em relação a estes pontos de dados periféricos é, pelo menos em parte, uma função da causa inferida.

Apresentamos, de seguida alguns tipos de *outliers*.

Outliers de erro de amostragem: os *outliers* podem ser causados pela amostragem. É possível que alguns membros da amostra fossem, inadvertidamente, tirados de uma população

diferente do resto da amostra. Estes casos devem ser removidos, pois não refletem a população-alvo.

Outliers de falha de normalização: os *outliers* podem ser causados por uma metodologia de investigação, especialmente se algo anormal ocorrer durante a experiência. Um equipamento danificado ou não calibrado é outra causa comum de *outliers*. Estes dados podem ser, legitimamente, descartados se não existir interesse em estudar o fenómeno particular em questão.

Outliers de hipóteses de distribuição defeituosa: suposições incorretas sobre a distribuição dos dados podem também conduzir à presença de *outliers* (Iglewicz & Hoaglin, 1993). Os dados podem apresentar uma estrutura diferente do que o inicialmente previsto, e tendências de longo ou de curto prazo podem afetar os dados de maneiras inesperadas. Dependendo do objetivo da pesquisa, estes valores extremos podem, ou não, representar um aspeto da variabilidade inerente dos dados, e podem ter um lugar legítimo no conjunto de dados.

Outliers como casos legítimos, provenientes da população correta: é possível que um *outlier* possa vir da população correta e ser, legitimamente, incluído na amostra por acaso. É importante notar que a dimensão da amostra desempenha um papel na probabilidade dos valores periféricos. Dentro de uma população normalmente distribuída, é mais provável que um determinado ponto de dados seja tirado da área concentrada de maior densidade da distribuição, em vez de uma das caudas (Evans, 1999 e Sachs, 1982). À medida que o tamanho da amostra de dados aumenta, mais a amostra se assemelha à população da qual a informação foi retirada e maior se torna a probabilidade da existência de *outliers*. Por outras palavras, há cerca de 1% de hipóteses de se obter um *outlier* de uma amostra normalmente distribuída, o que significa que, em média, cerca de 1% dos valores amostrados devem encontrar-se a 3 desvios padrão da média.

No que diz respeito à identificação dos *outliers*, existe alguma controvérsia. A inspeção visual de dados e o recurso a regras como a pertença à faixa de valores afastada da média de mais de 3 desvios padrão, são métodos simples e relativamente eficazes. Porém, Miller (1991) e Van Selst e Jolicoeur (1994) demonstraram que a aplicação deste tipo de regras pode ser problemática para distribuições estatísticas com fortes desvios em relação à média. Alguns investigadores preferem inspeção visual dos dados. Outros, como Lornez (1987) argumentam que a detecção de um *outlier* é, apenas, um caso especial na análise de dados a pontos influentes.

Há um grande debate sobre o que fazer com os *outliers* identificados. Uma revisão completa dos vários argumentos não está prevista para esta dissertação. No entanto, é aceite pela maioria que, o que fazer, depende, em grande medida, das razões de um *outlier* se encontrar nos dados. Onde os *outliers* são ilegitimamente incluídos nos dados, é apenas senso comum que esses pontos devem ser removidos, e poucos devem discordar dessa afirmação (Barnett & Lewis, 1994).

Quando o *outlier* é uma parte legítima dos dados ou a sua causa não é clara, a questão torna-se mais sombria. Judd e McClelland (1989) defendem a sua remoção nestes casos, a fim de obter a estimativa mais honesta possível de parâmetros populacionais (Barnett & Lewis, 1994). No entanto, nem todos os investigadores são dessa opinião (Orr, Sackett & Dubois, 1991), considerando alguns que a decisão deve ser fundamentada na experiência e na intuição. Este é um caso onde os investigadores devem usar a sua experiência, intuição, argumentação fundamentada e reflexão ponderada na tomada de decisões.

É possível manter os *outliers* legítimos sem violar alguns pressupostos. Um dos meios de acomodar os *outliers* é o uso de transformações (Osborne, 2002). Recorrendo a transformações, os pontos periféricos podem ser mantidos no conjunto de dados e a posição relativa dos valores permanece. Contudo, a distorção e a variância do erro presente na variável(s) pode ser reduzida (Hamilton, 1992).

As transformações podem não ser apropriadas para o modelo a ser testado, ou podem afetar a sua interpretação de formas indesejáveis. Utilizando o logaritmo de uma variável torna-se a distribuição menos inclinada mas, também se altera a relação entre as variáveis originais do modelo. Por exemplo, se os dados brutos originais se resumem a uma escala quase não significativa, os valores transformados podem ser difíceis de interpretar (Newton & Rudestam, 1999 e Osborne, 2002). Igualmente problemático é o facto de muitas transformações utilizadas requererem dados não-negativos, o que limita as suas aplicações. Por este motivo, muitos investigadores recorrem a outros métodos para acomodar *outliers*.

Uma alternativa para a transformação é a truncatura, onde valores extremos são substituídos pelo maior (ou menor) valor razoável. Através da truncatura a ordenação relativa dos dados é mantida e os valores mais altos ou mais baixos continuam a ser os pontos mais altos ou mais baixos, mas os problemas distribucionais são reduzidos.

Em vez de transformações ou truncatura, os investigadores, por vezes, recorrem a vários procedimentos "robustos" para protegerem os seus dados de possíveis distorções causados pela presença de *outliers*. Estas técnicas acomodam os *outliers* sem nenhum inconveniente maior, ou são robustas contra a presença de *outliers* (Barnett & Lewis, 1994, p. 35). Certas estimativas dos parâmetros, especialmente a média e os mínimos desvios quadrados, são particularmente vulneráveis a *outliers*, ou têm valores "reduzidos de colapso". Por esta razão, os investigadores preferem usar métodos robustos para fornecer estimativas alternativas a estes aspetos importantes dos dados.

Um método robusto comum para a estimativa de distribuições invariáveis envolve a utilização de uma média aparada (*trimmed mean*), que é calculada através da eliminação temporária de observações extremas em ambas as extremidades da amostra (Anscombe, 1960). Alternativamente, os investigadores costumam optar por calcular uma média *Windsorizada*, onde

as observações mais altas e mais baixas são, temporariamente, censuradas e substituídas com valores adjacentes a partir dos dados restantes (Barnett & Lewis, 1994).

Assumindo que a distribuição dos erros de previsão (*prediction errors*) é aproximadamente normal, existem diversas técnicas comuns de regressão robustas que podem ajudar a reduzir a influência dos *outliers*. As estimativas pelos mínimos quadrados “aparados” (LTS) e a mínima mediana dos quadrados (LMS) são, conceptualmente, similares à média aparada, ajudando a minimizar a dispersão dos erros de previsão, eliminando uma percentagem específica dos valores extremos positivos e negativos (Rousseeuw & Leroy, 1987), enquanto a regressão *Windsorizada* suaviza os dados Y, substituindo *outliers* residuais extremos pelo valor mais próximo seguinte no conjunto de dados (Lane, 2002).

Existem, assim, muitas alternativas para análise das variáveis não ideais. Além das soluções já mencionadas, pode-se optar por realizar análises não-paramétricas, uma vez que estes tipos de análises têm poucos ou nenhuns pressupostos distribucionais, embora a pesquisa de Zimmerman e outros (1995) aponte para que, até, estes tipos de análise sofrem da presença de *outliers*.

Apesar de alguns autores defenderem que a remoção de valores extremos produz resultados indesejáveis, são a minoria, especialmente quando os *outliers* são ilegítimos. Quando existem suspeitas de legitimidade destes pontos, alguns autores argumentam que os dados são mais propensos a ser representativos da população como um todo, se os *outliers* não forem removidos (Orr, Sackett & Dubois, 1991).

Do ponto de vista conceptual, há argumentos fortes para remoção ou alteração dos *outliers*. A maioria das análises, empiricamente, demonstra os benefícios da remoção destes pontos. Ambas as correlações e os *t-tests* tendem a apresentar mudanças significativas nas estatísticas, em função da remoção de *outliers* e na esmagadora maioria das análises, a precisão das estimativas é melhorada. Na generalidade dos casos, erros de inferência são significativamente reduzidos, o que constitui um forte argumento para a triagem e remoção de *outliers*.

2.3.2 Filtragens

2.3.2.1 Primeira Filtragem

2.3.2.1.1 Amostra Limpa

Partindo da amostra inicial, foram identificados numa base de “bom senso” 124 dos potenciais *outliers*, que foram posteriormente eliminados (Orr, Sackett & Dubois, 1991). Deste procedimento resultou a amostra “limpa”, apresentada na figura 59, cujas características principais são resumidas na tabela 2. Com a eliminação de 7,41% dos valores associados ao ruído, o valor da média aumentou ($\bar{y}=711,75$, aproximando-se da média real do sinal de base e o desvio-padrão foi reduzido para menos de metade ($\sigma =1,61$), tornando a amostra bastante menos dispersa e simétrica.

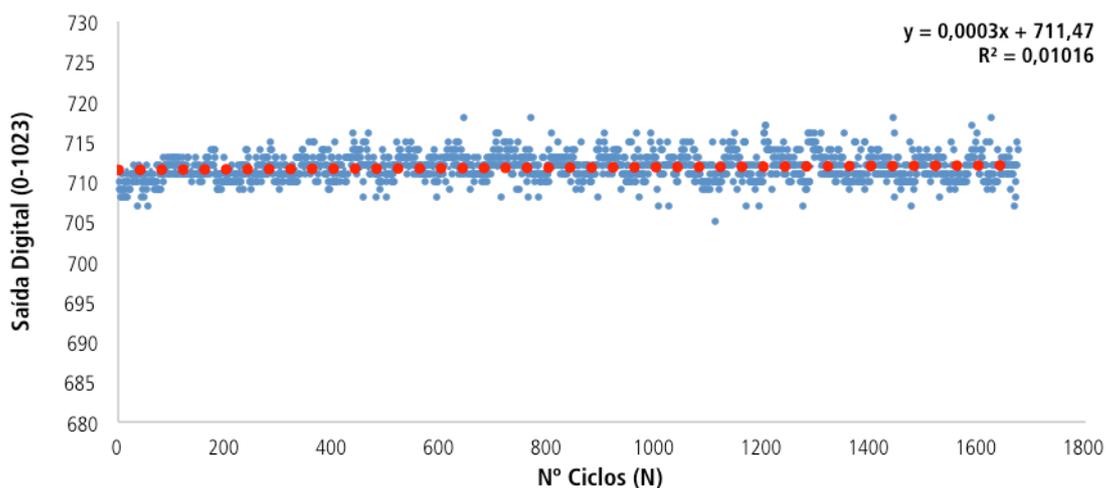


Figura 59 – Representação gráfica da amostra: limpa manualmente (azul); reta de regressão linear (vermelho).

É possível verificar, ainda, uma ligeira redução no coeficiente de determinação (o quadrado do coeficiente de correlação) da reta aproximada, face à amostra original, que corresponde a uma aproximação dos valores calculados pelo modelo aos registados pela MEF. Esta amostra serviu de referência para todas as comparações efetuadas com os diversos métodos de filtragem.

Tabela 2 – Parâmetros da amostra limpa manualmente.

Valores	1674
Eliminados	124
% Ruído	7,41
\bar{y}	711,75
σ	1,62

2.3.2.1.2 Diferenças Pontuais

Foi elaborado um filtro bastante simples e baseado, unicamente, na distância de dois pontos consecutivos. O método consiste em percorrer todos os pontos da amostra e comparar, individualmente, o valor de cada ponto com o anterior. Se o módulo da diferença for superior ao valor de *cutoff/threshold* definido previamente, esse ponto é eliminado permanentemente da amostra. Dependendo apenas da distância de dois pontos, o método foi denominado de Diferenças Pontuais. As operações elementares, da diferença e comparação, utilizadas neste algoritmo de filtragem, conferem ao método tempos de processamento extremamente reduzidos que, juntamente com a inexistência de quaisquer pressupostos da amostra a filtrar, representam as principais vantagens deste método.

A permanência do ponto em estudo na amostra final depende apenas da verificação da condição.

$$|y_i - y_{i-1}| < r \quad (5)$$

onde y_i representa o valor do ponto em estudo, y_{i-1} o valor do ponto imediatamente anterior ao ponto em estudo e r o valor de *cutoff/threshold*. Este último é ajustável de acordo com o nível de filtragem pretendido, e no caso em estudo foi calibrado para produzir uma filtragem com características idênticas à amostra limpa manualmente. Naturalmente, o primeiro valor (y_i) não pode ser um *outlier*.

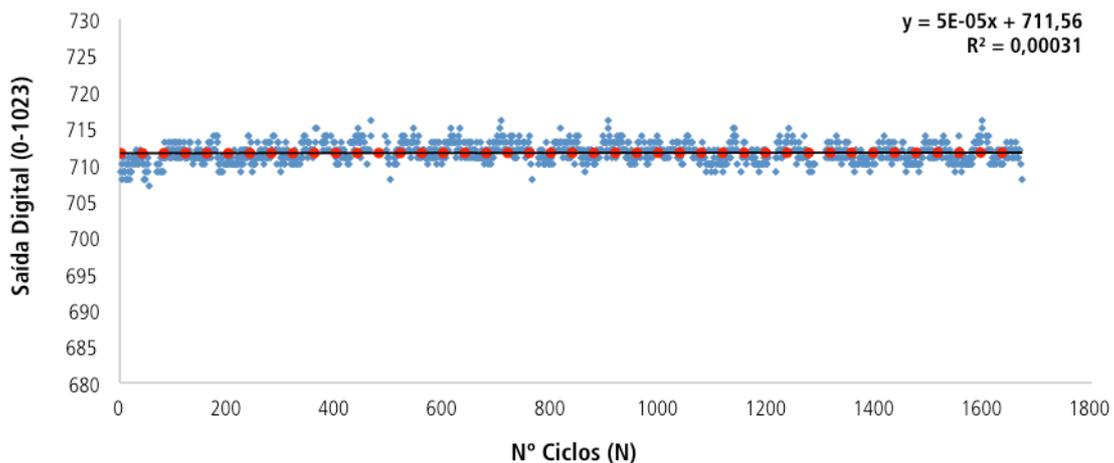


Figura 60 – Representação gráfica da amostra: filtrada pelo método das Diferenças Pontuais (azul); reta de regressão linear (vermelho).

Como se pode observar na figura 60 e na tabela 3, para $r=3$, este método conseguiu uma filtragem eficaz dos *outliers*, deixando uma amostra ainda com menos variância do que a

manualmente limpa ($\sigma=1,30$), mantendo sensivelmente o mesmo valor da média ($\bar{y}=711,60$) e melhorando consideravelmente a correlação estatística ($R^2=0,0003$).

Tabela 3 – Parâmetros da amostra obtida pelas Diferenças Pontuais.

Valores	1674
Eliminados	412
% Ruído	24,61
\bar{y}	711,60
σ	1,30

A eliminação de mais do triplo dos pontos (412) face à amostra em comparação, resultou numa redução de aproximadamente um quarto (24,61%) dos valores originais da amostra, diminuindo, drasticamente, a relevância estatística dos dados. É possível ainda identificar (por exemplo, ciclo 480) o aparecimento de clareiras amostrais - zonas caracterizadas pela falta de informação - fenómeno típico de uma filtragem desadequada. A alteração do parâmetro de corte para um valor superior ($r=4$), não mudou significativamente os resultados, ao integrar mais *outliers* ilegítimos na amostra, do que a restaurar o sinal principal. Algumas alterações foram propostas de modo a contornar os efeitos indesejados provocados por este filtro, alterações essas que depois de implementadas deram origem a um novo método.

2.3.2.1.3 Médias Deslizantes

Aproveitando o conceito da identificação de *outliers* através da distância entre pontos vizinhos, desenvolveu-se uma nova técnica de filtragem, a Média Deslizante. A principal diferença em relação às Diferenças Pontuais é a vizinhança a que o ponto em estudo é comparado, que, neste caso, é uma média de um conjunto de pontos adjacentes. Esta alteração é possível pelo facto de não existirem variações acentuadas repentinas de forças acentuadas ao longo de um ensaio, conferindo à linha do gráfico representativo um carácter contínuo e derivativo. Deste modo, o valor de comparação é bastante mais realista e aproximado do sinal de base registado pela MEF. Optou-se, para o cálculo da média, por considerar um número igual de pontos adjacentes a montante e a jusante do ponto em estudo, e por excluir este último, para evitar contribuições ilegítimas para a média, na eventualidade do referido ponto ser um *outlier*. A condição de exclusão ou permanência na amostra filtrada é garantida pelo fator de corte já existente no método das diferenças pontuais, e é, matematicamente, descrita pela condição

$$\left| \frac{\sum_{i-t}^{i-1} y_i + \sum_{i+1}^{i+t} y_i}{2t} - y_i \right| < r \quad (6)$$

sendo t o tamanho do intervalo para o cálculo da média dos valores vizinhos e r o valor de corte aceitável, com base no qual os valores são excluídos ou mantidos na amostra. Estes parâmetros foram otimizados para as condições dos ensaios realizados (2Hz, [0-500] N), tomando os valores $t=5$ e $r=4.8$, sendo necessários ajustes, caso existam alterações nas condições dos ensaios. A figura 61 mostra a aplicação do método das médias deslizantes, implementado em Excel, ilustrando a simplicidade deste algoritmo de filtragem.

y	\bar{y}	$ y-\bar{y} $	\hat{y}
710	708,4	1,6	710
708	708,7	0,7	708
700	709,6	9,6	
710	707,9	2,1	710
709	708,1	0,9	709
709	709,3	0,3	709
722	=(SUM(A3;	14	
708	709,6	1,6	708
709	710,3	1,3	709
709	710,2	1,2	709
708	710,5	2,5	708
710	710,4	0,4	710
710	709	1	710

Figura 61 – Representação do método implementado no Excel.

Com este filtro obteve-se uma amostra (figura 62 e tabela 4) bastante semelhante à filtrada manualmente sendo o valor da média virtualmente igual, o desvio padrão mais reduzido e a percentagem de valores eliminados quase igual. (Cf. figura 59, tabela 2),

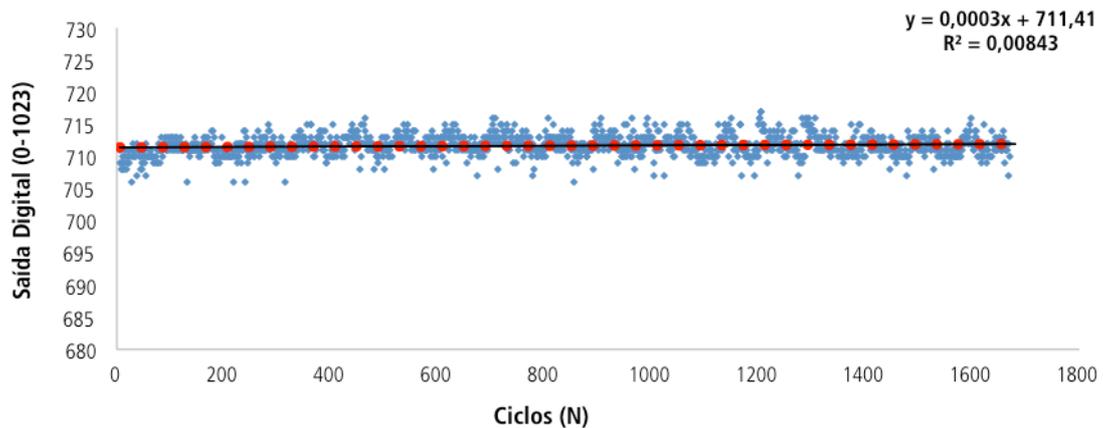


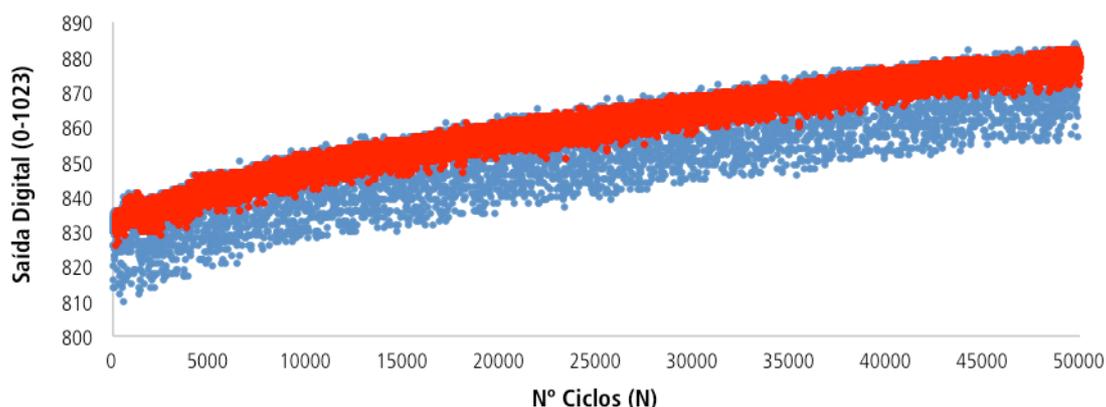
Figura 62 – Representação gráfica da amostra: filtrada pelo método das Médias Deslizantes (azul); reta de regressão linear (vermelho).

Tabela 4 – Parâmetros da amostra obtida pelas Médias Deslizantes.

Valor	1674
Eliminados	164
% Ruído	9,8
\bar{y}	711,67
σ	1,58

Contrariamente ao método anterior das diferenças pontuais, e apesar de ter associado uma carga computacional superior, o método da média deslizante permite obter uma amostra consistente, continua e com elevado significado estatístico.

O método foi testado em diversos ensaios experimentais e sob diferentes condições. Como ilustra a figura 63, a redução de ruído conseguida ao longo de um ensaio de 50×10^3 ciclos é apreciável, aliada à inexistência de problemas locais. Isto fez com que o método das médias deslizantes fosse adotado como estágio primário de filtragem em todos os ensaios realizados.

**Figura 63** – Comparação gráfica entre a amostra original de um ensaio (azul) e da mesma amostra após uma primeira filtragem (vermelho).

2.3.2.2 Segunda Filtragem

Verificou-se que os tamanhos consideráveis das amostras filtradas pelas médias deslizantes (aproximadamente 90% do tamanho das amostras originais, alcançando por vezes o meio milhão de pontos num único ensaio), conduzia a tempos de processamento excessivos em operações posteriores de tratamento de dados. A necessidade de redução do tamanho das amostras motivou o desenvolvimento de uma segunda filtragem do sinal e proporcionou uma suavização adicional dos dados.

2.3.2.2.1 Método da regressão linear pelos mínimos desvios quadrados

As técnicas mais comuns de condensação de dados envolvem, por norma, a divisão da amostra em estudo em intervalos, de onde são retirados um ou mais pontos que melhor representam os valores contidos nesse intervalo. De acordo com os pontos contidos nesses intervalos, as relações existentes entre eles e o tipo de variáveis em questão, existem diferentes técnicas que garantem uma representação adequada dos valores originais. Entre as técnicas de análise regressiva mais utilizadas encontram-se as regressões lineares, regressões não paramétricas, regressões *bayesianas*, regressões não lineares, regressões quantílicas, entre outras.

Para o caso em estudo, e devido ao carácter linear e estável deste tipo de ensaios, optou-se por recorrer a regressões lineares, aplicadas em intervalos relativamente pequenos. É importante salientar que, para manter uma referência do tempo ao longo de todo o ensaio e para os resultados poderem ser diretamente comparáveis, utilizaram-se intervalos temporais uniformes em vez de intervalos constituídos pelo mesmo número de pontos. Isto levou a que, após o primeiro estágio de filtragem pelas médias deslizantes, os intervalos não apresentassem o mesmo número de dados, o que não constituiu um problema para a aplicação de uma análise regressiva.

O procedimento empregue na segunda filtragem consistiu nas seguintes etapas:

- Divisão do conjunto de dados resultante da primeira filtragem em subconjuntos com, aproximadamente, 50 pontos, intervalo que se revelou conveniente após algumas tentativas;
- Cálculo de regressões lineares em cada sub-conjunto de dados;
- Substituição de cada sub-conjunto pelo valor médio da variável de entrada e pelo valor da variável de saída, calculado pela regressão.

A figura 64 exemplifica os resultados obtidos com esta filtragem. Em resumo, pode-se dizer que a dupla filtragem usada:

- Envolve um procedimento automatizável relativamente simples, pois pode-se implementar em folha de cálculo; na realidade, foi implementado em VBA, no Microsoft Office Excel 2013, através de uma Macro (anexo G);
- Mitiga consideravelmente os efeitos indesejáveis do ruído, sem comprometer a significância estatística da amostra final;
- Reduz a amostra para um tamanho aceitável para posterior tratamento de dados.

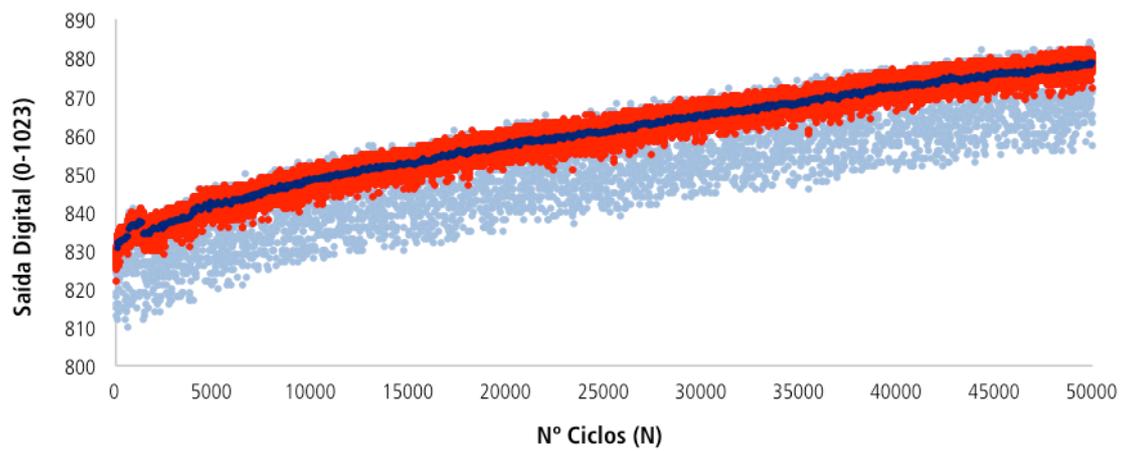


Figura 64 – Comparação gráfica entre a amostra original de um ensaio oficial (azul claro) e os dois estágios de filtragem (1º-vermelho; 2º-azul escuro).

3 ■ Ensaio

3.1 Características dos provetes

Os provetes utilizados nos ensaios foram constituídos por camadas unidirecionais de pré-impregnado carbono/epóxico SEAL HS 160 REM, cujas propriedades mecânicas nominais são dadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas unidirecionais do HS 160 REM anunciadas pelo produtor.

Unidirectional mechanical properties from the producer technical data sheet			
Tensile strength (// to fibers)	MPa	1700	ASTM D3039
Breaking strain (// to fibers)	%	1.3	ASTM D3039
Tensile modulus (// to fibers)	GPa	150	ASTM D3039
Flexural strength (// to fibers)	MPa	1400	ASTM D790 ($L/d = 16$)
Flexural modulus (// to fibers)	GPa	130	ASTM D790 ($L/d = 16$)
ILSS	MPa	60	ASTM D2344
Transverse modulus (\perp to fibers) ^a	GPa	11	
In plane shear modulus ^a	GPa	4.96	
Major Poisson's ratio ^a		0.28	

^a Calculated by simple micro-mechanical models.

Os provetes foram obtidos a partir de placas laminadas unidirecionais $[0^\circ]_{20}$ fabricadas no Instituto de Engenharia e Gestão Industrial (INEGI) por prensagem a quente. A fenda inicial foi gerada mediante inserção de um filme desmoldante de PTFE com 0,015mm de espessura durante a laminagem. O corte dos provetes foi efetuado por jato de água na empresa Descut-Design, ficando os provetes com as seguintes dimensões nominais: comprimento 180mm, largura $b=20$ mm e espessura $2h = 3$ mm.

Nos ensaios ENF (figura 65) adotou-se distância entre apoios $2L = 125$ mm e comprimento de fenda inicial $a \approx 40$ mm.

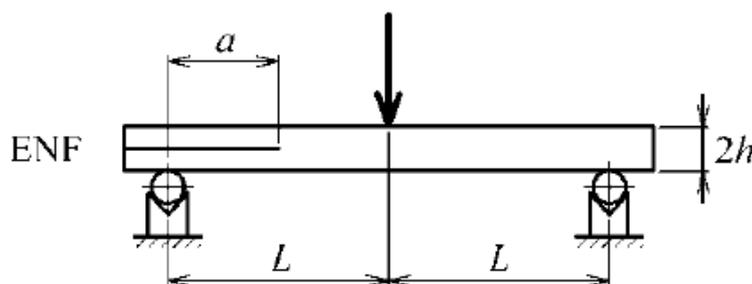


Figura 65 – Geometria do ensaio ENF adotada.

3.2 Medição do módulo de flexão

Antes de gerar a pré-fenda para os ensaios de fadiga, e dado que a posição do filme era facilmente localizável ao microscópio, realizaram-se ensaios estáticos na máquina Universal Shimadzu 50kN-AG para obter o módulo E_1 de flexão dos provetes. Com o mesmo arranjo dos ensaios ENF, os provetes foram carregados até ao deslocamento máximo de 3mm, suficiente para obter uma ampla zona linear sem promover crescimento de fenda. O módulo foi obtido usando a metodologia proposta por Morais e Pereira (2007), que se baseia na flexibilidade $C = \delta/P$, sendo δ o deslocamento e P a carga, e na teoria das vigas corrigida,

$$C = \frac{2L^3 + 3(a + \Delta_{II})^3}{8E_1bh^3} + \frac{3L}{10G_{13}bh} \quad (7)$$

com a correção para o comprimento da fenda (Morais, 2011)

$$\Delta_{II} = h \sqrt{\frac{E_1}{78G_{13}}} \quad (8)$$

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

$$C_f = C - \frac{3L}{10G_{13}bh} \quad (9)$$

descontando o efeito de corte transversal. Pode-se estimar E_1 a partir dos valores experimentais de C resolvendo a equação

$$E_1 = \frac{2L^3 + 3(a + \Delta_{II})^3}{8C_fbh^3} \quad (10)$$

o que foi feito recorrendo ao método iterativo da secante, implementado numa folha de cálculo. Os resultados indicaram um valor médio de 117 GPa com desvio padrão de 5.1 GPa, valores que são habituais para este tipo de material.

3.3 Criação da pré-fenda

Como se viu no capítulo 1, a criação de pré-fenda foi recomendada para os ensaios estáticos e de fadiga por O'Brien e outros (2010). Numa primeira fase, a pré-fenda foi gerada manualmente usando o procedimento já adotado por Carvalhoso (2012). Neste método aplica-se primeiro uma pequena alavanca na extremidade do provete para separar as duas metades, até que a abertura permita a introdução de um rolete com 6mm de diâmetro paralelamente à largura do provete. Seguidamente aproxima-se gradualmente o rolete na direção da frente do filme, enquanto se pressiona manualmente a zona onde este se encontra para evitar uma propagação descontrolada.

Este processo é realizado num ambiente absolutamente silencioso e é concluído ao ser percebido um estalido proveniente do provete, som característico da propagação de uma fenda num compósito laminado de carbono. É importante salientar que, ao longo deste processo, a própria descolagem do filme de uma das metades do provete produz alguns ruídos que não devem ser confundidos com os estalidos característicos já referidos. Trata-se de um processo que exige alguma sensibilidade e habituação por parte de quem o realiza, fatores determinantes da qualidade das pré-fendas criadas. Concluído o processo, o provete é sujeito a uma análise microscópica na qual se verifica que a fenda tem aproximadamente o mesmo comprimento em cada bordo, onde é marcada a posição da nova frente de fenda.

Todavia, os resultados dos primeiros ensaios de fadiga vieram mostrar que as pré-fendas geradas eram bastante maiores do que as observações ao microscópio permitiam observar. Atendendo também ao caráter altamente delicado da técnica, optou-se por um método alternativo para a criação das pré-fendas – recorrer a um ensaio estático ENF. Contudo, não se usou o comprimento de fenda inicial de 40 mm, pois a propagação rápida levaria a uma pré-fenda de dimensões apreciáveis que reduziam a margem para os ensaios de fadiga. Tendo em conta que a fenda não se propaga para além do ponto de carregamento, usou-se uma configuração em que o provete foi colocado de modo que a extremidade do filme de PTFE (de fácil identificação ao microscópio) ficasse a cerca de 1mm do referido ponto. Este processo permitiu a criação de uma pré-fenda de um modo mais controlado e simples. A nova frente da fenda foi identificada com recurso ao microscópio ótico. As incertezas na posição real da frente da fenda foram ultrapassadas usando o método da fenda efetiva (Morais e Pereira, 2007) descrito abaixo.

3.4 Ensaio estáticos

Realizaram-se ensaios ENF para medir a taxa crítica de libertação de energia crítica de deformação G_{IIc} . Os ensaios foram efetuados na máquina universal Shimadzu 50 kN-AG a 1 mm/min (figura 66).

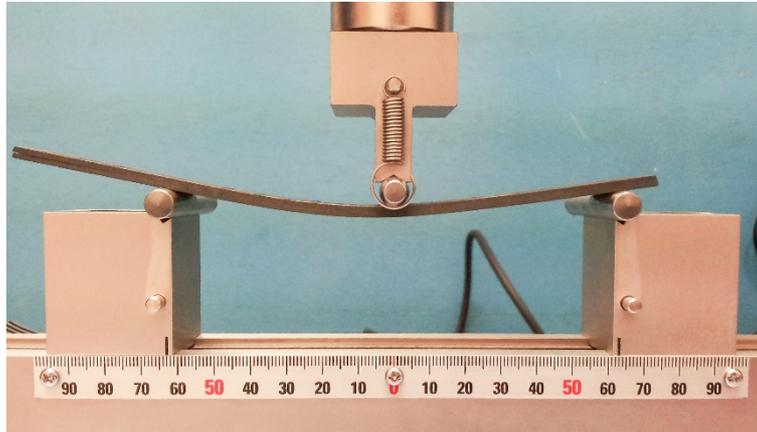


Figura 66 – Ensaio estático para medição de G_{IIc} .

Face às dificuldades bem conhecidas no seguimento da propagação de uma fenda em modo II e à necessidade de ter em conta o efeito da extensa zona de processo de fratura, adotou-se o método da fenda efetiva (Morais e Pereira, 2007), no qual o comprimento de fenda efetivo é obtido a partir da flexibilidade medida

$$a_e = \sqrt[3]{\frac{8E_1bh^3C_f - 2L^3}{3}} \quad (12)$$

o que conduz a

$$G_{II} = \frac{9P^2a_e^2}{16b^2E_1h^3} \quad (13)$$

A figura 67 mostra curvas carga-deslocamento típicas enquanto que a figura 68 apresenta os valores de G_{IIc} obtidos desde o ponto de iniciação de 5% de desvio ou carga máxima. Verifica-se ausência de efeito de curva R, o que é habitual neste material (Morais e Pereira, 2007). Todavia, o valor de $G_{IIc} \approx 1100 \text{ J/m}^2$ foi algo mais elevado do que o medido por Morais e Pereira (2007), cerca de 900 J/m^2 . Esta diferença é explicável por diferenças no teor de fibras e pela variabilidade nos lotes de material.

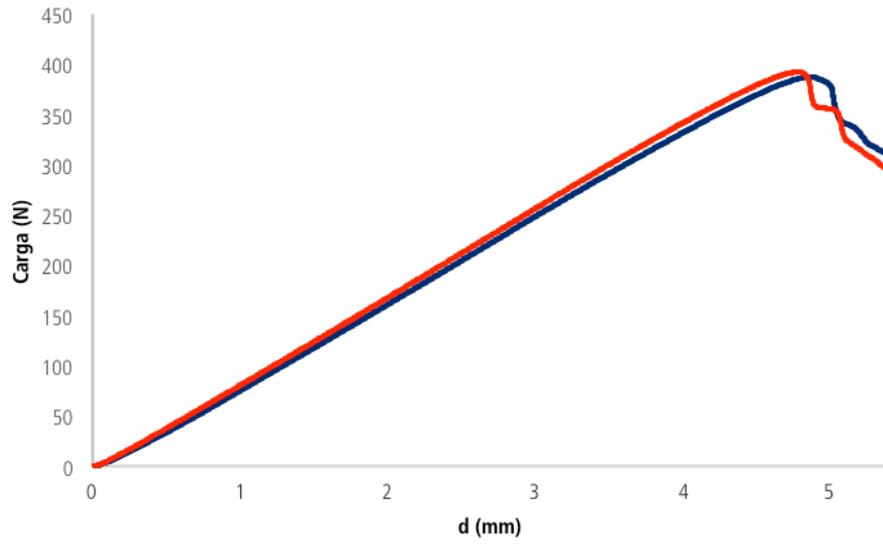


Figura 67 – Curvas carga-deslocamento de ensaios ENF.

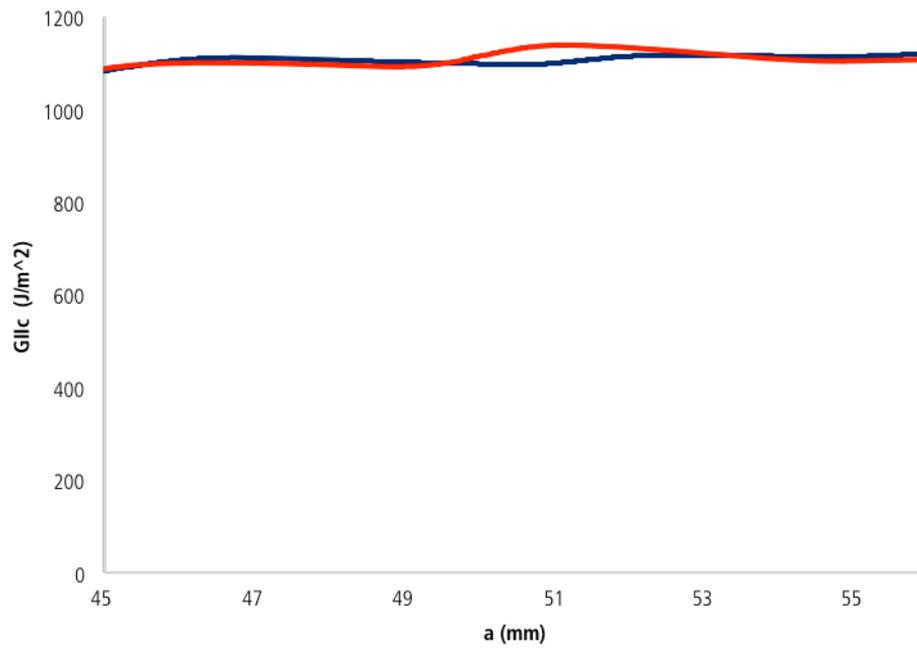


Figura 68 – Curvas R medidas em ensaios ENF.

3.5 Ensaio de fadiga

Face à arquitetura atual da MEF e ao seu modo de funcionamento, os ensaios de fadiga foram conduzidos a 2Hz, impondo um deslocamento máximo δ_{max} que foi variado e um deslocamento mínimo δ_{min} fixado em 0.9 mm. Por seu turno, a carga P foi registada ao longo do ensaio nas posições extremas de cada ciclo. Os valores de δ_{max} foram escolhidos com base na teoria das vigas corrigidas de modo a obter valores de $G_{II_{max}}$ correspondentes a 35% a 55% de G_{IIc} (Cf. tabela 6). Já o valor de δ_{min} adotado correspondeu a aproximadamente 5% de G_{IIc} , valor baixo para propiciar uma variação apreciável de G_{II} e taxas de propagação de fendas elevadas, evitando ensaios muito longos. A duração dos ensaios variou entre 50×10^3 e 600×10^3 ciclos consoante os resultados que iam sendo obtidos.

Tabela 6 – Resumo dos parâmetros adotados nos ensaios de fadiga.

% G_{IIc}	$G_{II_{max}}$ (J/m ²)	δ_{max} (mm)	δ_{min} (mm)
35%	385	2,7	0,9
40%	440	3,1	0,9
50%	500	3,3	0,9
55%	605	3,5	0,9

No tratamento de dados usou-se novamente o método da fenda efetiva acima descrito para calcular a_e a partir da equação (11) e $G_{II_{max}}$ e $G_{II_{min}}$ aplicando a equação (12) com os valores de carga máxima P_{max} e mínima P_{min} .

A figura 69 mostra evoluções típicas de P_{max} e de P_{min} ao longo de ensaios de fadiga.

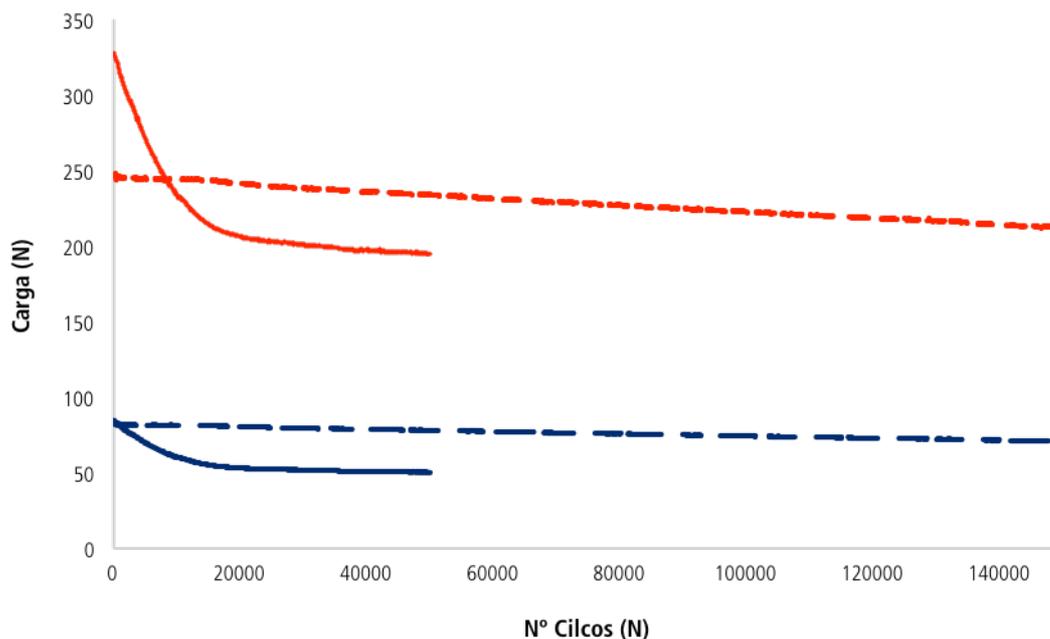


Figura 69 – Evolução de P_{max} (linhas vermelhas) e P_{min} (linhas azuis) em ensaios de fadiga efetuados com $\delta_{max} = 3.5$ mm (linhas contínuas) e 2.7 mm (linhas tracejadas).

No ensaio efetuado com $\delta_{max} = 2.7\text{mm}$ a evolução foi naturalmente mais gradual devido à propagação mais lenta da fenda, tendo por isso sido aplicado um maior número de ciclos (figura 70). Na verdade, aplicaram-se posteriormente, ainda mais ciclos de carregamento a esse provete. Já no ensaio realizado com $\delta_{max} = 3.5\text{mm}$ a fenda propagou-se muito mais rapidamente, bastando apenas cerca de 20×10^3 ciclos para a fenda atingir a proximidade do ponto de carregamento (figura 70).

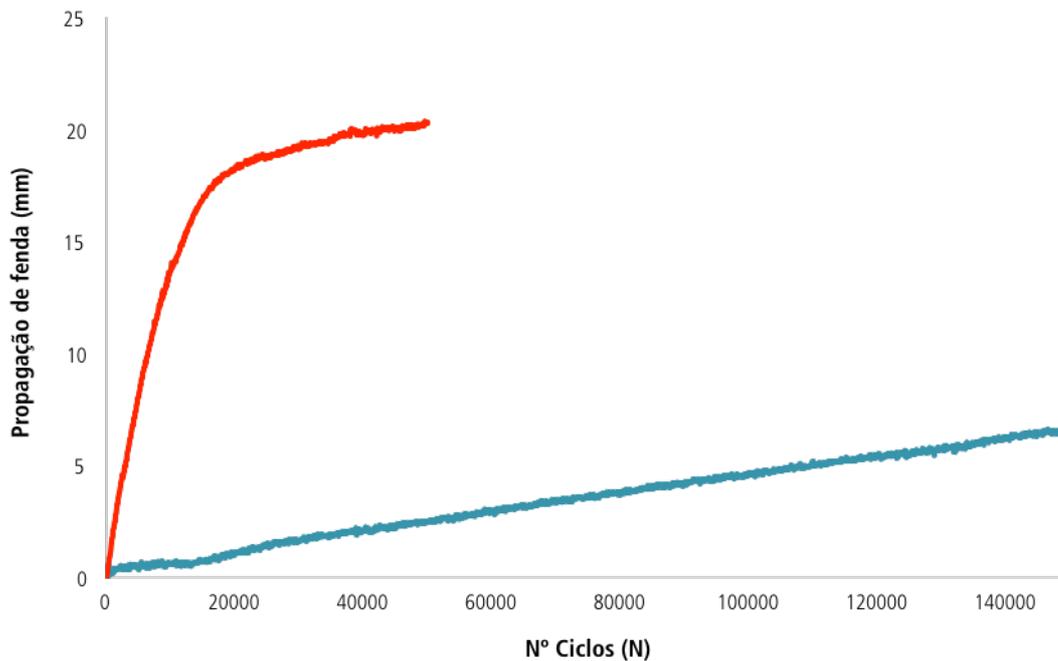


Figura 70 – Propagação da fenda em ensaios de fadiga efetuados com $\delta_{max} = 3.5$ (linha vermelha) e 2.7 (linha azul).

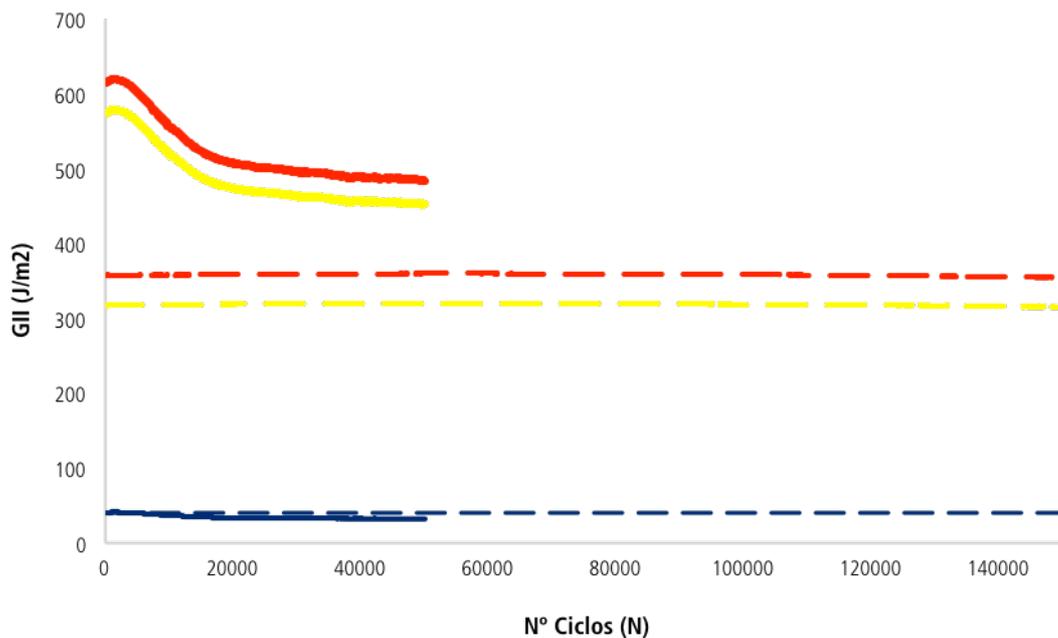


Figura 71 – Evolução de $G_{II\min}$ (linhas azuis) $G_{II\max}$ (linhas vermelhas) e ΔG_{II} (linhas amarelas) em ensaios de fadiga efetuados com $\delta_{max} = 3.5$ (linhas contínuas) e 2.7 (linhas tracejadas).

A figura 71 apresenta as evoluções de G_{IImin} , G_{IImax} e ΔG_{II} correspondentes aos gráficos anteriores. Pode-se observar que no ensaio efetuado com $\delta_{max} = 2.7\text{mm}$ praticamente não houve variação daquelas quantidades durante 150×10^3 ciclos. Isto explica o crescimento linear da fenda com o número de ciclos $N > 20 \times 10^3$, ou seja, a taxa de propagação $\partial a / \partial N$ foi quase constante (figura 70). Naturalmente, o tratamento dos dados tendo em vista a construção do gráfico $\partial a / \partial N$ versus ΔG_{II} ficou facilitado para os ensaios realizados com $\delta_{max} = 2.7\text{mm}$.

Quanto ao ensaio realizado com $\delta_{max} = 3.5\text{mm}$, o tratamento de dados visando a construção do gráfico $\partial a / \partial N$ versus ΔG_{II} consistiu na análise da propagação da fenda com o número de ciclos, identificando zonas lineares de taxa de propagação aproximadamente constante (figura 72).

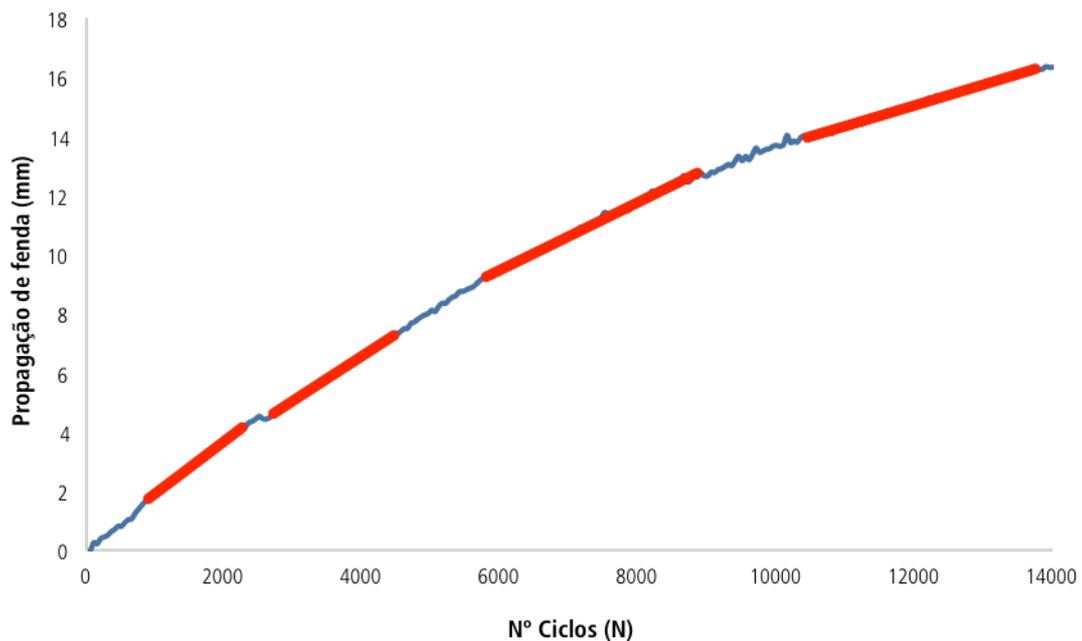


Figura 72 – Identificação de zonas de taxa de propagação aproximadamente constante (assinaladas a vermelho) num ensaio de fadiga efetuado com $\delta_{max} = 3.5\text{mm}$.

No final dos ensaios o conjunto de resultados $\partial a / \partial N$ versus ΔG_{II} de todos os provetes representado em escala logarítmica, apresentado na figura 73, revelou-se claramente consistente com a Lei de Paris, escrita na forma

$$\frac{\partial a}{\partial N} = D \Delta G_j^n \quad (14)$$

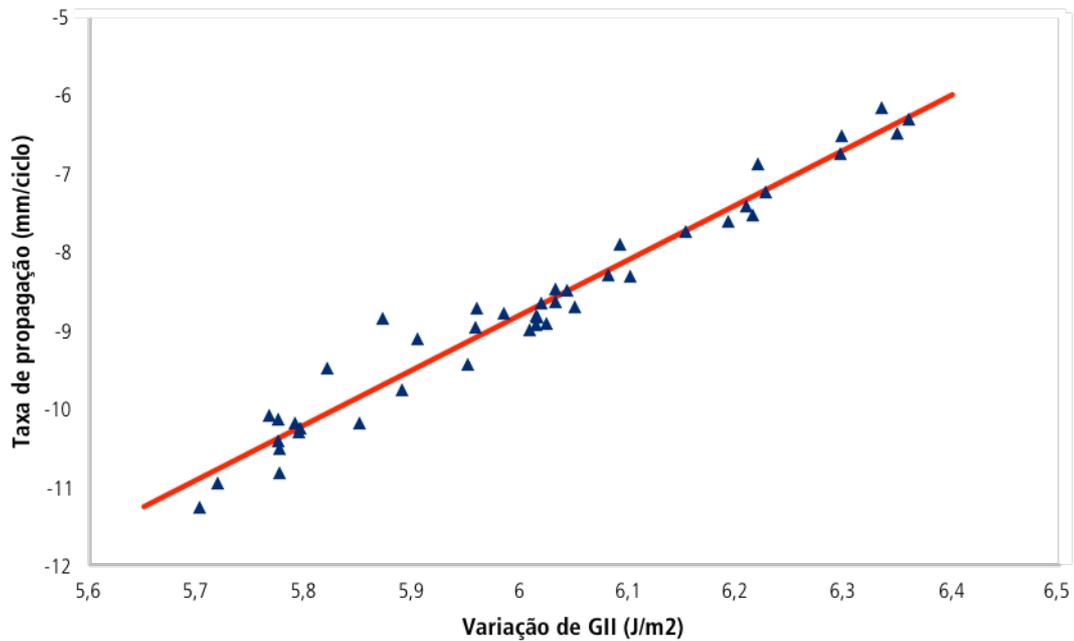


Figura 73 – Taxa de propagação de fenda em função de ΔG_{II} em escala logarítmica para todos os ensaios, incluindo a curva ajustada da Lei de Paris.

De facto, o coeficiente de correlação obtido no ajuste dos dados foi muito elevado (0.98), tendo os parâmetros calculados sido $D = 9.0 \times 10^{-23}$ e $n = 6.99$. A dispersão nos resultados é normal para ensaios de fadiga.

Em resumo, os resultados obtidos são consistentes com os que têm vindo a ser publicados e reforçaram a confiança na MEF. Não obstante, procedeu-se ainda a uma análise micrográfica das superfícies de fratura.

3.6 Análise dos modos de fratura

Para realizar esta análise, os provetes foram manualmente separados em duas metades, após os ensaios e as superfícies de fratura observadas em microscópio ótico. A Figura 74 mostra uma fotografia à escala real (entenda-se, sem nenhum tipo de ampliação para além da lente da câmara) das duas metades de um provete em que foi, sucessivamente, gerada uma pré-fenda, sujeito a ensaio de fadiga e, finalmente, submetido a ensaio estático para medição de G_{IIc} . A parte superior da imagem mostra uma das superfícies externas do provete, onde é possível observar as marcações realizadas aquando da identificação da frente da pré-fenda. Na superfície de fratura da metade inferior podem-se observar as diferenças entre as zonas em que houve propagação no ensaio à fadiga e no ensaio estático. Nestas últimas zonas, a superfície de fratura é claramente mais rugosa devido às deformações locais associadas à propagação rápida. Já na zona de propagação em fadiga, o contacto prolongado entre as superfícies com movimento relativo alternado que envolve sempre algum atrito promoveu um certo grau de polimento.

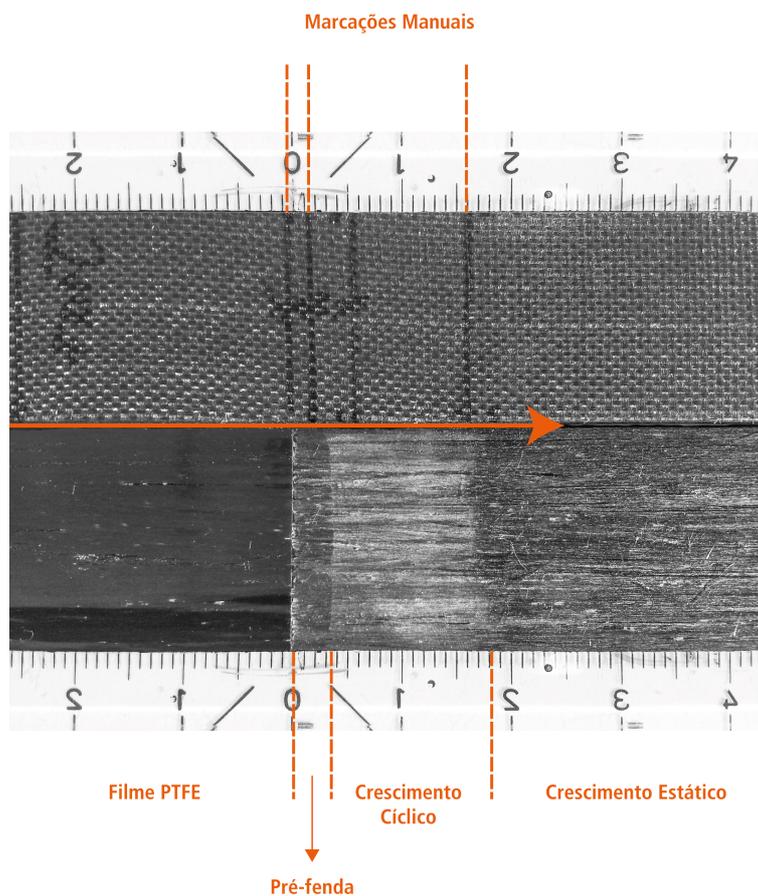


Figura 74 – Superfície externa (acima) e superfície de fratura (abaixo) de um provete.

Pode-se também constatar na figura 74 que as observações ao microscópio subestimam sempre o comprimento da pré-fenda, o que se compreende pela natureza da

propagação em modo II e pela cor negra do material. Além disso, nem a pré-fenda nem a fenda que se propaga durante os ensaios são perfeitamente retas.

Finalmente, é de referir que, dos 14 provetes ensaiados, apenas dois não permitiram a obtenção de resultados válidos devido ao desenvolvimento de delaminagens paralelas à delaminação no plano médio (Figura 75).



Figura 75 – Fotografia tirada através de uma lupa a um provete com dupla fenda.

4 ■ Conclusões e Trabalhos Futuros

4.1 Conclusões

Conforme foi sendo descrito ao longo dos capítulos desta dissertação, a Máquina de Ensaio de Fadiga (MEF) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro foi alvo de várias intervenções que deram resposta ao objetivo principal deste trabalho – o melhoramento da MEF. Do trabalho efetuado podem-se tirar as seguintes conclusões:

- A utilização de uma nova plataforma e de um novo sistema de guiamento permitiu eliminar as folgas existentes na versão anterior da MEF, que eram responsáveis pela oscilação da plataforma durante os ensaios. Estas alterações de índole mecânica e conceptual proporcionaram um funcionamento correto da MEF, bem como a obtenção de resultados mais rigorosos;
- A substituição de resistências elétricas fixas nos circuitos elétricos destinados ao tratamento do sinal da célula de carga por uma resistência variável e por um Dual DAC permitem um ajuste do ganho e do offset relativo ao “zero carga”, características estas que podem ser otimizadas em função do tipo de ensaio a realizar de modo a maximizar o rigor das medições;
- A implementação de algoritmos de tratamento de dados produziu uma filtragem eficaz do ruído eletrónico que não foi possível eliminar do sistema.

Por fim, verificou-se que os resultados de ensaios de delaminação sob fadiga em modo II End-Notched Flexure (ENF) eram claramente consistentes com a conhecida Lei de Paris, o que validou as alterações efetuadas ao longo deste trabalho.

4.2 Trabalhos futuros

Apesar da atual MEF apresentar melhorias substanciais em relação à primeira versão, há ainda uma margem evolutiva considerável. Assim, do mesmo modo que a maioria das alterações efetuadas na MEF no decorrer deste trabalho tinham sido sugeridas em trabalhos anteriores (Carvalho, 2012), são aqui expostos alguns dos pontos considerados importantes para tornar a MEF mais atual, versátil e rigorosa, futuramente:

- Eliminação do ruído por hardware. Apesar dos algoritmos de filtragem de dados implementados reduzirem o ruído e permitirem obter bons resultados, a filtragem por software é, evidentemente, uma solução de recurso;
- Criação de uma interface mais *user-friendly* para a programação da MEF. A interação e comunicação com a MEF envolve, atualmente, a alteração de linhas de código e a utilização de diferentes softwares em simultâneo, o que dificulta a utilização a quem não está familiarizado com estes sistemas;
- Introdução de uma função para monitorizar os resultados do ensaio em tempo real, pois os ensaios podem ser longos;
- Implementação de um sistema de gravação automática de dados. A versão atual da MEF permite a gravação dos dados do ensaio a qualquer altura com o premir de uma tecla. Porém, a duração dos ensaios leva a que, em certas alturas, o utilizador não os possa acompanhar presencialmente, correndo o risco de perda de dados por acidente;
- Alteração dos suportes dos provetes da mesa inferior. Os suportes existentes permitem o ajuste dos diversos graus de liberdade para o correto posicionamento dos provetes. Todavia, o atual sistema não dá acesso fácil e torna as alterações de posicionamento morosas e difíceis. A substituição deste sistema por outro de mais fácil utilização, por exemplo, de aperto rápido, facilitaria bastante a tarefa de preparação dos ensaios;
- Construção de dispositivos que possibilitem ensaios de modo I e de modo-misto I-II. A MEF tem atualmente as características necessárias para a realização dos ensaios DCB e MMB. Todavia, há que construir os dispositivos para o apoio dos provetes e para transmissão da carga.

5 ■ Bibliografia

- ANSCOMBE, F.J. (1960). Rejection of outliers. *Technometrics*, 2, 123-147.
- BARNETT, V. & LEWIS, T. (1994). *Outliers in statistical data* (3rd ed.). New York: Wiley.
- BEGHINI, M. , Bertini, L. & Forte, P. (2006). Experimental investigation on the influence of crack front to fiber orientation on fatigue delamination growth rate under mode II. *Composites Science and Technology*, 66: 240-247.
- BRUNNER, A. J., Blackman, B. R. K. & Davis, P. (2008). A status report on delamination resistance testing of polymer-matrix composites, *Engineering Fracture Mechanics*, 75: 2779-2794.
- BRUNNER, A. J. , S. Stelzer, G. Pinter, G.P. Terrasi (2013). Mode II fatigue delamination resistance of advanced fiber-reinforced polymer–matrix laminates: Towards the development of a standardized test procedure, *International Journal of Fatigue*, 50: 57–62.
- BSC. Permaglide Metric Bushes PAP.P10.
<http://www.bsc.com.au/sites/default/files/products/manuals/Plain%20Bearings%20and%20Rod%20Ends.pdf>. 2012.[Online, Acedido a 4 de Outubro de 2013].
- CARVALHOSO, P. (2012). Finalização de máquina para ensaios de fadiga sob delaminação. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- DESCARTES, R. (1998). *Discourse on the Method of Rightly Conducting One's Reason and of Seeking Truth in the Sciences*. Indianapolis: Hackett Pub Co.
- DIXON, W. J. (1950). Analysis of extreme values. *Annals of Mathematical Statistics*, 21, 488-506.
- DOWLING, N E. (2006). *Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. Prentice Hall, (third edition).
- EVANS, V.P. (1999). Strategies for detecting outliers in regression analysis: An introductory primer. In B. Thompson (Ed.), *Advances in social science methodology*: (Vol. 5, pp. 213-233). Stamford, CT.: JAI Press.
- GRIFFITHS, D.J. (1994). *Introduction to Quantum Mechanics*. Printice Hall.
- HAMILTON, L.C. (1992). *Regressions with graphics: A second course in applied statistics*. Monterey, CA.: Brooks/Cole.

HAWKING, S. (1988). Uma breve história do tempo. Lisboa: Gradiva.

HAWKINS, D.M. (1980). Identification of outliers. London: Chapman and Hall.

IGLEWICZ, B., & Hoaglin, D.C. (1993). How to detect and handle outliers. Milwaukee, WI.: ASQC Quality Press.

JARRELL, M. G. (1994). A comparison of two procedures, the Mahalanobis Distance and the Andrews-Pregibon Statistic, for identifying multivariate outliers. *Research in the schools*, 1, 49-58.

JUDD, C. M., & MCCLELLAND, G. H. (1989). Data analysis: A model comparison approach. San Diego, CA.: Harcourt Brace Jovanovich.

KENANE, M. , BENZEGGAGH , M. L. (1997). Mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites under fatigue loading. *Composites Science and Technology*, 57: 597-605.

LANE, K. (2002). What is robust regression and how do you do it? Paper presented at the Annual Meeting of the Southwest Educational Research Association. Austin, TX.

MATSUBARA, G., Ono, H. & Tanaka, K. (2006). Mode II fatigue crack growth from delamination in unidirectional tape and satin-woven fabric laminates of high strength GFRP, *International Journal of Fatigue*, 28: 1177-1186.

MICROCHIP. MCP4821/MCP4822.

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21953a.pdf>, 2005.[Online, Acedido a 27 de Setembro de 2013].

MILLER, J. (1991). Reaction time analysis with outlier exclusion: Bias varies with sample size. *The quarterly journal of experimental psychology*, 43(4), 907-912.

MORAIS, A. B. & PEREIRA, A.B. (2007). Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy unidirectional laminates. *Composites Part A*, 38: 785-794.

MORAIS, A. B. (2011). Novel cohesive beam model for the End-Notched Flexure (ENF) specimen. *Engineering Fracture Mechanics*, 38: 3017-3029.

MOURA, M., Morais, A. & Magalhães, A. (2009). *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. Publindústria.

NEWTON, R.R., & RUDESTAM, K.E. (1999). *Your statistical consultant: Answers to your data analysis questions*. Thousand Oaks, CA.: Sage.

O'BRIEN, T.K. (1982). "Characterization of Delamination Onset and Growth in a Composite Laminate," in *Damage in Composite Materials (ASTM STP 775)*. K.L. Reifsnider, Eds., PA, Philadelphia, 140.

O'BRIEN, T. Kevin, Johnston William M., Toland Gregory J. (2010). *Mode II Interlaminar Fracture Toughness and Fatigue Characterization of a Graphite Epoxy Composite Material*, NASA Langley Research Center.

ORR, J. M., SACKETT, P. R., & DuBois, C. L. Z. (1991). Outlier detection and treatment in I/O Psychology: A survey of researcher beliefs and an empirical illustration. *Personnel Psychology*, 44: 473-486.

OSBORNE, J. W. (2002). Notes on the use of data transformations. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 8, Available online at <http://ericae.net/pare/getvn.asp?v=8&n=6>. [Online, Acedido em Março de 2013].

PARDINI L. C. (2000). Preformas para Compósitos Estruturais. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 10: 100-109.

PARIS, P. , ERDOGAN, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws, *Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. December 1963, pp.528-534.

PAUL, D., Kelly, L., Venkayya, V & Hess, T. (2002). Evolution of U.S. military aircraft structures technology. *J. Aircraft*, 39: 18-29.

RASMUSSEN, J. L. (1988). Evaluating outlier identification tests: Mahalanobis D Squared and Comrey D. *Multivariate Behavioral Research*, 23(2), 189-202.

ROUSSEUW, P., & LEROY, A. (1987). *Robust regression and outlier detection*. New York: Wiley.

SACHS, L. (1982). *Applied statistics: A handbook of techniques (2nd ed)*. New York: Springer-Verlag.

SCHWAGER, S. J., & MARGOLIN, B. H. (1982). Detection of multivariate outliers. *The annals of statistics*, 10: 943-954.

SINGH, S. (2005). *Big Bang: The Origin of the Universe*. New York: Harper Perennial.

SHINDO, Y. , Takeda, T., Narita, F., Saito, N., Watanabe, S. & Sanada, K. (2009). Delamination growth mechanism in woven glass fiber reinforced polymer composites under mode II fatigue loading at cryogenic temperatures. *Composites Science and Technology*, 69: 1904-1911.

STEVENS, J. P. (1984). Outliers and influential data points in regression analysis. *Psychological Bulletin*, 95, 334-344.

TU Delft, Delft University of Technology: TU delft.

<http://www.lr.tudelft.nl/index.php?id=26757&langen#delamination>. [Online, Acedido a 10 de Outubro de 2013].

VAN SELST, M., & JOLICOEUR, P. (1994). A solution to the effect of sample size on outlier elimination. *The quarterly journal of experimental psychology*, 47(3), 631-650.

WAINER, H. (1976). Robust statistics: A survey and some prescriptions. *Journal of Educational Statistics*, 1: 285-312.

ZEHNDER, A. T. (2007). *Lecture Notes on Fracture Mechanics*. Cornell University.

ZIMMERMAN, D. W. (1994). A note on the influence of outliers on parametric and nonparametric tests. *Journal of General Psychology*, 121: 391-401.

ZIMMERMAN, D. W. (1995). Increasing the power of nonparametric tests by detecting and downweighting outliers. *Journal of Experimental Education*, 64: 71-78.

ZIMMERMAN, D. W. (1998). Invalidation of parametric and nonparametric statistical tests by concurrent violation of two assumptions. *Journal of Experimental Education*, 67: 55-68.

6 ■ Anexos

Anexo A

Características da célula de carga tipo "disco" de acordo com o fabricante

Range	Kg	50
Sensitivity	mV/v	2±0,2
Combined error	%FS	0,05
Creep	%FS/30min	0,05
Input resistance	Ω	406±20
Output resistance	Ω	350±5
Insulation resistance	M Ω	≥5000 (100VDC)
Zero balance	%FS	±1
Temperature effects balance	%FS/10°C	0,02
Temperature effects span	%FS/10°C	0,17
Rated temperature range	°C	-10~+60
Operating temperature range	°C	-20~+80
Purpouse excitation voltage	V	6~12
Allowed excitation voltage	V	3~15
Safe overload	%FS	120
Ultimate overload	%FS	150
Protection		IP65
Material		Alluminium Alloy

Anexo B

Rotina de Comunicação Arduino/DAC

```
//subrotina para DAC (B0 e B1 são binário)
//canal=B0 para DAC A; B1 para DAC B
//ganho=B0 para ganho=2; B1 para ganho=1
//desligar=B0 para DAC desligado; B1 para Vout activo
void dac(byte canal,byte ganho,byte desligar,unsigned int valor){
  for (u=0; u <= 1; u++){ // repete envio de informação para DAC porque o DAC assim obriga
    digitalWrite(10, LOW);
    byte lowByte = valor & 0xff;
    byte highByte = ((valor >> 8) & 0xff) | canal << 7 | ganho << 5 | desligar << 4;
    SPI.transfer(highByte);
    SPI.transfer(lowByte);
    delay (250); //em milisegundos
    digitalWrite(10, HIGH);
  }
}
```

Anexo C

Rotina do Offset do DAC

```
// ***** offset do zero da célula de carga
*****

// DAC B para ajuste GROSSEIRO de offset com ganho 2

if(dacs==1){
  x0=4096;
  x=0;
  dac(B1,B0,B1,x); //DAC B
  dac(B0,B0,B1,2048); //DAC A *****no inicio, colocar a zero e a 2048 os canais B e A
respectivamente
  p = analogRead (A0);
  i=0;
  while (abs(p-offset)>erro && i<=niter){
    i=i+1;
    xm=(x+x0)/2;
    dac(B1,B0,B1,xm); //DAC B
    p = analogRead (A0);
    Serial.print (" DAC GROSSEIRO xm=");
    Serial.print (xm);
    Serial.print (" p=");
    Serial.println (p);
    if (p<offset){
      x0=xm;
    }
    else{
      x=xm;
    }
  }
  if (abs(p-offset)>=erro){ //se este if for falso então a célula já tem o offset certo e não se entra
aqui
  // Se offset não estiver entre p(x) e p(x0) há problemas de convergência,
  // o que é impossível pois trata-se de uma recta, portanto resta a latência que terá de ser
revista.
```

```

// Assim, é necessário usar o DAC de ajuste FINO,
// ou baixar o ganho do DAC B (GROSSEIRO) para 1 e repetir o processo entre x e x0

// DAC A para ajuste FINO de offset com ganho 2
x0=4096;
x=0;
dac(B0,B0,B1,x); //DAC A
p = analogRead (A0);
i=0;
while (abs(p-offset)>erro && i<=niter){
  i++;
  xm=(x+x0)/2;
  dac(B0,B0,B1,xm); //DAC A
  p = analogRead (A0);
  Serial.print ("DAC FINO xm=");
  Serial.print (xm);
  Serial.print (" p=");
  Serial.println (p);
  if (p<offset){
    x0=xm;
  }
  else{
    x=xm;
  }
}
// ***** Ciclo infinito: é equivalente a parar o programa *****
while (1==1) {
  delay (5000);
}
SPI.end();
//Serial.println ("final de ajuste DAC");
// ***** fim de offset do zero da célula de carga
*****

```

Anexo D

Notas do fluxograma

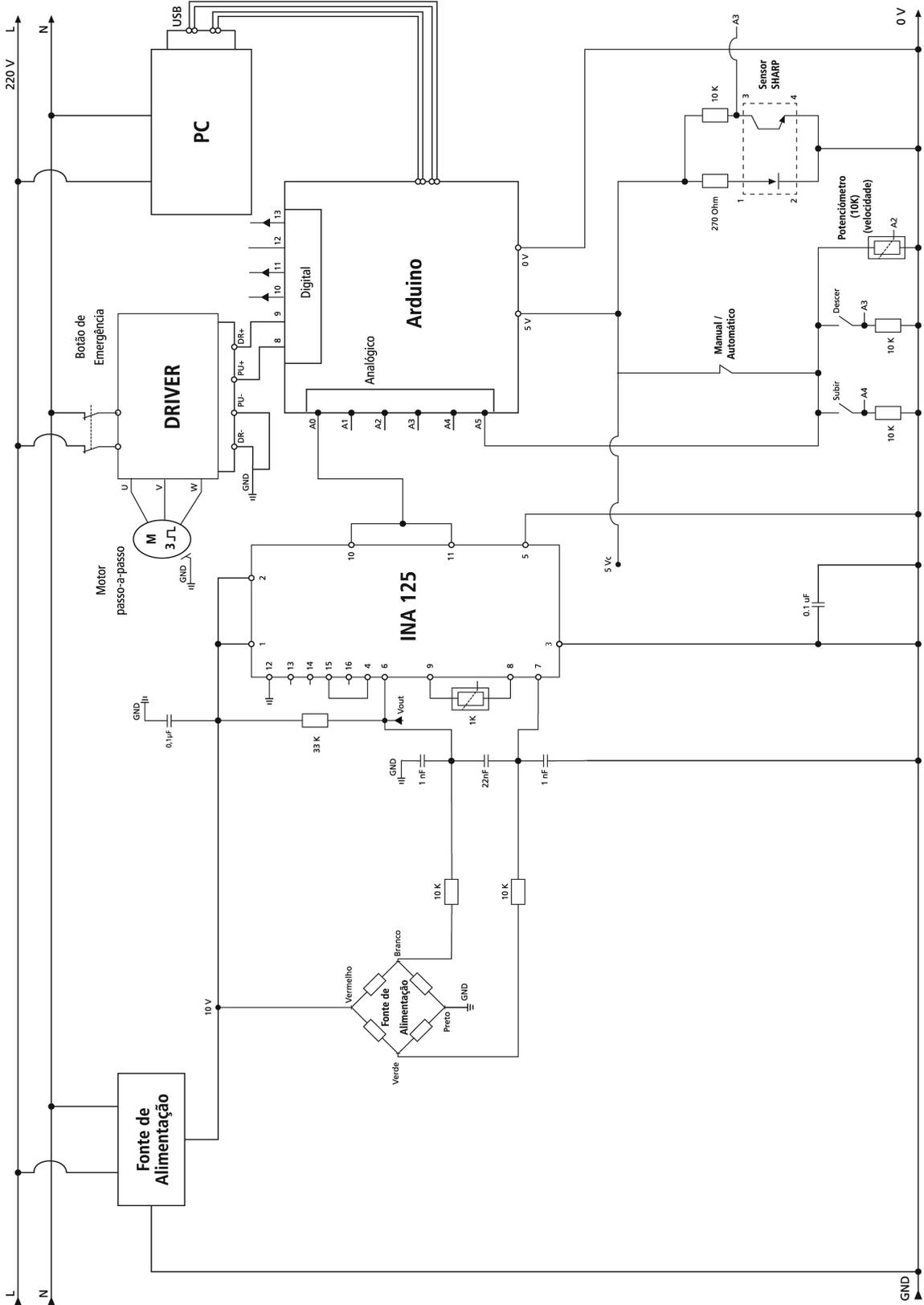
* A primeira parte da linha de programação $|p - \text{offset}| > \text{erro}$ e $i \leq \text{niter}$ permite verificar se o zero carga pretendido e indicado pelo operador (*offset*) é igual ao valor lido pelo Arduino (*p*), a menos de um erro previamente definido, enquanto na segunda parte se vê o nº máximo de iterações foi atingido. À constante “erro” foi atribuído o valor 1 (no início do programa) pois este acaba por definir o intervalo que será dividido pelo DAC fino (DAC A). Os valores lidos da carga (*p*) contêm passo e respectivo *driver* pelo que, por vezes, o *offset* nunca é atingido, ou seja, $|p - \text{offset}| > 1$ é sempre falso. Quando tal acontece, terá de existir uma variável de controlo adicional para ultrapassar o *looping* infinito – há um nº máximo de iterações *niter*.

** Os valores do zero carga pretendido, que se vão obtendo em cada iteração, podem ser visualizados coma função “Serial Monitor” do Arduino.

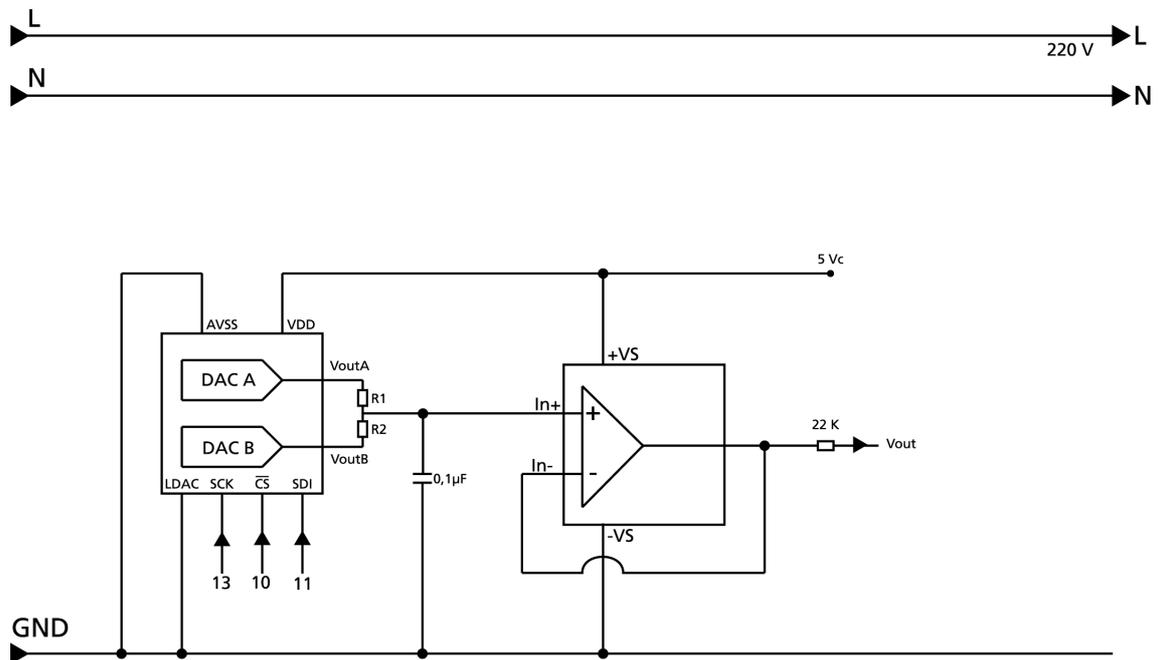
*** Nesta posição do programa, a variável *xm* contém o valor pretendido para o *offset*, a menos de um hipotético erro de ± 1 , ou seja, o valor *p* lido pode ser o zero que se quer, um valor abaixo ou um valor acima. Naturalmente, isto só é verdade se o nº máximo de iterações não tiver sido ultrapassado no ciclo anterior. Para melhorar a precisão do *offset*, as linhas de programação seguintes ativam o DAC fino só no caso de a diferença entre o *p* lido e o *offset* pretendido ser superior ao erro. Nesta altura convém referir que não é razoável pretender um erro igual a zero pois como já foi antes referido, o ruído do sinal não permite que leituras sucessivas da célula de carga (em estado livre – não solicitada) apresentem o mesmo valor.

Anexo E

Esquema elétrico 1/2



Esquema elétrico 2/2



Anexo F

Tabela de Resultados dos Ensaios Efetuados

Amostra	Data	N° Ciclos (x10 ³)	Posição Inicial (mm)	Posição Final (mm)	Erro Posição (mm)
J1a3	26/fev	50	9,60	9,64	0,04
J1a3	27/fev	50	9,66	9,60	0,06
J1a10	28/fev	50	9,58	9,58	0,00
J1a10	8-Mar	50	9,68	9,64	0,04
J1a10	10-Mar	50	9,58	9,65	0,07
J1a11	12-Mar	150	9,69	9,68	0,01
J1a11	13-Mar	150	9,68	9,62	0,06
J1a7	14-Mar	10	9,61	9,54	0,07
J1a7	15-Mar	10	9,59	9,56	0,03
J1a7	15-Mar	10	9,65	9,61	0,04
J1a7	15-Mar	10	9,56	9,58	0,02
J1a7	15-Mar	150	9,56	9,51	0,05
J1a6	18-Mar	50	9,57	9,54	0,03
J1a13	19-Mar	50	9,50	9,46	0,04
J1a2	20-Mar	50	9,62	9,59	0,03
J1a12	21-Mar	50	9,58	9,55	0,03
J1a12	22-Mar	50	9,70	9,71	0,01
J1a13	26-Mar	300	9,65	9,65	0,00
J1a2	28-Mar	600	9,65	9,68	0,03
J1a7	3-Mar	150	9,62	9,65	0,03
J1a9	5-Mar	350	9,52	9,52	0,00
J1a9	08/abr	150	9,62	9,60	0,02
J1a6	10/abr	150	9,56	9,54	0,02
J1a6	15/abr	150	9,58	9,60	0,02
J1a8	16/abr	150	9,70	9,68	0,02
J1a5	17/abr	150	9,62	9,62	0,00
J1a1	19/abr	400	9,65	9,68	0,03
J1a4	22/abr	400	9,70	9,66	0,04
Vazio	29/abr	150	0,00	0,00	0,00
J2b1	30/abr	300	9,62	9,58	0,04
J2b5	02/mai	150	9,58	9,56	0,02
J1a1	06/mai	150	9,63	9,58	0,05
J1a4	08/mai	150	9,68	9,65	0,03
J1a8	13/mai	50	9,59	9,56	0,03
J1a5	17/mai	50	9,62	9,59	0,03
J1a11	5-Jun	100	9,65	9,69	0,04
J1a9	11-Jun	150	9,59	9,54	0,05
J1a6	13-Jun	50	9,62	9,58	0,04
	Total	5240		Média Erro Posição	0,03

Anexo G

Código da Macro de Filtragem

```
Sub Medias50em50v2()
```

```
 '***** ult é a ultima célula com valor>-10, ou seja, é mesmo a ultima *****
```

```
 ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 1 '1 são as células em branco ou não
 numéricas no inicio da folha – título por exemplo. Os dados estão na coluna 1 neste caso a 1ª linha
 está em branco ou com título
```

```
 n = 5 'tamanho filtro
```

```
 n1 = 50 'médias
```

```
 k = 1
```

```
 L = 1
```

```
 valor = 4.8
```

```
 For i = 1 To ult ' calcula as médias de n em n anterior e seguintes e escreve na coluna 2
```

```
     mediaseg = 0
```

```
     mediaant = 0
```

```
 For j = 0 To n - 1
```

```
     mediaseg = mediaseg + Cells(i + j + n + 1, 1) / n
```

```
     mediaant = mediaant + Cells(i + j, 1) / n
```

```
 Next
```

```
 Cells(k, 2) = (mediaseg + mediaant) / 2
```

```
 'Cells(k, 7) = mediaseg
```

```
 'Cells(k, 6) = mediaant
```

```
 k = k + 1
```

```
 Next
```

```
 For i = 1 To ult 'compara os dados da coluna1 (originais) com as médias da colina 2 e filtra pelo
 método das Médias Deslizantes. Escreve os valores bons na coluna 3
```

```
 If Abs(Cells(i, 2) - Cells(i + 5, 1)) < valor Then
```

Cells(L, 3) = Cells(i + 5, 1) 'valor bom

Cells(L, 4) = i + 5 'índice (posição temporal) do valor bom

L = L + 1

End If

Next

'cálculo médias

k = 1

media = 0

b = 0

valori = 1

For i = 1 To L 'cálculo dos pontos médios no intervalo n1

If Cells(i, 4) <= n1 * k Then 'o if é verdadeiro durante cada n1 valores, portando a média é para um espaço TEMPORAL de 50 (n1) pontos originais mas que agora (em cells(i,3)) serão menos

media = media + Cells(i, 3) 'da 1ª vez é calculada a média para os valores existentes na coluna 3 entre i=1 e i=50

b = b + 1

Else

v = Application.LinEst(Range(Cells(valori, 3), Cells(i - 1, 3)), , True, True) 'efetua regressão linear em cada intervalo n1 da coluna 3. Para uma reta $y=mx+b$ é $v(1,1)=m$; $v(1,2)=b$

valori = i 'aqui, valori vai assumir os valores 51,101,...

Cells(k, 7) = v(1, 1) * n1 / 2 + v(1, 2) 'ponto médio obtido da regressão

Cells(k, 8) = -(Cells(k, 7) - 1005.4) / 1.9792 'calibração da célula

Cells(k, 5) = media / b 'valor médio dos pontos existentes no intervalo temporal n1. Naturalmente, este valor tem de ser muito semelhante ao ponto médio da regressão (cells(k,7))

Cells(k, 6) = -(Cells(k, 5) - 1005.4) / 1.9792 'conversão do valor médio anterior em carga

media = Cells(i, 3) 'quando este else terminar, o ciclo for vai continuar para i=52 pelo que se terá de assumir aqui o primeiro valor da média seguinte que será calculada entre 51 e 100 e assim sucessivamente.

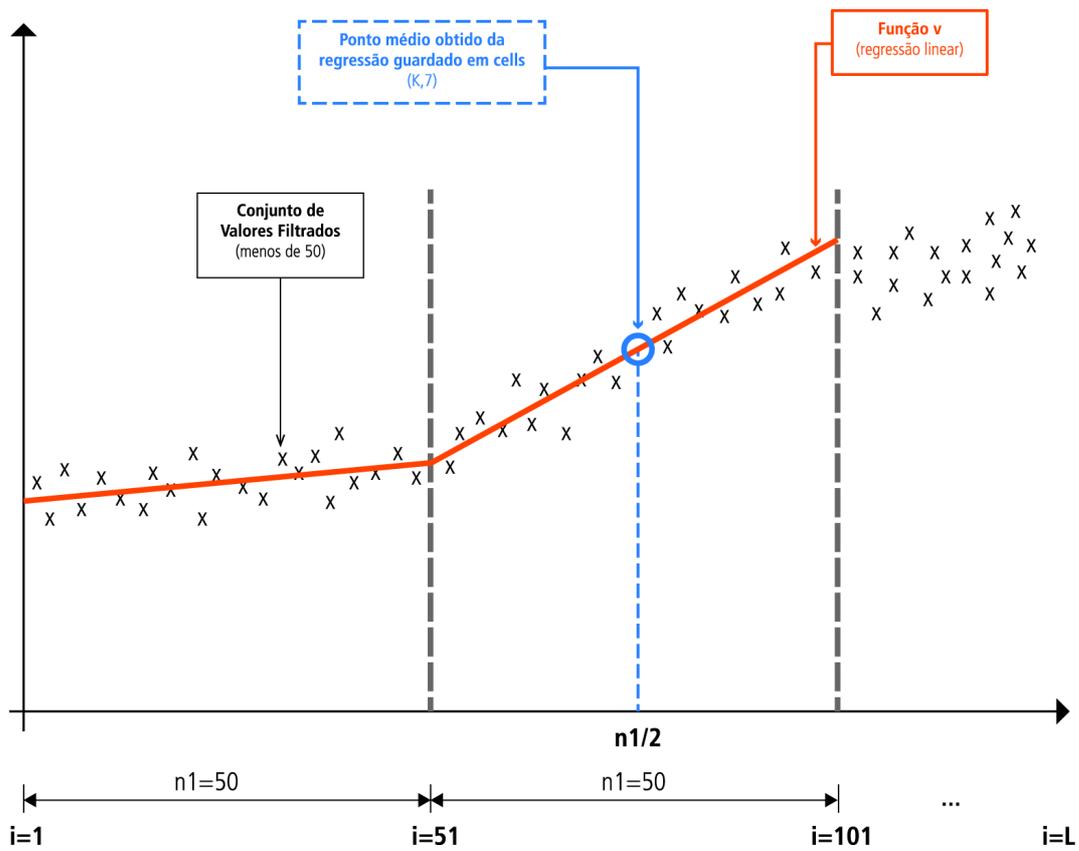
k = k + 1

b = 1

End If

Next

Representação do algoritmo que se encontra descrito na macro anterior.



Método de cálculo dos pontos médios no intervalo n_1