



**André Pinto
Martins**

**Delaminagem à fadiga em modo II de laminados
compósitos**



**André Pinto
Martins**

**Delaminagem à fadiga em modo II de laminados
compósitos**

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 Alfredo Manuel Balacó de Moraes e António Manuel de Bastos Pereira, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Aveiro

Vogais

Professor Doutor Marcelo Francisco de Sousa Ferreira de Moura
Professor Associado com Agregação da FEUP do Departamento de
Engenharia Mecânica

Professor Doutor Alfredo Manuel Balacó de Morais
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao meu Orientador, Professor Doutor Alfredo Manuel Balacó de Morais, pela incansável orientação científica, pela disponibilidade manifestada e preciosa ajuda na realização e organização da dissertação. O seu dotado conhecimento transmitido, simpatia e sentido de humor foram marcantes ao longo destes anos e contribuíram para o enriquecimento da minha formação académica e científica.

Ao meu Co-Orientador, Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira pelo tempo precioso despendido, clareza, rigor e total disponibilidade em solucionar problemas e dúvidas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho. A sua enorme dedicação e preciosa ajuda contribuíram decisivamente para que esta dissertação fosse realizada.

Aos meus Pais por todo o apoio, confiança e compreensão inestimáveis, pelos diversos sacrifícios suportados e constante encorajamento nesta minha etapa tão importante.

Ao meu colega José Sousa pela preciosa ajuda e paciência demonstrada na explicação dos principais passos e etapas iniciais para a realização dos ensaios. Sem dúvida permitiu uma mais rápida adaptação e familiarização de todos os componentes e sistemas envolvidos nas análises realizadas.

A todos os meus Amigos que direta ou indiretamente me ajudaram e apoiaram ao longo destes anos. Pelos bons e inesquecíveis momentos que me proporcionaram nesta caminhada de um culminar de experiências e sentimentos.

Palavras-chave

Máquina de Ensaio; Laminados Compósitos; Fadiga; Delaminação; Modo II; ENF; Lei de Paris; Taxa de Libertação de Energia.

Resumo

A delaminação é um dos modos de ruptura mais frequentes dos laminados compósitos, e que é geralmente tratado no âmbito da Mecânica da Fratura. Tem havido recentemente interesse crescente na caracterização do comportamento à delaminação sob fadiga. O principal objetivo deste trabalho foi estudar a delaminação sob fadiga em modo II de laminados carbono/epóxi. Para isso recorreu-se a ensaios End-Notched Flexure (ENF) sob deslocamentos cíclicos impostos. Os ensaios foram realizados numa máquina de baixo custo desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Os resultados obtidos revelaram-se consistentes com a bem conhecida Lei de Paris, que relaciona a taxa de propagação da fenda com a variação da taxa de libertação de energia de deformação. Foi ainda possível obter valores aproximados do chamado limiar de fadiga.

Keywords

Testing Machine; Laminated Composites; Fatigue; Delamination; Mode II; ENF; Paris Law; Energy Release Rate.

Abstract

Delamination is one of the most common damage modes of laminated composites. It is usually analysed within the scope of Fracture Mechanics. Recently, there has been growing interest in the characterization of fatigue driven delamination. The main objective of the present work was to study the mode II delamination under fatigue of carbon/epoxy laminates through End-Notched Flexure (ENF) tests under imposed cyclic displacements. The tests were conducted on a low cost machine developed at the Department of Mechanical Engineering of the University of Aveiro. The results proved to be consistent with well-known Paris law, which relates the crack propagation rate with the variation of the strain-energy release rate. It was also possible to obtain approximate fatigue thresholds.

ÍNDICE

Índice	i
Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas e Nomenclatura	ix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Prefácio e Objetivos	1
1.2. Perspetiva Global dos Materiais Compósitos	3
Capítulo 2	7
Mecânica da Fratura	7
2.1. Introdução.....	7
Capítulo 3	15
Delaminagem à Fadiga em modo II	15
3.1. Introdução.....	15
Capítulo 4	23
Equipamentos e amostras.....	23
4.1. Máquina de Ensaios de Fadiga (MEF)	23
4.1.1. Funcionamento e componentes estruturais da MEF	24
4.1.2. Funcionamento e componentes eletrónicos da MEF	28
4.2. Caraterísticas dos provetes.....	30
4.3. Medição da flexibilidade das células de carga	31
4.4. Calibração da célula de carga da MEF	35
4.5. Filtragens no tratamento dos resultados.....	37
4.6. Utilização do <i>software</i> LabVIEW.....	38
4.6.1 Calibração da célula de carga.....	40
4.6.2 Modo de aquisição de dados.....	43
Capítulo 5	45
Procedimentos na realização dos ensaios	45
Capítulo 6	49
Resultados e Discussão dos Ensaios	49

5.1. Ensaio quise-estáticos.....	49
5.2. Ensaio de fadiga	51
Capítulo 7	59
Conclusões e trabalho futuros	59
Referências	63
Anexos	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Classificação de materiais compósitos de acordo com o tipo de matriz [Callister e Rethwisch, 2009].	3
Figura 1.2 - Representação esquemática da orientação das fibras contínuas: (a) fibras unidirecionais; (b) tecido bidirecional; (c) tecidos tridimensionais [Moura e outros, 2011; Pardini, 2000].	5
Figura 1.3 - Estrutura esquemática de compósitos laminados [LEPCom, 2014].	6
Figura 1.4 - A delaminação em compósitos [TU Delft, 2014].	6
Figura 2.1 - Fissura interna a toda a espessura do sólido [Anderson, 1994].	8
Figura 2.2 - Representação do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fissura [Tarnowski, 2003].	9
Figura 2.3 - Modos de propagação [Anderson, 1994].	9
Figura 2.4 - Representação ilustrativa da configuração dos ensaios DCB, ENF e MMB [Pereira e Morais, 2008].	10
Figura 2.5 - Diagrama esquemático da vida à fadiga de algumas estruturas [Sutherland, 1999].	11
Figura 2.6 - Simbologia utilizada para definir os componentes de tensões cíclicas.	12
Figura 2.7 - Representação ilustrativa do comportamento típico dos materiais à fadiga [Sousa, 2013].	13
Figura 3.1 - Ensaio ENF modificado por Matsubara e outros (2006).	15
Figura 3.2 - Resultados obtidos por Matsubara e outros (2006).	16
Figura 3.3 - Taxas de crescimento da fenda observadas em provetes unidirecionais (a) e multidirecionais (b) por Beghini e outros (2006).	17
Figura 3.4 - Ensaio 4ENF utilizado por Shindo e outros (2009).	18
Figura 3.5 - Resultados obtidos por Shindo e outros (2009).	18
Figura 3.6 - Comportamento à fadiga de dois provetes ENF a partir de pré-fenda (azul) e do filme (laranja) [O'Brien e outros, 2010].	19
Figura 3.7 - Ensaio ELS.	20
Figura 3.8 - Resultados obtidos por Brunner e outros (2013).	21
Figura 4.1 - Estrutura da MEF	24
Figura 4.2 - Vista isométrica superior da plataforma e outros componentes; 3- plataforma; 11- casquilho adaptador; 10- casquilho deslizante; 4- varão.	24
Figura 4.3 - Vista isométrica inferior da plataforma e outros componentes; 4- varão; 12- tampa do casquilho adaptador; 3- plataforma.	25

Figura 4.4 - Componentes para transmissão de força; 13- pino de carregamento; 10- adaptador para o pino de carregamento; 9- célula de carga; 3- plataforma.	26
Figura 4.5 - Dispositivo para a fixação do provete.....	26
Figura 4.6 - a) Sistema ótico; sensor ótico (esquerda); b) apoio e pino fim de curso (direita).....	27
Figura 4.7 - Exemplo de visualização de dados recebidos do sensor ótico com o programa <i>Processing</i> [Carvalhoso, 2012].	28
Figura 4.8 - Componentes principais da MEF e respetivas ligações.	28
Figura 4.9 - Painel de controlo inserido na parte superior da caixa de suporte do quadro elétrico.	30
Figura 4.10 - Geometria do provete ENF.	31
Figura 4.11 - Máquina Shimadzu™ AG 50KN-G.	31
Figura 4.12 - Montagem para medição da flexibilidade das células de carga da MEF e Shimadzu™.	32
Figura 4.13 - Gráfico ilustrativo força-deslocamento para o cálculo da flexibilidade das células de carga da MEF e Shimadzu™.	33
Figura 4.14 - Montagem para medição da flexibilidade da célula de carga da Shimadzu™.	34
Figura 4.15 - Gráfico ilustrativo força-deslocamento para o cálculo da flexibilidade da célula de carga da Shimadzu™.	34
Figura 4.16 - Gráfico referente à calibração da célula de carga para valores de <i>offset</i> de 1000 e 500.....	36
Figura 4.17 - Chassi NI cDAQ-9178 USB de 8 slots.....	38
Figura 4.18 - Módulo de ponte NI 9237.....	39
Figura 4.19 - Adaptador RJ50 para a ligação da célula de carga.....	39
Figura 4.20 - Painel de visualização dos resultados.	40
Figura 4.21 - Tabela do diagrama de blocos que ilustra a relação dos valores de entrada com os de saída.	41
Figura 4.22 - Gráfico referente à calibração da célula de carga	41
Figura 4.23 - Dados obtidos para a correspondência dos valores de carga.	42
Figura 4.24 - Visualização do gráfico inicial antes da realização dos ensaios de fadiga.	42
Figura 4.25 - Aquisição de dados com frequência de 25 Hz, que se revelou insuficiente.	43
Figura 4.26 - Aquisição de dados com frequência de 50 Hz, que acabou por se revelar satisfatória.	44
Figura 5.1 - Marcações num dos provetes das medidas para os ensaios quase-estáticos e de fadiga.	45
Figura 5.2 - Fotografia de ensaio quase-estático ENF efetuado na máquina Shimadzu™.	46

Figura 5.3 - Pino cilíndrico introduzido no provete para separar as duas metades do provete.	48
Figura 6.1 - Curvas carga-deslocamento típicas de ensaios quase-estáticos.	49
Figura 6.2 - Exemplos de Curvas R.	51
Figura 6.3 - Cargas mínima e máxima durante ensaios em condições de propagação lenta com as combinações (δ_{\min} , δ_{\max}) indicadas.	52
Figura 6.4 - Cargas mínima e máxima durante ensaios em condições de propagação rápida com as combinações (δ_{\min} , δ_{\max}) indicadas.	52
Figura 6.5 - Exemplos de evolução do comprimento de fenda efetivo com o número de ciclos em condições de propagação lenta com as combinações (δ_{\min} , δ_{\max}) indicadas.	53
Figura 6.6 - Exemplos de evolução do comprimento de fenda efetivo com o número de ciclos em condições de propagação rápida com as combinações (δ_{\min} , δ_{\max}) indicadas.	54
Figura 6.7 - Exemplos de evolução de $G_{II\min}$ e de $G_{II\max}$ com o número de ciclos em condições de propagação rápida com as combinações (δ_{\min} , δ_{\max}) indicadas.	54
Figura 6.8 - Resumo de resultados da_c/dN versus $\Delta G_{II}/G_{IIc}$ e ajuste pela Lei de Paris.	55
Figura 6.9 - Resumo de resultados da_c/dN versus $\Delta G_{II}/G_{IIc}$ medidos no trabalho presente e por Sousa (2013). Incluem-se as aproximações da Lei de Paris aos resultados de cada trabalho e globais.	56
Figura 6.10 - Resumo de resultados da_c/dN versus $G_{II\max}/G_{IIc}$ medidos no trabalho presente e por Sousa (2013).	57
Figura 6.11 - Resumo de resultados da_c/dN versus $\Delta G_{II}/G_{IIc}$ medidos no trabalho presente e por Sousa (2013) agrupados por valores de $G_{II\max}/G_{IIc} = 0.37$ a 0.51	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Resultados dos três ensaios à compressão para o cálculo da flexibilidade das duas células de carga.	33
Tabela 4.2 - Resultados dos três ensaios à compressão para o cálculo da flexibilidade da célula de carga da Shimadzu TM	35
Tabela 6.1 – Módulos de flexão e taxas críticas de libertação de energia de deformação medidas.	50
Tabela 6.2 - Ensaios em que não se verificou propagação de fenda durante 100000 ciclos.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E NOMENCLATURA

ΔG_j – Variação da taxa de libertação de energia de deformação

$2L$ – Vão

4ENF – 4-Point End-Notched Flexure

a – Comprimento da fenda

B – Largura do provete

C – Flexibilidade ou *compliance*.

C_{Lc} – Flexibilidade da célula de carga da MEF

D – Parâmetro da Lei de Paris

DCB – Double Cantilever Beam

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

E_1 – Módulo de flexão

ELS – End-Loaded Split

ENF – End-Notched Flexure

G_{13} – Módulo de corte

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

$G_{II\max}$ – Taxa máxima de libertação de energia de deformação em modo II

$G_{II\min}$ – Taxa mínima de libertação de energia de deformação em modo II

G_j – Taxa de libertação de energia de deformação

G_{jc} – Taxa crítica de libertação de energia de deformação

$G_{j\max}$ – Taxa máxima de libertação de energia de deformação

$G_{j\min}$ – Taxa mínima de libertação de energia de deformação

h – Espessura

INEGI – Instituto de Engenharia e Gestão Industrial

K_j – Fator de intensidade de tensão

m – Parâmetro da Lei de Paris

MEF – Máquina de Ensaios de Fadiga

MIEM – Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

N – Número de ciclos

NI – *National Instruments*.

P – Carga

PEEK – Poli-éter-éter-cetona

PEI – Poli-éter-imida

PPS – Polifenileno sulfito

PSU – Polisulfona

R – Rácio de tensões

t – Tamanho do intervalo

USB – Universal serial bus

δ_i – Deslocamento aparentemente imposto

δ_{\max} – Deslocamento máximo

δ_{\min} – Deslocamento mínimo

δ_r – Deslocamento real

σ – Tensão

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Prefácio e Objetivos

Os compósitos são originários das primeiras sociedades agrícolas e, de certa forma, foram esquecidos durante séculos. Estes materiais iniciaram a sua caminhada de sucesso em meados do século XX e daí em diante têm tido uma expansão notável. As aplicações de materiais compósitos vão atualmente desde simples artigos utilizados no dia-a-dia até componentes para indústrias de ponta, como é o caso das indústrias aeronáutica e aeroespacial.

Com o avanço tecnológico os requisitos exigidos aos materiais mudaram, favorecendo o aparecimento de compósitos de elevado desempenho. Para o sucesso destes materiais tem contribuído o desenvolvimento de novas tecnologias de fabrico, acompanhado pela alteração e melhoramento de várias características como a rigidez, resistência mecânica, durabilidade, custos, etc.

Apesar dos progressos conseguidos, subsistem alguns obstáculos à generalização das aplicações estruturais de compósitos, associados aos elevados custos dos materiais, meios tecnológicos e à complexidade do comportamento mecânico. Na realidade, devido a lacunas no conhecimento dos mecanismos de dano e de ruína, há um enorme potencial de otimização de estruturas compósitas. Um dos modos de dano mais perigoso dos laminados compósitos de alto desempenho é a delaminação, analisada geralmente no âmbito da Mecânica da Fratura.

Realizaram-se recentemente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (DEM-UA) trabalhos que consistiram na conceção de uma

máquina de ensaios de fadiga (MEF) de baixo custo e no melhoramento da mesma, tanto a nível eletrónico como mecânico. Deste modo, a MEF tornou-se mais versátil e permitiu obter resultados mais rigorosos. Nestas circunstâncias, este trabalho consistiu principalmente na realização de ensaios de delaminação sob fadiga em modo II de provetes de laminados carbono/epóxico. Os ensaios foram do tipo *End-Notched Flexure* sob deslocamentos cíclicos impostos, tendo como objetivos principais: verificar se os resultados eram consistentes com a Lei de Paris e, caso afirmativo, obter os parâmetros da referida lei.

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

- O primeiro capítulo apresenta uma breve revisão dos tipos e das características dos materiais compósitos para aplicações estruturais.
- No segundo capítulo são revistos alguns conceitos base da Mecânica da Fratura, dando ênfase aos mais relevantes para este trabalho.
- O terceiro capítulo é dedicado ao comportamento à delaminação sob fadiga de materiais compósitos, procedendo a uma revisão do estado do conhecimento na caracterização da delaminação sob fadiga em modo II.
- O quarto capítulo descreve os componentes e o funcionamento da máquina de ensaios de fadiga (MEF) concebida no Departamento de Engenharia Mecânica.
- No quinto capítulo são descritos todos os procedimentos seguidos nos ensaios quase-estáticos e de fadiga efetuados.
- No sexto capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios quase-estáticos e de fadiga realizados.
- O sétimo capítulo apresenta as principais conclusões do trabalho efetuado e sugere possíveis trabalhos futuros.

1.2. Perspetiva Global dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos resultam da combinação de dois ou mais constituintes imiscíveis que diferem entre si na forma e na composição química. Estes materiais apresentam propriedades específicas significativamente diferentes daquelas que cada constituinte apresenta separadamente, tendo uma interface reconhecível entre aqueles [Matthews e Rawlings, 1999]. Os constituintes são geralmente dois: a matriz e o reforço, que é fibroso nos compósitos para aplicações estruturais. Não obstante, o comportamento da interface entre a matriz e o reforço é relevante para a resistência mecânica do compósito [Rezende e outros, 2011]

A matriz de compósitos reforçados com fibras apresenta variadas funções: dar forma estável ao compósito; assegurar a distribuição eficiente da carga pelas fibras; proteger as fibras do meio envolvente [Hollaway, 1993; Callister e Rethwisch, 2009]. Apenas uma parcela pequena das solicitações principais é absorvida pela matriz.

Os materiais compósitos podem classificar-se segundo vários critérios, sendo precisamente o tipo de matriz um dos mais relevantes. Podemos assim distinguir compósitos de matriz metálica, cerâmica e polimérica (figura 1.1). Devido à facilidade de processamento e baixo peso específico, os compósitos de matriz polimérica são os mais importantes em termos de desempenho e de campo de aplicações.

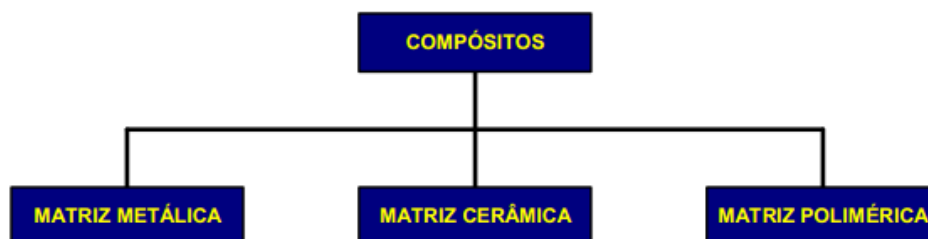


Figura 1.1 - Classificação de materiais compósitos de acordo com o tipo de matriz [Callister e Rethwisch, 2009].

As matrizes de natureza polimérica dividem-se em duas categorias principais: termoplásticas e termoendurecíveis. Em geral, os termoplásticos apresentam maior resistência ao impacto, maior tenacidade e bastante menor higroscopicidade em comparação com os polímeros termoendurecíveis [Moura e outros, 2011]. São também facilmente processados por injeção ou por termoformação, e podem ser reciclados. As propriedades térmicas dos termoplásticos são, muitas vezes, determinantes para a seleção da matriz, dada a forte influência que têm não só no posterior desempenho dos compósitos à temperatura de serviço, mas também na facilidade de processamento. Nas aplicações mais avançadas e muito exigentes utilizam-se termoplásticos de custo mais elevado e com maior resistência à temperatura, como a poli-éter-imida (PEI), a polisulfona (PSU), o polifenileno sulfito (PPS) e a poli-éter-éter-cetona (PEEK) [Crawford, 2002; Reyne, 1990; McCrum e outros, 1999; Plascams, 1998]. A maior desvantagem dos compósitos de matriz termoplástica surge na dificuldade em impregnar completamente os reforços [Moura e outros, 2011].

Os termoendurecíveis, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser reprocessados. Estes polímeros são processados sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes, tipicamente, a resina, o acelerador e o catalisador. Quando estes componentes são misturados na proporção adequada, dá-se a polimerização e a constituição da estrutura tridimensional num processo que se designa por ‘cura’. Em algumas resinas é necessária a aplicação adicional de calor e pressão para se efetuar a cura. Nos outros casos a cura ocorre à temperatura ambiente. Uma das principais vantagens deste tipo de resinas é a maior facilidade de impregnação do reforço, uma vez que, antes da cura, apresentam viscosidades muito inferiores às dos termoplásticos [Moura e outros, 2011]. As resinas mais utilizadas nos polímeros reforçados por fibras são as termoendurecíveis do tipo epóxido, poliéster e vinilester [Callister e Rethwisch, 2009; Hollaway e Leeming, 1999; ACI, 1996].

Por seu turno, o reforço é o principal responsável pelo bom desempenho do material compósito, uma vez que é este que suporta quase a totalidade das cargas. Para isso, o reforço deve ser de elevada resistência mecânica e de elevada rigidez [Ventura,

2009; Moura e outros, 2011]. Além disso, é sob a forma de fibra contínua que o reforço é mais eficaz [Callister e Rethwisch, 2009]. As fibras mais utilizadas em compósitos de matriz polimérica são as fibras de carbono, de vidro e de aramida.

Na realidade, as propriedades dos compósitos dependem não só das propriedades da fibra e da matriz, mas também da proporção de cada constituinte e da orientação das fibras. Os compósitos de fibras contínuas podem classificar-se em (figuras 1.2 e 1.3):

- Unidirecionais, quando as fibras são alinhadas numa única direção;
- Bidirecionais, se as fibras estão alinhadas em duas direções, normalmente perpendiculares;
- Tridimensionais, caso as fibras estejam alinhadas segundo três direções, habitualmente também perpendiculares;
- Multidirecionais, quando as fibras estão dispostas segundo várias direções, geralmente através de uma estrutura laminada de camadas com diferentes orientações.

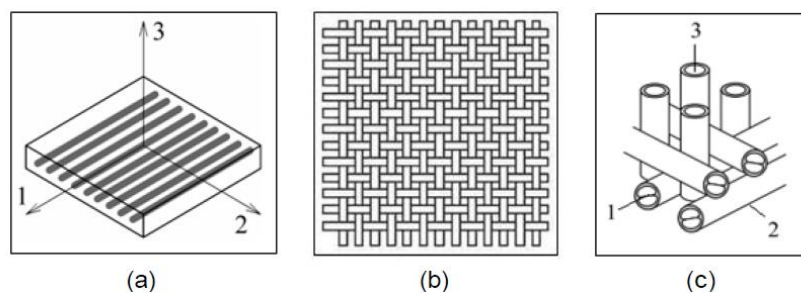


Figura 1.2 - Representação esquemática da orientação das fibras contínuas: (a) fibras unidirecionais; (b) tecido bidirecional; (c) tecidos tridimensionais [Moura e outros, 2011; Pardini, 2000].



Figura 1.3 - Estrutura esquemática de compósitos laminados [LEPCom, 2014].

São as propriedades na direção das fibras que mais beneficiam das excelentes propriedades das fibras, enquanto nas restantes direções são fortemente condicionadas pela matriz [Moura e outros, 2011]. Daí o facto dos compósitos terem frequentemente fibras orientadas segundo várias direções, sendo isso conseguido mediante o empilhamento de camadas com reforço planar. As orientações das camadas podem ser escolhidas no sentido de otimizar a rigidez e a resistência para determinada aplicação [Hollaway e Leeming, 1999]. Todavia, a ligação entre camadas permanece muito dependente das propriedades da matriz, o que torna os laminados compósitos suscetíveis de descolamento de camadas, modo de rotura que se designa habitualmente por delaminação [Moura e outros, 2011] (figura 1.4). A análise da delaminação é geralmente realizada no âmbito da Mecânica da Fratura, que é por isso objeto do próximo capítulo.

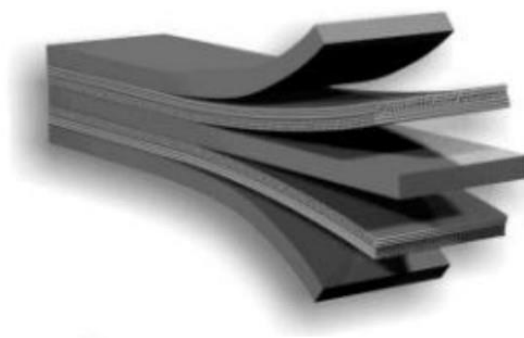


Figura 1.4 - A delaminação em compósitos [TU Delft, 2014].

CAPÍTULO 2

MECÂNICA DA FRATURA

2.1. Introdução

Os projetos convencionais baseiam-se nas tensões geradas pelas cargas aplicadas e na resistência mecânica do material [Júnior, 2004]. Esta abordagem considera o material como um meio contínuo e isento de defeitos [Strohaecker, 1999]. Na realidade, as estruturas podem conter defeitos apreciáveis resultantes dos processos de fabrico ou da ação dos carregamentos em serviço. Por isso a Mecânica da Fratura apresenta-se como uma abordagem mais adequada para certas situações de engenharia [Bastian e outros, 1989]. A Mecânica da Fratura determina as condições em que os defeitos existentes são suscetíveis de causar rotura catastrófica. Permite também determinar se, durante o período de vida da estrutura, as dimensões dos defeitos se mantêm inferiores às críticas, ainda que se possam propagar de uma forma estável [Strohaecker, 1999].

Inicialmente, a Mecânica da fratura só era usada em ligas metálicas de alta resistência, sobretudo na indústria aeroespacial, de onde surgiu a chamada Mecânica da Fratura Linear Elástica. Posteriormente foi aplicada em construções soldadas, originando a chamada Mecânica da Fratura Elasto-Plástica. Mais recentemente, com o aumento do uso dos materiais compósitos, tem sido cada vez mais aplicada a estes materiais.

As análises da Mecânica da Fratura Linear Elástica baseiam-se no fator de intensidade de tensão (K) e/ou na taxa de libertação de energia de deformação (G), conceitos que resultaram dos trabalhos de Inglis (1913) e Griffith (1920). G baseia-se no balanço energético que envolve o trabalho realizado pelas forças exteriores W e a energia de deformação interna U . A sua definição matemática é

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} \quad 2.1)$$

em que dA é a variação de superfície da fissura ($dA = 4Bda$ no exemplo da figura 2.1, sendo B a espessura da peça e admitindo que a fenda se propaga igualmente a partir das duas extremidades) [Anderson, 1994].

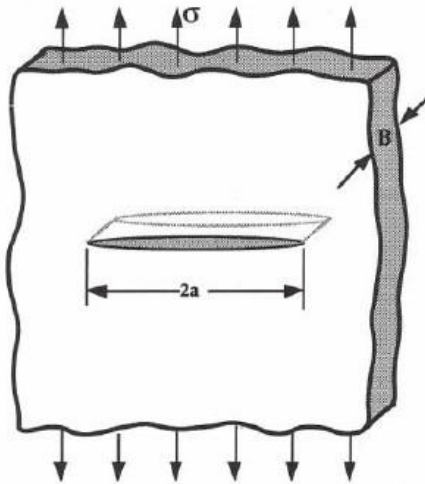


Figura 2.1 - Fissura interna a toda a espessura do sólido [Anderson, 1994].

G mede a dissipação de energia numa zona dita de processo, junto à extremidade da fenda. Entre os mecanismos de dissipação de energia encontra-se a deformação inelástica localizada e a formação de micro-fissuras, que nos compósitos podem ocorrer na matriz e na interface. Haverá propagação da fenda quando G atinge G_c , que se designa por Taxa Crítica de Libertação de Energia, e que é uma propriedade do material. G_c caracteriza a resistência do material à propagação de fendas através da dissipação local de energia. A zona de processo deverá ter um comprimento relativamente pequeno para que seja possível aplicar a Mecânica da Fratura Linear Elástica [Anderson, 1994].

Por outro lado, o Fator de Intensidade de Tensão K traduz o nível geral do campo de tensões junto à extremidade da fenda [Anderson, 1994]. K torna-se necessário porque a hipótese de elasticidade linear e de fenda de espessura nula geram uma singularidade, isto é, as tensões tendem para infinito para valores pequenos da distância r (figura 2.2).

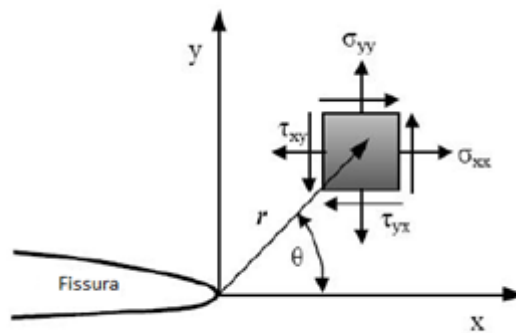


Figura 2.2 - Representação do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fissura [Tarnowski, 2003].

De facto, as tensões locais são sempre proporcionais a $K/(2\pi r)^{1/2}$, sendo K função da geometria e do carregamento imposto. Por exemplo, no caso da figura 2.1 e se a placa tiver uma largura muito maior do que o comprimento da fenda $2a$, $K = \sigma_R(\pi a)^{1/2}$ [Westergaard, 1939]. A propagação da fenda ocorre quando $K = K_c$, designado por tenacidade do material.

Na realidade, as fendas podem propagar-se segundo três modos básicos (figura 2.3). O modo I implica abertura da fenda por tensões locais de tração. Os modos II e III são modos de corte. No modo II as superfícies da fenda têm movimento relativo perpendicular à frente da fenda, enquanto no modo III esse movimento é paralelo à frente da fenda. Nas situações de carregamento geral há combinação de modos.

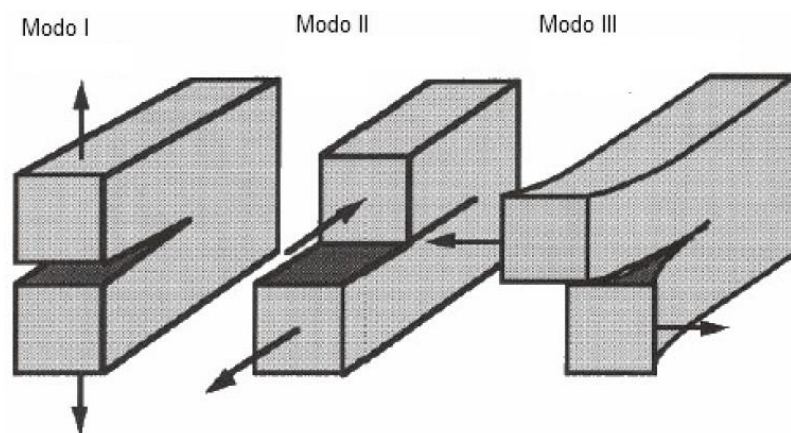


Figura 2.3 - Modos de propagação [Anderson, 1994].

Os fatores de intensidade de tensão K_j e as taxas de libertação de energia de deformação G_j , $j = \text{I, II e III}$, relacionam-se através de equações do tipo [Melo, 2012]

$$G_j = \Psi K_j^2 \quad (2.2)$$

Sendo Ψ uma função das constantes elásticas.

Na caracterização da resistência à delaminação em materiais compósitos usam-se as taxas críticas de libertação de energia de deformação G_{jc} [Brunner e outros, 2008]. Estas podem ser medidas através de vários ensaios, sendo os principais o ensaio em Modo I *Double Cantilever Beam* (DCB), o ensaio em Modo II *End-Notched Flexure* (ENF) e o ensaio de modo misto I-II *Mixed-Mode Bending* (MMB) (figura 2.4) [Pereira e Morais, 2008]. Em todos os casos, os provetes são unidireccionais e têm uma delaminação inicial criada durante o fabrico.

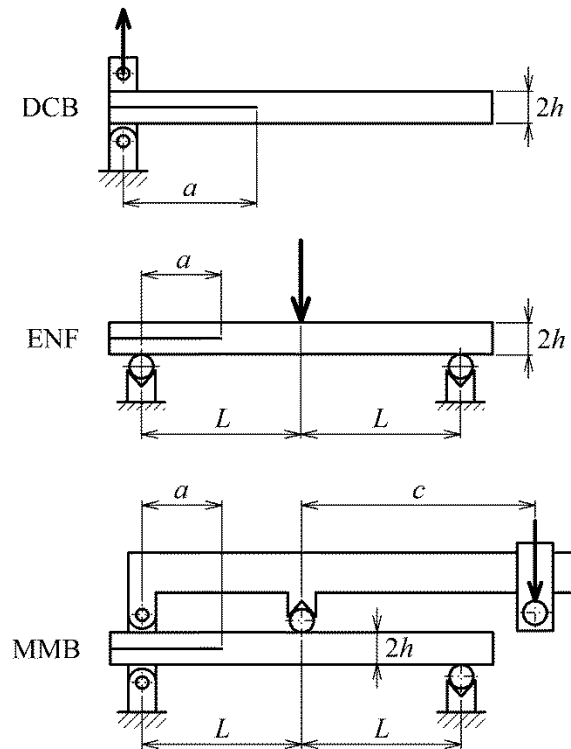


Figura 2.4 - Representação ilustrativa da configuração dos ensaios DCB, ENF e MMB [Pereira e Morais, 2008].

Para obter G_j é necessário medir algumas grandezas essenciais durante os ensaios, tais como o comprimento de fenda a , a carga aplicada P e o deslocamento δ no ponto de carregamento. Aplica-se geralmente o chamado método da flexibilidade [Zhender, 2007], definida como $C = \delta/P$, segundo o qual

$$G_j = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (2.3)$$

equação dita de Irwin-Kies.

O projeto à fadiga é um campo de aplicação importante da Mecânica da Fratura. De facto, a maioria dos elementos estruturais encontra-se sob a ação de cargas cíclicas abaixo da resistência quase-estática dos materiais. A natureza cíclica das cargas pode provocar a formação e propagação de defeitos suscetíveis de conduzir à rotura. O dimensionamento à fadiga assume portanto grande importância no contexto do projeto de estruturas, determinando a vida útil destas, como se exemplifica na figura 2.5 [Sutherland, 1999].

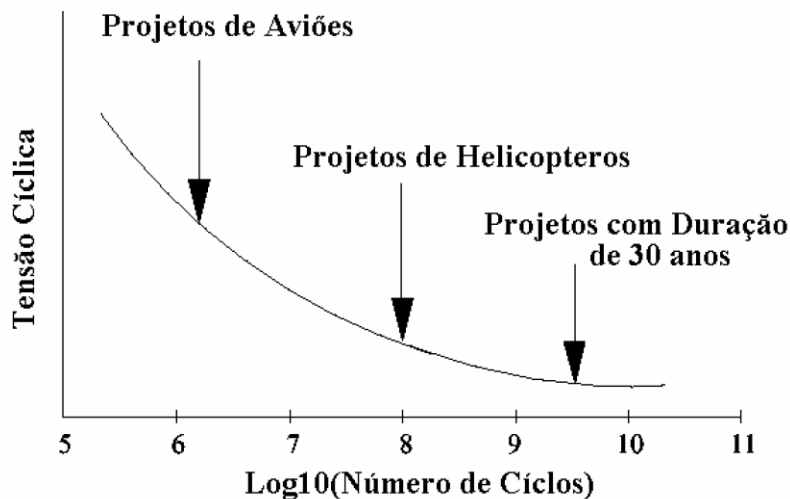


Figura 2.5 - Diagrama esquemático da vida à fadiga de algumas estruturas [Sutherland, 1999].

A caracterização do comportamento à fadiga de materiais exige que se imponha um carregamento cíclico à amostra, de modo a gerar tensões variáveis no tempo. No

carregamento cíclico sinusoidal típico (figura 2.6) pode-se identificar a tensão máxima (σ_{\max}), a tensão mínima (σ_{\min}), a tensão média (σ_m), a amplitude de tensão (σ_a), o intervalo de variação de tensão ($\Delta\sigma$) e o rácio de tensões $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$.

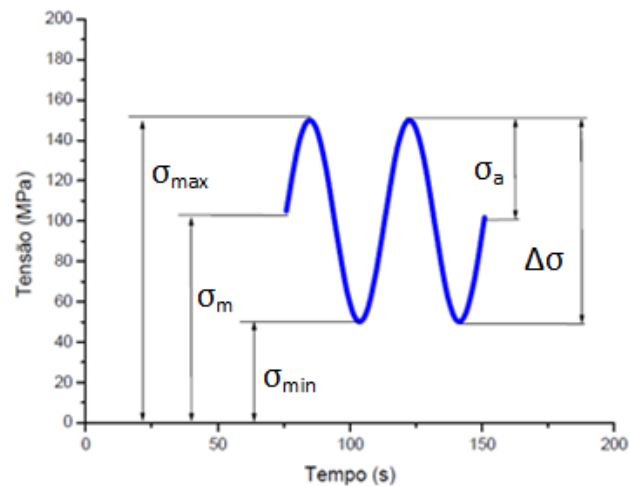


Figura 2.6 - Simbologia utilizada para definir os componentes de tensões cíclicas.

No estudo da propagação de fendas, as amostras são dotadas de uma fenda inicial cuja propagação se pretende caracterizar no âmbito da Mecânica da Fratura. Assim, a análise dos resultados baseia-se em K ou G em vez das tensões σ [Paris e outros, 1961; Paris e Erdogan, 1963; Pugno, 2006]. O comportamento típico dos materiais à fadiga pode ser dividido em três regimes de propagação de fenda distintos (figura 2.7) [Dowling, 2006]. No regime I, dito “sub-crítico”, a taxa de propagação da fenda depende fortemente do valor de ΔG_i , existindo um valor limite baixo do qual não se verifica propagação, ou esta é extremamente lenta (inferior a 10^{-7} mm/ciclo) [ASTM E1823-13, 2013].

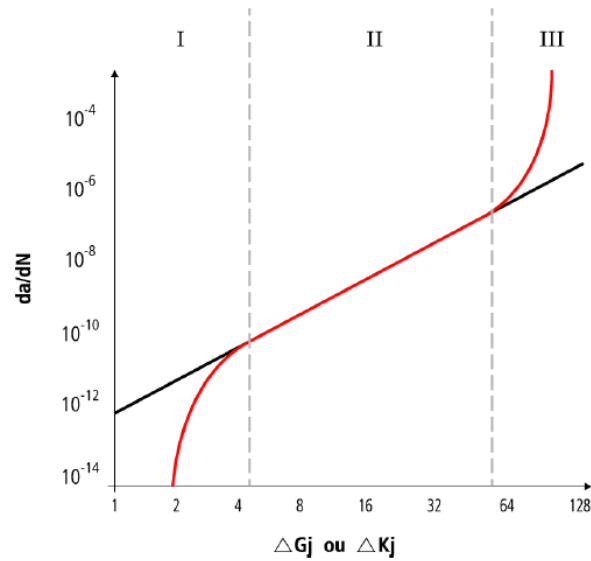


Figura 2.7 - Representação ilustrativa do comportamento típico dos materiais à fadiga [Sousa, 2013].

No regime II, dito “estável” existe uma relação aproximadamente log-linear entre da/dN e ΔG_j , descrita habitualmente pela chamada Lei de Paris

$$\frac{da}{dN} = D \Delta G_j^m \quad (3.2)$$

onde D e m são os parâmetros a determinar a partir do ajuste de resultados experimentais [Paris e Erdogan, 1963]. Por vezes, a lei de Paris é escrita em função de G_{\max} e não de ΔG [O’Brien e outros, 2010]

$$\frac{da}{dN} = D G_{\max}^m \quad (3.3)$$

Finalmente, o regime III surge quando a propagação da fenda e, consequentemente, a rotura, ocorrem de forma rápida e instável.

Nas últimas décadas tem sido realizado um extenso trabalho de desenvolvimento de modelos que descrevem o comportamento à fadiga, incluindo a delaminação em compósitos [Pascoe e outros, 2013]. Não é objetivo deste trabalho desenvolver e avaliar modelos, pelo que se tomará como referência a Lei de Paris.

CAPÍTULO 3

DELAMINAGEM À FADIGA EM MODO II

3.1. Introdução

Ao longo dos anos têm sido apresentados vários trabalhos acerca da delaminação sob fadiga em modo II. Os parágrafos seguintes fazem uma revisão de alguns trabalhos.

Matsubara e outros (2006) estudaram a fadiga em laminados de fibras de vidro usando ensaios ENF modificados de modo a permitir inversões de carga (figura 3.1), e assim valores negativos de R . Com base nos resultados experimentais obtidos (figura 3.2), Matsubara e outros (2006) concluíram que a taxa de propagação era controlada por ΔG_{II} para baixas taxas e por $G_{II\max}$ para altas taxas. Em ambos os casos, o expoente m da Lei de Paris aumentava com o valor de R .

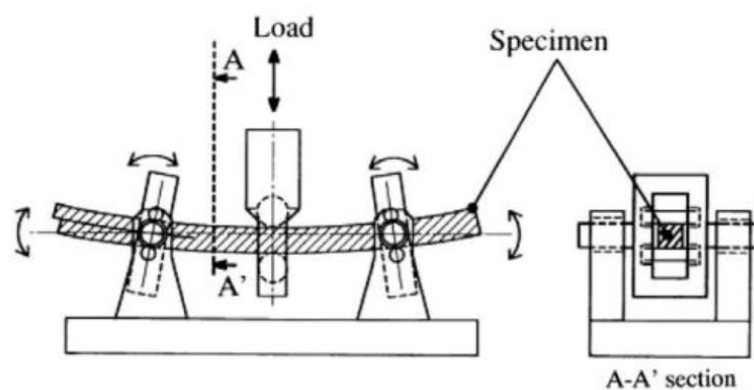


Figura 3.1 - Ensaio ENF modificado por Matsubara e outros (2006).

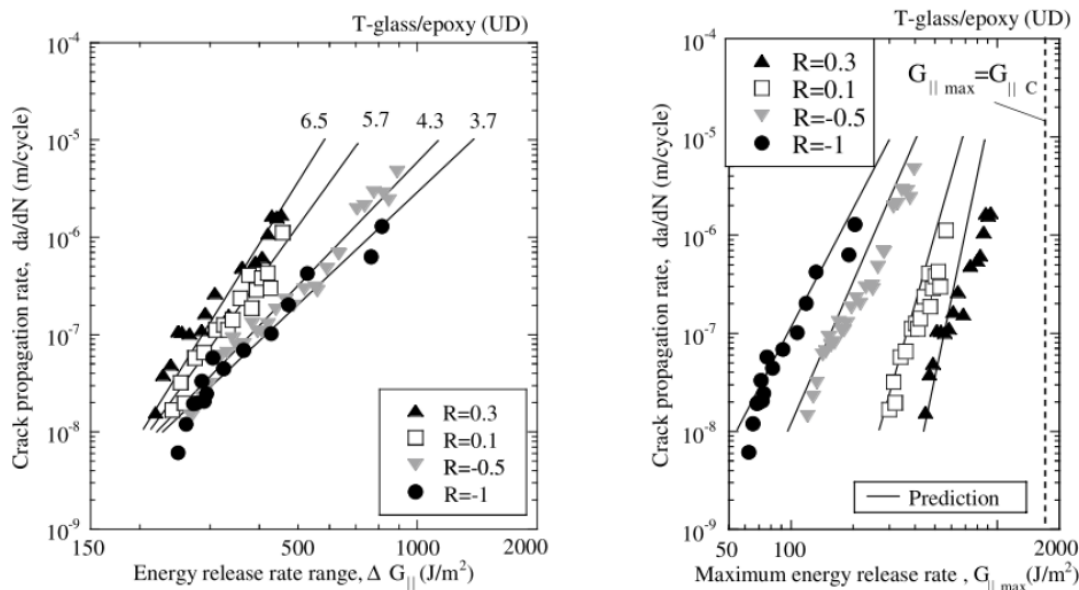


Figura 3.2 - Resultados obtidos por Matsubara e outros (2006).

Habitualmente os ensaios de fratura são realizados em laminados unidirecionais. Porém, são os laminados multidirecionais os mais usados em aplicações estruturais [Brunner e outros, 2008]. Beghini e outros (2006) realizaram estudos sobre a delaminação à fadiga em modo II de laminados de fibra de carbono unidirecionais e cruzados (*cross-ply*), sendo estes últimos com camadas a 0° e a 90° em relação à frente da fenda. Verificou-se que os dois tipos de laminados não apresentavam diferenças significativas nas taxas de propagação das fendas (figura 3.3) e que estas seguiam a Lei de Paris (Beghini e outros, 2006).

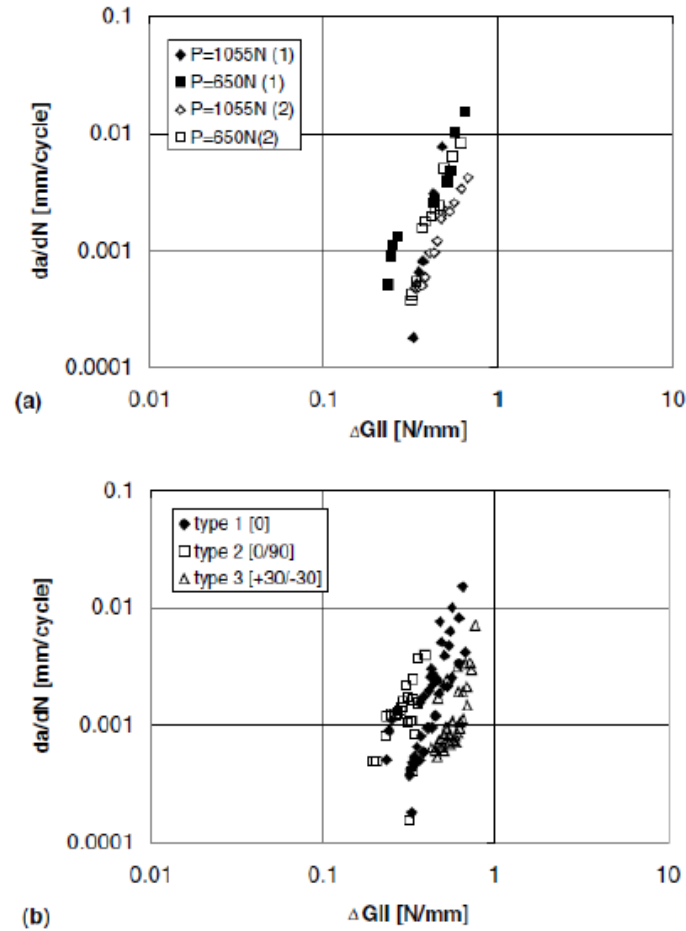


Figura 3.3 - Taxas de crescimento da fenda observadas em provetes unidirecionais (a) e multidirecionais (b) por Beghini e outros (2006).

Shindo e outros (2009) realizaram ensaios *4-Point End-Notched Flexure* (4ENF) (figura 3.4) para avaliar o efeito das condições de temperatura no comportamento à fadiga em laminados de fibra de vidro. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e sob condições criogénicas – temperatura do nitrogénio líquido ($-196^{\circ}\text{C}/77\text{K}$) e temperatura do hélio líquido ($-269^{\circ}\text{C}/4\text{K}$). Os resultados apresentaram um decréscimo da taxa de propagação da fenda com a diminuição da temperatura (figura 3.5). Em todos os casos, Shindo e outros (2009) obtiveram elevados valores do expoente da Lei de Paris, isto é, $m > 10$. Assim, uma pequena alteração na taxa de libertação de energia provoca uma alteração muito significativa na previsão da taxa de crescimento de delaminação, aspeto que os autores consideraram problemático.

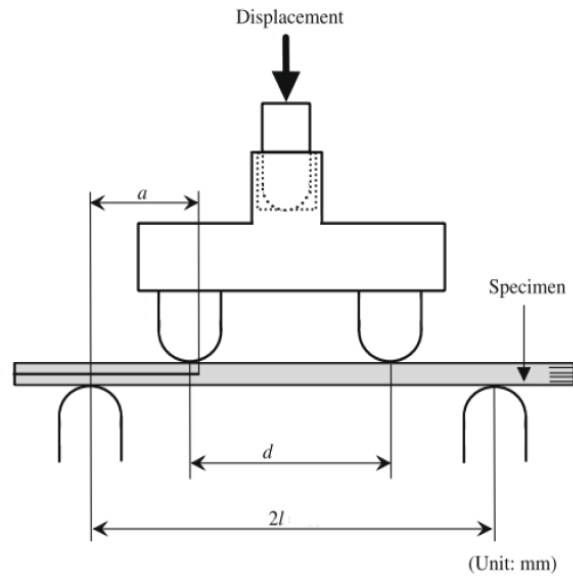


Figura 3.4 - Ensaio 4ENF utilizado por Shindo e outros (2009).

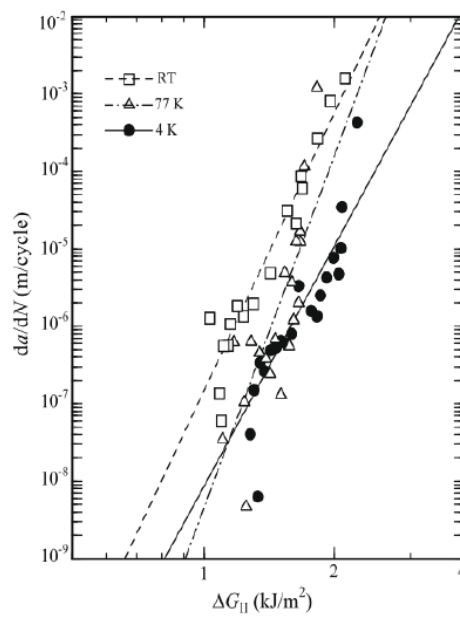


Figura 3.5 - Resultados obtidos por Shindo e outros (2009).

Como foi acima referido, os provetes usados nos ensaios possuem uma delaminação inicial criada por um filme desmoldante aquando do fabrico. No entanto, algumas normas [ASTM Committee D-30, 2010] preveem a realização de um ensaio prévio para gerar uma pré-fenda mais representativa. Após vários estudos, O'Brien e

outros (2010) chegaram à conclusão que o tipo de fenda inicial influenciava não só G_{IIc} , mas também o comportamento à fadiga nas fases iniciais dos ensaios. Não obstante, após um certo número de ciclos, as curvas da/dN em função de $G_{II\max}$ acabavam por convergir, como se pode verificar na figura 3.6.

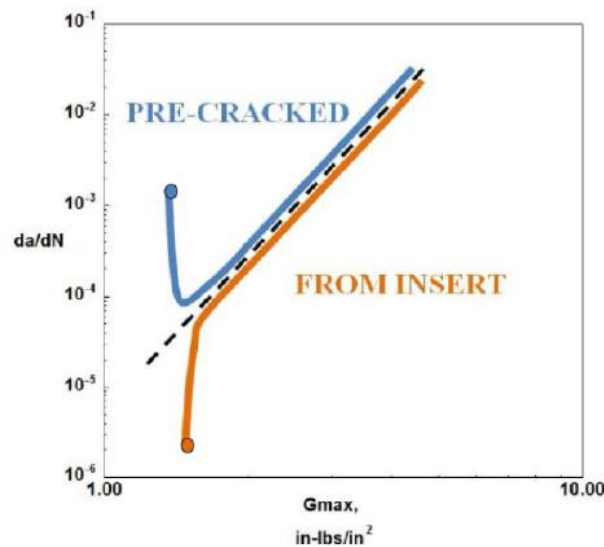


Figura 3.6 - Comportamento à fadiga de dois provetes ENF a partir de pré-fenda (azul) e do filme (laranja) [O'Brien e outros, 2010].

No caso dos provetes em que foi criada uma pré-fenda verificou-se um decréscimo acentuado inicial da taxa de propagação da fenda. Nos ensaios a partir da fenda gerada pelo filme desmoldante registou-se uma taxa inicial de propagação bastante reduzida. O'Brien e outros (2010) explicaram que este comportamento era devido à formação inicial de microfissuras desagregadas a partir do filme. Dado que a propagação da fenda corresponde à coalescência destas microfissuras, e como no caso dos ensaios a partir da pré-fenda as mesmas já estão formadas, a propagação é mais rápida. Concluíram deste modo que seria conveniente realizar ensaios a partir de pré-fendas por fornecerem propriedades mais conservadoras.

Não existe ainda um consenso internacional sobre qual é o melhor ensaio de modo II. O ensaio *End-Notched Flexure* (ENF), inicialmente desenvolvido para provetes de madeira [Barrett e Foshi, 1977], tem sido o mais utilizado para medir G_{IIc} devido à sua

simplicidade [Brunner e outros, 2008]. Na verdade, está em vias de normalização [ASTM Committee D-30, 2010], enquanto que o ensaio End-Loaded Split (ELS, figura 3.7) foi recentemente normalizado [ISO 15114, 2014]. Relativamente ao ENF, o ensaio ELS (figura 3.7) tem a vantagem de promover uma propagação estável da fenda quando $a/L > 0,55$. No entanto, requer um dispositivo mais complexo e o encastramento nunca é perfeito [Hashemi e outros, 1990].

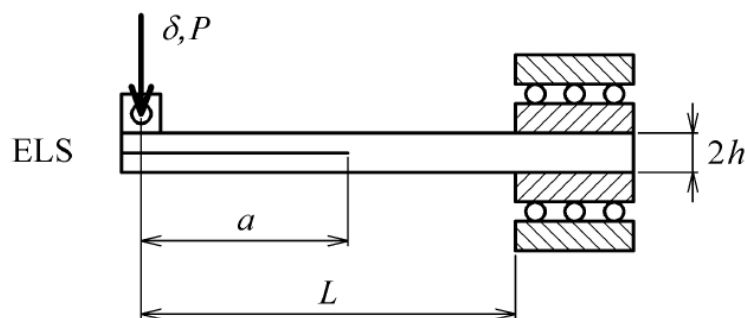


Figura 3.7 - Ensaio ELS

Estudos recentes realizados por Brunner e outros (2013) mostraram diferenças nos resultados de ensaios ENF e ELS em ensaios de fadiga de dois tipos de laminados de fibra de carbono. Brunner e outros (2013) constataram que os provetes se deslocavam no dispositivo durante o ensaio ENF, devendo esse deslocamento ser restringido. Ainda assim, Brunner e outros (2013) registaram diferenças nos parâmetros da Lei de Paris obtidos a partir dos dois tipos de ensaios (figura 3.8). As causas destas diferenças só poderão ser identificadas após mais investigação.

Portanto, esta breve revisão bibliográfica mostra que a delaminação à fadiga em modo II carece de muita investigação.

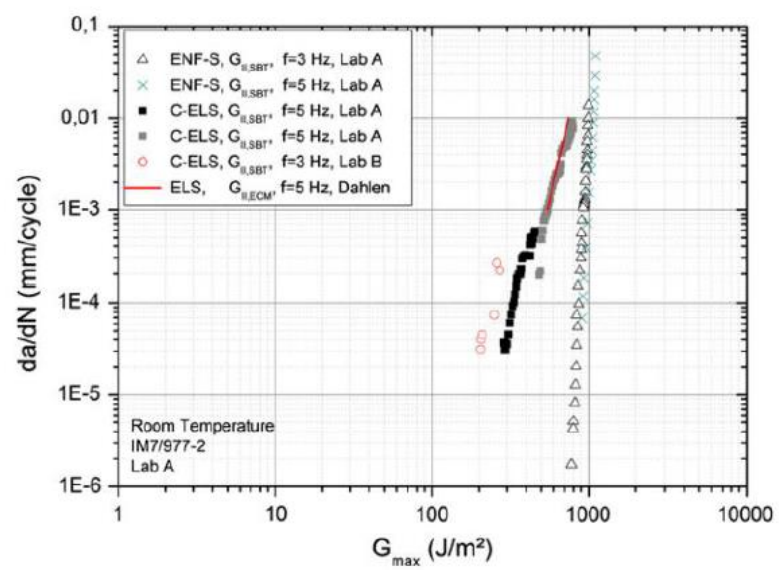


Figura 3.8 - Resultados obtidos por Brunner e outros (2013).

CAPÍTULO 4

EQUIPAMENTOS E AMOSTRAS

4.1. Máquina de Ensaio de Fadiga (MEF)

As máquinas para ensaios de fadiga baseiam-se habitualmente em sistemas servo-hidráulicos. Uma vez que a aquisição e manutenção deste tipo de máquinas têm custos elevados, foi construída por alunos do MIEM no DEM-UA uma máquina mais simples, aqui designada por MEF, com possibilidade de realizar ensaios de fadiga de materiais compósitos.

No ano de 2012, o antigo aluno de MIEM Pedro Carvalhoso finalizou uma primeira versão da MEF, tanto a nível da estrutura como de toda a parte eletrónica [Carvalhoso, 2012]. Apesar da MEF ter ficado funcional, após alguns ensaios detetaram-se problemas que foram objeto do trabalho de Dissertação realizado no ano seguinte (2013) pelo antigo aluno do MIEM José Sousa [Sousa, 2013]. Foram então efetuadas algumas intervenções e melhorias a nível mecânico e eletrónico que permitiram a obtenção de resultados rigorosos e reproduzíveis. A figura 4.1 mostra a estrutura atual da MEF. Seguidamente faz-se uma breve descrição dos seus componentes mecânicos e eletrónicos e do seu funcionamento.



Figura 4.1 - Estrutura da MEF

4.1.1. Funcionamento e componentes estruturais da MEF

A MEF é constituída por duas mesas, uma inferior e outra superior, que estão ligadas entre si por quatro varões. Estes servem também de guiamento da plataforma móvel. Para garantir um correto guiamento e um nível muito reduzido de atrito, cada varão tem acoplado um casquilho deslizante, que, por sua vez, é alojado num casquilho adaptador (figura 4.2). Os casquilhos adaptadores possuem uma flange externa para permitir o travamento dos mesmos durante os movimentos de ascensão da plataforma.

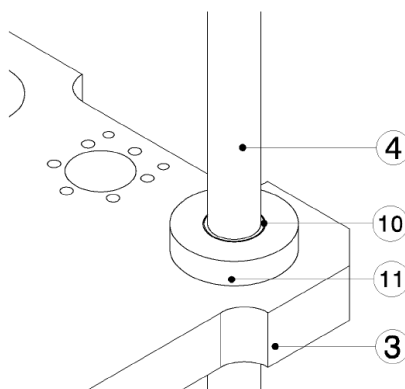


Figura 4.2 - Vista isométrica superior da plataforma e outros componentes; 3- plataforma; 11- casquilho adaptador; 10- casquilho deslizante; 4- varão.

A imobilização dos casquilhos no sentido descendente é feita a partir de uma tampa aparafusada na extremidade inferior dos casquilhos adaptadores (figura 4.3).

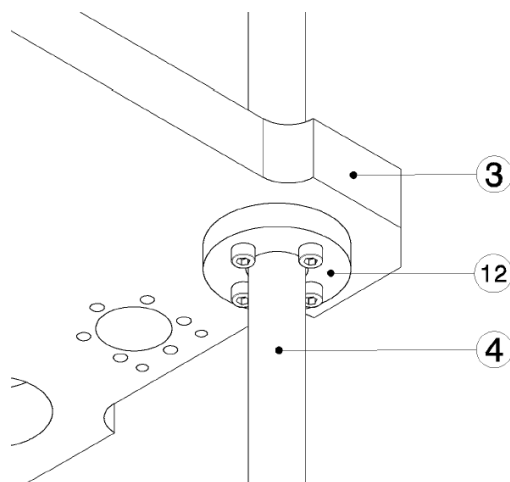


Figura 4.3 - Vista isométrica inferior da plataforma e outros componentes; 4- varão; 12- tampa do casquilho adaptador; 3- plataforma.

A plataforma efetua movimentos ascendentes e descendentes num curso de 600mm, sendo movimentada por um par de conjuntos porca/fuso (TR24x5) apoiados nas duas mesas através de rolamentos. A rotação dos fusos tem origem num motor elétrico passo-a-passo que se encontra fixado na mesa superior e acoplado a um dos fusos. O movimento coordenado entre os dois fusos é garantido por uma correia dentada que os interliga, permitindo deste modo obter um movimento de rotação sincronizado nos dois sentidos, horário e anti-horário.

A célula de carga do tipo “disco”, com 500N de capacidade, está instalada na parte inferior da plataforma através de ligações aparafusadas. À célula de carga está acoplado um adaptador onde se aloja um pino cilíndrico de modo a transmitir o carregamento ao provete durante os ensaios (figura 4.4).

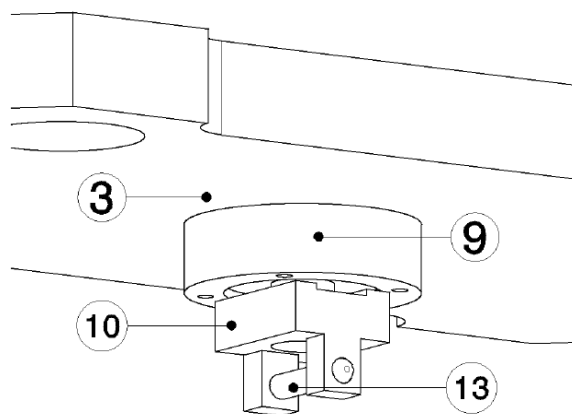


Figura 4.4 - Componentes para transmissão de força; 13- pino de carregamento; 10- adaptador para o pino de carregamento; 9- célula de carga; 3- plataforma.

É na mesa inferior onde se encontra o conjunto de componentes para apoio do provete (figura 4.5). Para além dos suportes do ensaio ENF, há seis pinos, dois em cada lado do comprimento do provete e um em cada extremidade, cujo objetivo é evitar o deslocamento do provete no dispositivo durante o ensaio, problema já referido no capítulo 3. Esses pinos são posicionados de modo a não provocar atrito com o provete, o que poderia afetar os resultados obtidos.

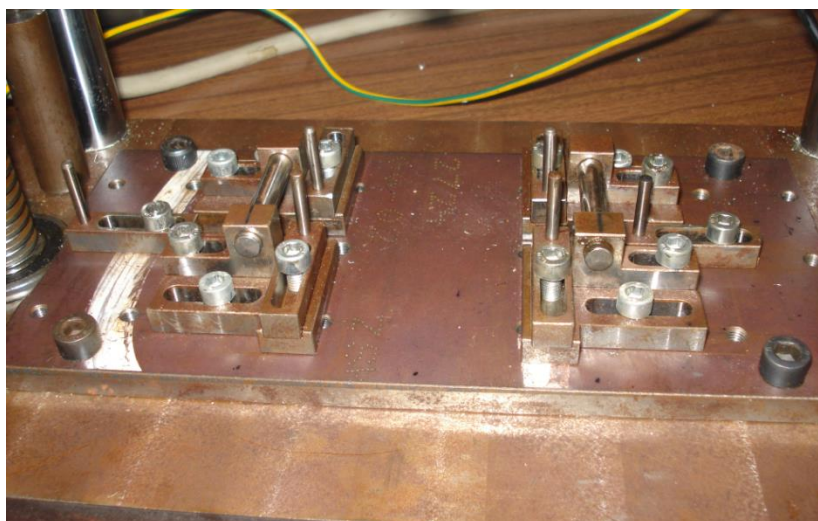


Figura 4.5 - Dispositivo para a fixação do provete.

A MEF é ainda constituída por um sistema ótico responsável pela monitorização da posição da plataforma durante os ensaios. Numa extremidade da plataforma encontra-se um sensor ótico fixado com ligações aparafusadas (figura 4.6 a). Num perfil de alumínio, unido às mesas superior e inferior está fixado o pino de fim de curso, ligado por parafusos. Isto permite fazer ajustamentos no seu posicionamento em função dos deslocamentos a impor nos ensaios (figura 4.6 b). Este sistema permite determinar a posição da plataforma através da interrupção cíclica do feixe de luz do sensor ótico provocada pela passagem do pino. Evitam-se assim alterações dos deslocamentos impostos durante os ensaios por perda de passos do motor.



Figura 4.6 - a) Sistema ótico; sensor ótico (esquerda); b) apoio e pino fim de curso (direita).

Antes de cada ensaio em que se usem novos valores de deslocamentos máximo e mínimo a impor, há que fazer um ajuste do pino de fim de curso. A partir do gráfico com os dados recebidos do sensor pode-se verificar se o pino está corretamente posicionado. A figura 4.7 apresenta um exemplo de um gráfico onde se verifica quando existe ou não interrupção do feixe de luz, correspondente aos valores máximos e mínimos do gráfico no programa *Processing*.

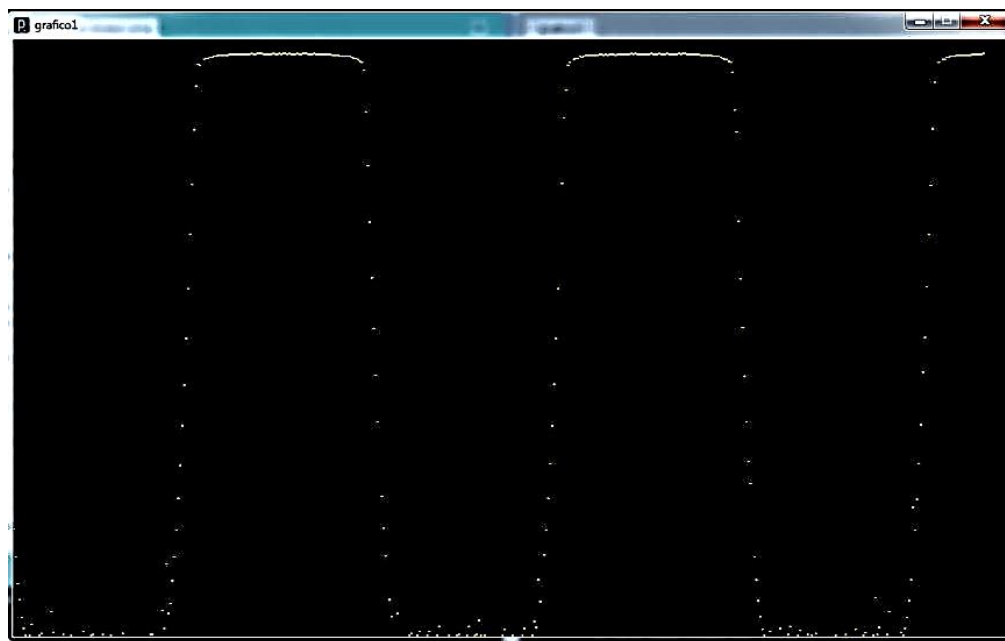


Figura 4.7 - Exemplo de visualização de dados recebidos do sensor ótico com o programa *Processing* [Carvalho, 2012].

4.1.2. Funcionamento e componentes eletrónicos da MEF

A comunicação e controlo da MEF são feitos a partir de vários componentes e respetivas ligações elétricas (figura 4.8).

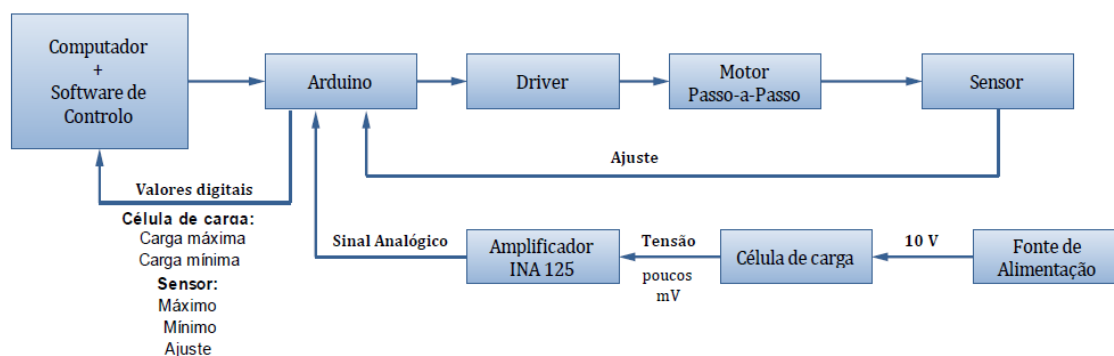


Figura 4.8 - Componentes principais da MEF e respetivas ligações.

A partir do computador que contém o programa de controlo da MEF são enviadas através da porta USB ordens de comando para o Arduino [Carvalho, 2012], que é uma conhecida plataforma de computação *open-source* com entradas e saídas analógicas e

digitais. O Arduino processa as informações recebidas e transmite-as ao *driver*, componente este que vai fornecer a sequência de funcionamento do motor passo-a-passo. O sensor envia informações ao Arduino que incluem os valores máximos e mínimos (figura 4.7), permitindo detetar e corrigir possíveis perdas de passos do motor, que podem ter origem numa pequena falha elétrica ou numa inversão de sentido demasiado rápida.

A célula de carga ruijia modelo 6610, com sensibilidade de 2mV/V, é alimentada por uma fonte com 10V. Desta forma o sinal analógico proveniente da célula de carga solicitada à sua capacidade máxima é de 20mV. A partir de uma resistência variável até 1KOhm definiu-se um ganho de 250 vezes no INA 125, que permitiu amplificar os 20mV em 5V. Esta amplificação de tensão foi necessária uma vez que a gama de valores utilizados pelo Arduino é de 0 a 5V. Deste modo foi possível utilizar toda a capacidade da célula de carga e obter uma resolução de 0,488N/valor, o que possibilitou medir variações mínimas de força de aproximadamente 0,5N durante um ensaio [Sousa, 2013].

Na parte superior da caixa de suporte dos componentes eletrónicos encontra-se o painel de controlo (figura 4.9). Este contém um interruptor para seleccionar o modo de controlo da máquina manual/automático. O modo automático é seleccionado quando se pretende executar o ensaio de fadiga de acordo com os parâmetros inseridos. O modo manual tem a funcionalidade de movimentar a plataforma para o posicionamento zero do pino de carregamento, ou seja, junto do provete. Para isso existem dois botões, um para subir e outro para descer a plataforma. O painel de controlo contém ainda um potenciómetro para o controlo da velocidade de rotação do motor para o modo manual. Caso se pretenda interromper de uma forma rápida o ensaio, por algum motivo, existe um botão de emergência.

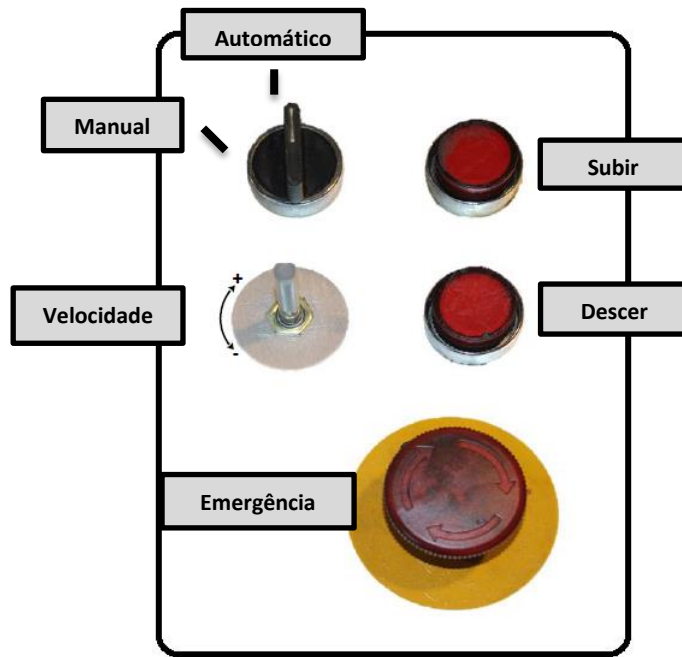


Figura 4.9 - Painel de controlo inserido na parte superior da caixa de suporte do quadro elétrico.

4.2. Características dos provetes

Os provetes utilizados durante os ensaios foram obtidos a partir de placas laminadas unidireccionais com o empilhamento $[0^\circ]_{20}$. As camadas foram cortadas do pré-impregnado de fibra de carbono e resina epóxida com a referência comercial SEAL HS 160 REM. As placas foram fabricadas no Instituto de Engenharia e Gestão Industrial (INEGI) por prensagem a quente. No fabrico das placas inseriu-se a meia-espessura um filme desmoldante de PTFE com 0,015mm para gerar a delaminação inicial. O corte dos provetes foi efetuado no INEGI por disco de corte diamantado. Os provetes ficaram com as seguintes dimensões nominais (figura 4.10): Comprimento total 200mm, largura $b = 20\text{mm}$ e espessura $2h = 3\text{mm}$. Nos ensaios ENF adotou-se distância entre apoios $2L = 100\text{mm}$ e comprimento de fenda inicial $a = 32\text{mm}$.

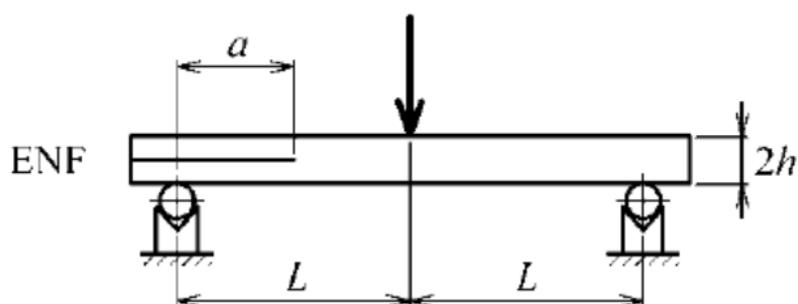


Figura 4.10 - Geometria do provete ENF.

4.3. Medição da flexibilidade das células de carga

Um aspeto que não foi considerado em trabalhos anteriores [Carvalhoso, 2012; Sousa, 2013] é o efeito da flexibilidade das células de carga nas medições da MEF. A necessidade de ter em conta esse efeito tornou-se clara no procedimento de verificação dos resultados da MEF, mediante ensaios quase-estáticos realizados na máquina Universal de ensaios ShimadzuTM AG 50KN-G (figura 4.11) antes e depois de cada ensaio de fadiga.

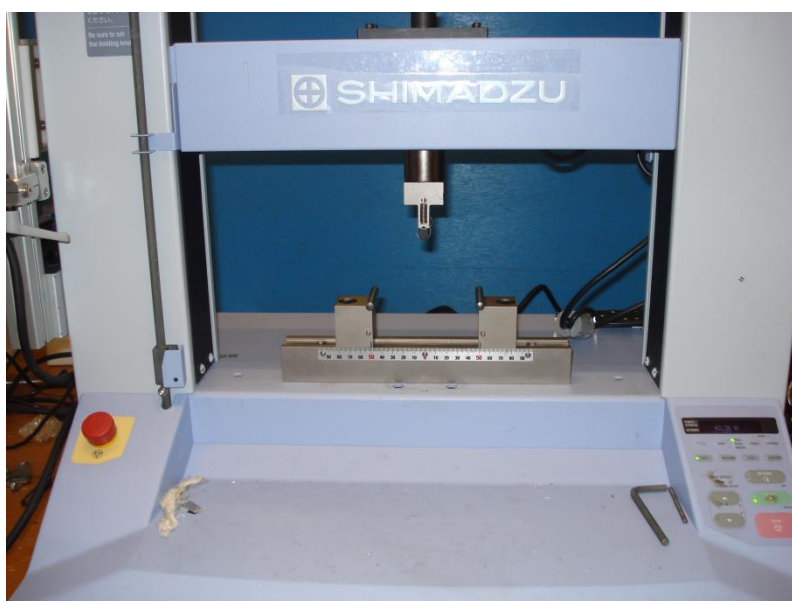


Figura 4.11 - Máquina ShimadzuTM AG 50KN-G.

Mais adiante descreve-se a forma de descontar o efeito da flexibilidade das células de carga nos resultados dos ensaios de fadiga. A figura 4.12 mostra a montagem usada para medir a flexibilidade conjunta das células de carga de ambas as máquinas.



Figura 4.12 - Montagem para medição da flexibilidade das células de carga da MEF e ShimadzuTM.

Para verificar a repetibilidade dos valores, realizaram-se três ensaios de compressão das células a uma velocidade constante de 1mm/min. Dado que a capacidade máxima da célula de carga da MEF é de 500N, foi imposta uma carga até 450N. A partir dos dados fornecidos pela ShimadzuTM criou-se o gráfico da figura 4.13. É de salientar que se consideraram os valores a partir dos quais se verificava linearidade, rejeitando deste modo alguns valores iniciais por corresponderem a efeitos de adaptação do pino de carregamento às superfícies. Uma vez que nos ensaios 2 e 3 os resultados foram praticamente os mesmos, a linha a vermelho, correspondente ao ensaio 2, ficou sobreposta à linha verde. A tabela 4.1 resume os resultados obtidos para a flexibilidade do conjunto da célula da MEF com a da célula da ShimadzuTM.

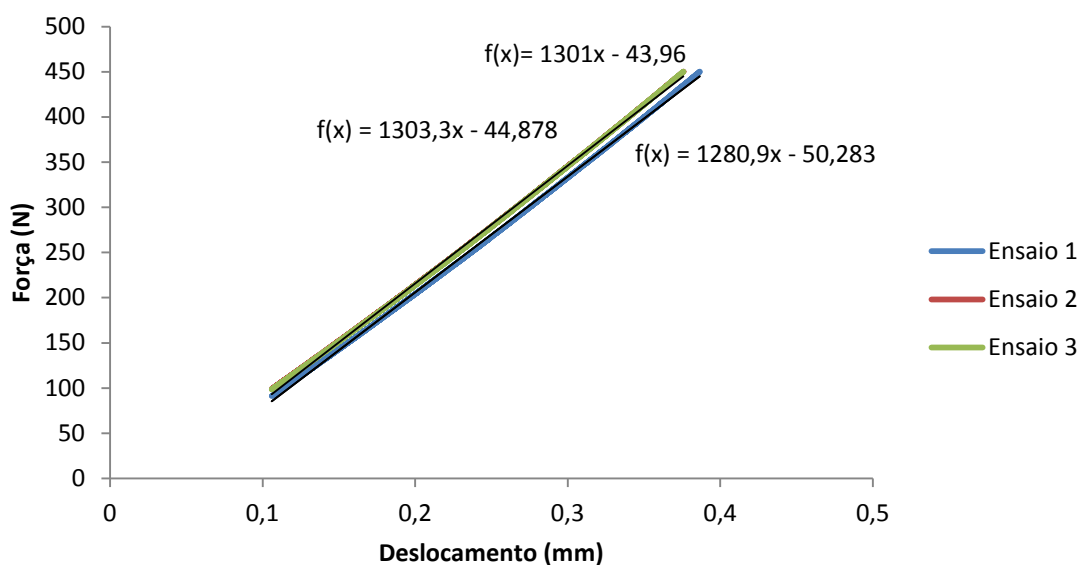


Figura 4.13 - Gráfico ilustrativo força-deslocamento para o cálculo da flexibilidade das células de carga da MEF e ShimadzuTM.

Tabela 4.1 - Resultados dos três ensaios à compressão para o cálculo da flexibilidade das duas células de carga.

Ensaio	Rigidez (K) [N/mm]	Média K [N/mm]	Flexibilidade [mm/N]
1	1280,9	1295,1	0,00077
2	1303,3		
3	1301		

A flexibilidade individual da célula da máquina ShimadzuTM foi medida através de um procedimento análogo recorrendo à montagem da figura 4.14. Os resultados são resumidos na figura 4.15 e na tabela 4.2, permitindo depois determinar a flexibilidade da célula de carga da MEF $C_{LC} = 0,00077 - 0,00011 = 0,00066 \text{ mm/N}$.

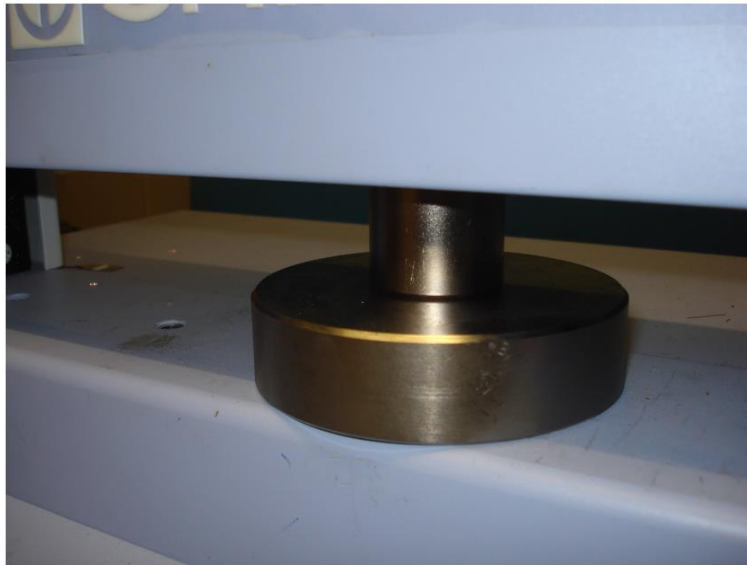


Figura 4.14 - Montagem para medição da flexibilidade da célula de carga da ShimadzuTM.

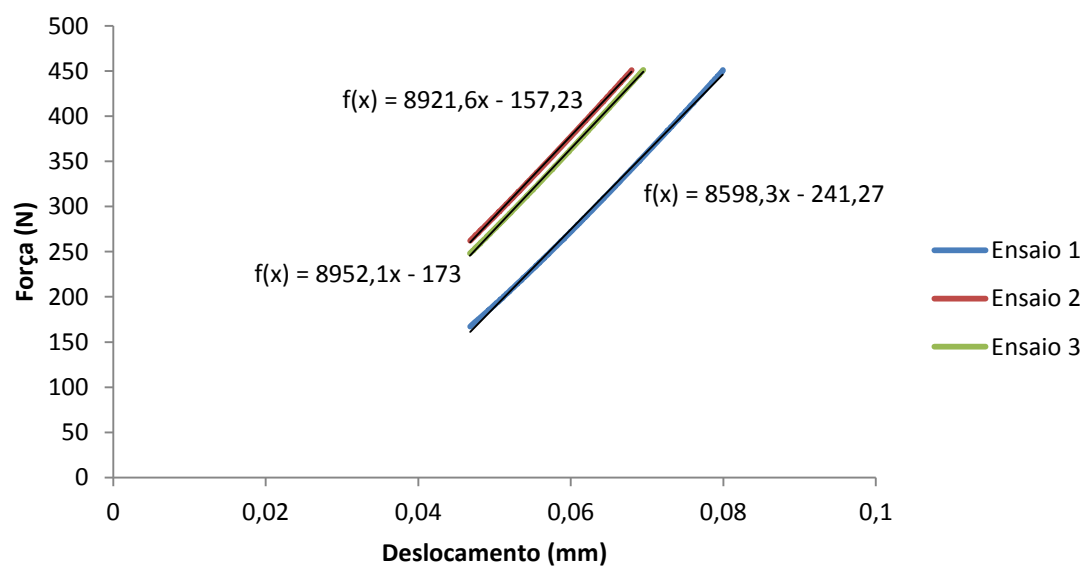


Figura 4.15 - Gráfico ilustrativo força-deslocamento para o cálculo da flexibilidade da célula de carga da ShimadzuTM.

Tabela 4.2 - Resultados dos três ensaios à compressão para o cálculo da flexibilidade da célula de carga da ShimadzuTM.

Ensaio	Rigidez (K) [N/mm]	Média K [N/mm]	Flexibilidade [mm/N]
1	8598,3	8824	0,00011
2	8921,6		
3	8952,1		

Conclui-se portanto que a flexibilidade da célula de carga da MEF é bastante superior à da ShimadzuTM, devendo ser considerada no cálculo dos deslocamentos impostos nos ensaios de fadiga. Na realidade, quer para os ensaios de fadiga, quer para os ensaios quase-estáticos, calculou-se sempre os deslocamentos reais

$$\delta_r = \delta_i - C_{LC} \cdot P \quad (4.1)$$

em que δ_i designa o deslocamento aparentemente imposto e P o valor de carga correspondente. Verificou-se que as correções aos deslocamentos assim efetuadas podiam aproximar-se dos 10% no caso da MEF (Cf. Anexo A).

4.4. Calibração da célula de carga da MEF

Nesta fase do trabalho procedeu-se à calibração da célula de carga da MEF. A partir dos valores digitais obtidos (0-1023) fornecidos pelo Arduino foi necessário estabelecer uma correspondência direta entre estes e os valores de carga (N). O esquema de montagem adotado foi o mesmo do utilizado para a medição da flexibilidade das células de carga (figura 4.12).

Realizou-se a calibração da célula de carga para dois valores de *offset* distintos, 1000 e 500, de modo a verificar o comportamento linear nos dois casos. Em cada 9 medições efetuadas, e para diferentes valores de tensão aplicados à célula de carga da MEF, foram recolhidos 50 valores pelo Arduino para verificar a repetibilidade dos valores.

Nesse conjunto de valores foram eliminados os *outliers*, ou seja, aqueles que estavam mais afastados dos restantes. Este procedimento foi repetido para as todas as medições efetuadas. A figura 4.16 representa graficamente os resultados das 9 medições para os valores digitais 1000 e 500, respetivamente. Observa-se o comportamento linear esperado com declive das retas praticamente igual (diferença de 1%) para os diferentes valores de *offset*. Estabeleceram-se deste modo retas de calibração que permitiram obter as cargas a partir dos valores digitais lidos pelo Arduino.

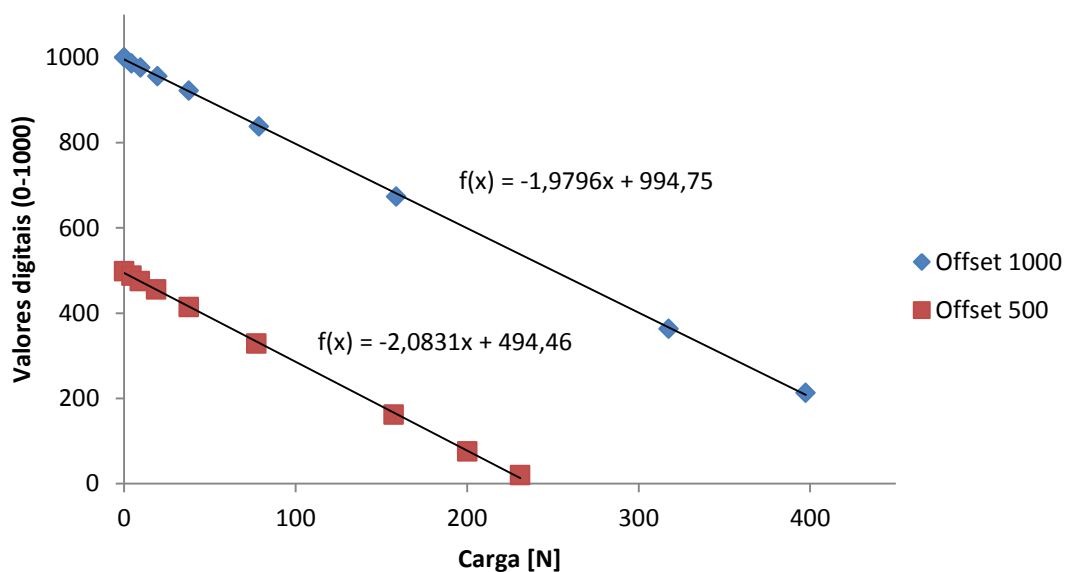


Figura 4.16 - Gráfico referente à calibração da célula de carga para valores de *offset* de 1000 e 500.

É importante referir que o *offset* permite reduzir ou aumentar a janela de visualização do gráfico, conforme a carga máxima imposta. Logo, uma alteração no *offset* não implica uma nova calibração da célula de carga. Realizados estes procedimentos estava-se em condições de efetuar os ensaios de fadiga.

4.5. Filtragens no tratamento dos resultados

Os ficheiros de resultados obtidos dos ensaios de fadiga foram sujeitos a duas filtragens, conforme os métodos adotados no trabalho anterior [Sousa, 2013]. A primeira filtragem foi realizada através da distância entre pontos vizinhos, que se designou por Média Deslizante, e que permite a identificação e eliminação de possíveis *outliers*. Este método consiste em percorrer todos os pontos da amostra e comparar, individualmente, o valor de cada ponto com a média de um conjunto de pontos adjacentes. Para o cálculo da média são utilizados o mesmo número de pontos anteriores e posteriores a esse ponto em estudo. A condição de exclusão ou permanência desse ponto é matematicamente descrita pela condição

$$\left| \frac{\sum_{i-t}^{i-t} y_i + \sum_{i+t}^{i+t} y_i}{2t} - y_i \right| < r \quad (4.2)$$

em que t corresponde ao tamanho do intervalo para o cálculo da média dos valores adjacentes e r ao intervalo no qual os valores são excluídos ou mantidos na amostra. No tratamento dos resultados foram considerados os valores de $t=5$ e $r=5$. Desta forma, este método permitiu eliminar os possíveis *outliers* de uma forma simples e eficaz, conduzindo a uma amostra consistente e contínua.

Face ao elevado número de valores dos resultados que se obtinham dos ensaios, originando tempos excessivos de processamento no tratamento dos dados, tornou-se necessário realizar uma segunda filtragem para redução do tamanho das amostras. Este método consistiu na divisão do conjunto de valores resultantes da primeira filtragem em subconjuntos de 50 pontos. Em cada subconjunto era realizada uma regressão linear, substituindo esse conjunto de pontos pelo valor médio. Estes dois procedimentos de filtragem foram implementados no Microsoft Office Excel através de uma Macro (Cf. Anexo E).

4.6. Utilização do *software* LabVIEW

Os algoritmos de filtragem de dados implementados permitiram reduzir substancialmente o ruído eletrónico. Todavia, numa fase posterior do trabalho, recorreu-se ao *LabVIEW*, o *software* base da plataforma de projeto da *National Instruments*TM (NI). Este *software* pode ser integrado com o hardware de aquisição de dados da NI e de outros fornecedores, desde dispositivos simples de um canal a dispositivos multicanais de alto desempenho, como o sistema NI CompactDAQ-9178 (figura 4.17).



Figura 4.17 - Chassi NI cDAQ-9178 USB de 8 slots.

Este chassi é projetado para sistemas de teste portáteis de pequeno porte que fazem medições de sinais físicos e elétricos. Pode ser ligado a um número máximo de 8 módulos de E/S da NI para ter sistemas de medição customizados com entradas analógicas, saídas analógicas, E/S digitais e contador/temporizador. O módulo de ponte NI 9237 foi o utilizado para este estudo para a alimentação e tratamento do sinal da célula de carga (figura 4.18). A aquisição de medições é efetuada a partir de conetores RJ50, permitindo a conexão até quatro células de carga através de adaptadores (Figura 4.19). Este módulo possui alta taxa de amostragem e proporciona um sistema de medição de carga ou deformação de elevada velocidade e qualidade. No caso presente, revelou-se mais eficaz na filtragem inicial do ruído do que o método acima descrito.

parâmetros para a aquisição de dados, como é o caso da frequência de aquisição e frequência de gravação dos dados. Permite ainda definir os parâmetros da célula de carga, como o tipo de ponte *Wheatstone* (ponte completa), tensão de excitação (10V) e a resistência interna da célula (700Ω). Face a este novo sistema de aquisição de dados, foi necessário realizar uma nova calibração da célula de carga em moldes semelhantes aos anteriormente descritos. Numa tabela são colocados os dados da calibração da célula para a correspondência dos valores de carga.

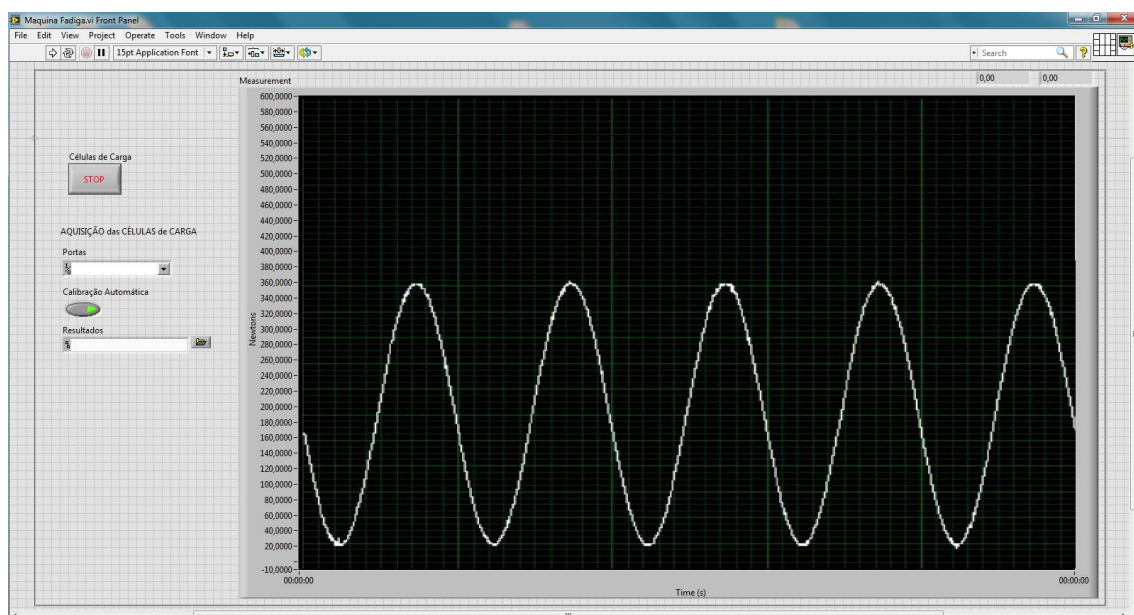


Figura 4.20 - Paine de visualização dos resultados.

4.6.1 Calibração da célula de carga

A tabela de calibração da célula de carga contém um campo onde são inseridos valores iguais ou superiores à sensibilidade da célula. Neste caso, como a sensibilidade da célula de carga é de 2mV/V foi assumido um valor de 2,5mV/V. De salientar que estes podem ser positivos ou negativos mediante o tipo de ensaio a realizar (tração ou compressão). Desta forma obtém-se um intervalo de entradas analógicas de -2,5 a 2,5 (Figura 4.21). Foi assumida uma relação de 1:1000 para a correspondência dos valores de saída, obtendo-se uma gama de valores de -2500mV/V a 2500mV/V, que após a

calibração da célula irá corresponder às unidades de carga (N). Quanto maior esta relação maior é a precisão dos dados de saída, uma vez que o intervalo será maior.

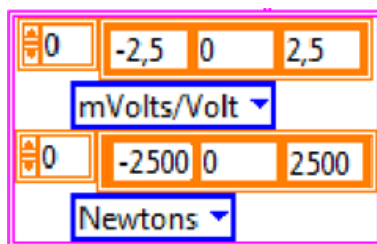


Figura 4.21 - Tabela do diagrama de blocos que ilustra a relação dos valores de entrada com os de saída.

Procedeu-se à nova calibração da célula de carga da MEF de modo a estabelecer uma correspondência direta entre os valores analógicos dados pelo sistema e os valores de carga (N). O procedimento foi o mesmo adotado no sistema anterior. A figura 4.22 mostra graficamente os resultados das 9 medições efetuadas e a equação de correspondência dos respetivos valores. Obteve-se um coeficiente de correlação muito próximo de 1, valor esperado porque a célula deve ter um sinal de saída linearmente proporcional à carga a que está sujeita. Desta forma o intervalo [-558 – 558] corresponde aos valores extremos de carga (figura 4.23).

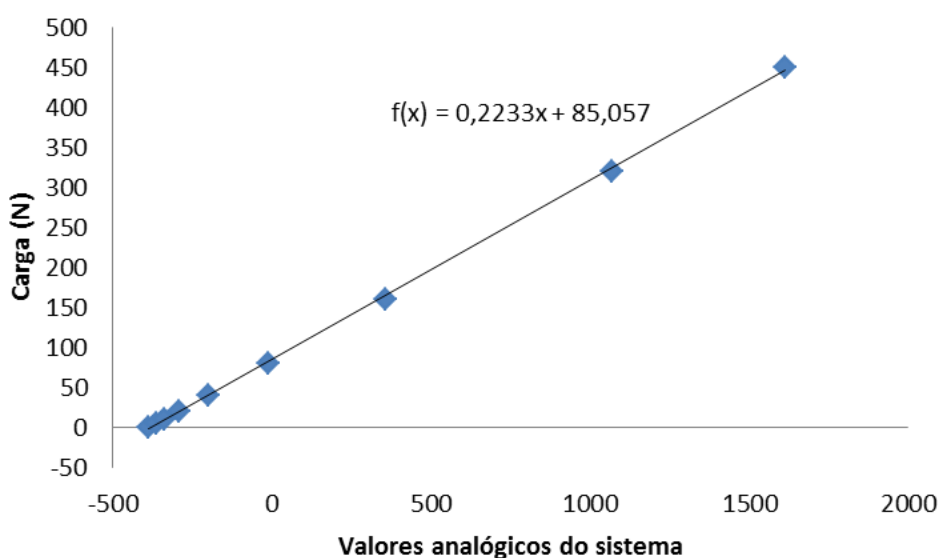


Figura 4.22 - Gráfico referente à calibração da célula de carga

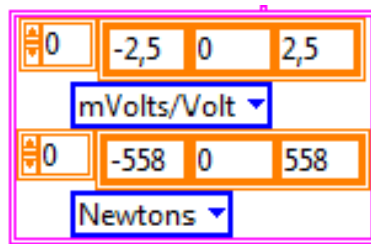


Figura 4.23 - Dados obtidos para a correspondência dos valores de carga.

Ao clicar no botão “calibração automática” no painel de visualização dos resultados podia-se verificar o ajuste do gráfico antes da aplicação de carga (figura 4.24). Esta opção permite colocar a carga a 0N antes de realizar os ensaios, anulando o peso do suporte e pino de carregamento. Deste modo, considera que o sinal recebido da célula de carga no início do ensaio seja 0mV/V. Este método era uma mais-valia, uma vez que possibilitava o melhor ajuste do pino de carregamento com o provete a partir da visualização em tempo real do gráfico carga/tempo.

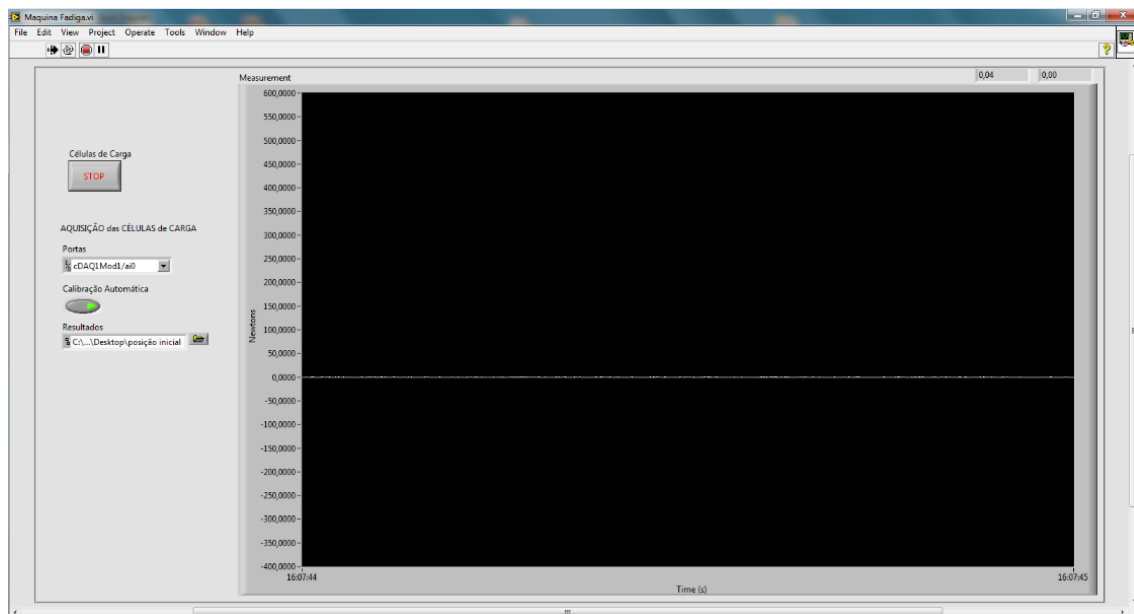


Figura 4.24 - Visualização do gráfico inicial antes da realização dos ensaios de fadiga.

4.6.2 Modo de aquisição de dados

Refira-se que uma das principais diferenças na utilização deste sistema corresponde ao modo de aquisição de dados. Enquanto o sistema anterior estava preparado para recolher apenas os valores de carga P nas posições extremas de cada ciclo ao longo do ensaio, nesta nova plataforma os dados são distribuídos ao longo da curva carga-tempo. Isto exigiu que adotasse uma frequência relativamente elevada de aquisição de dados (figuras 4.25 e 4.26) de modo a garantir que os pontos de carga mínima e máxima fossem efetivamente gravados. Posteriormente, como interessavam apenas os valores mínimo e máximo e para reduzir o volume de dados, implementou-se a filtragem anterior, consistindo na redução do tamanho das amostras em subconjuntos de 50 pontos, substituindo esse subconjunto pelo valor médio (Cf. Anexo E).

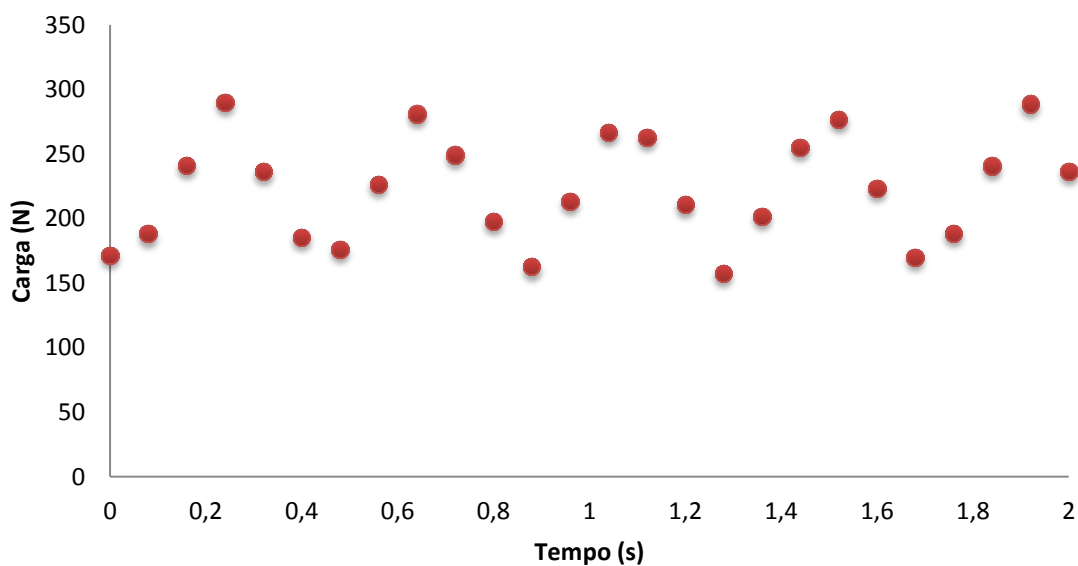


Figura 4.25 - Aquisição de dados com frequência de 25 Hz, que se revelou insuficiente.

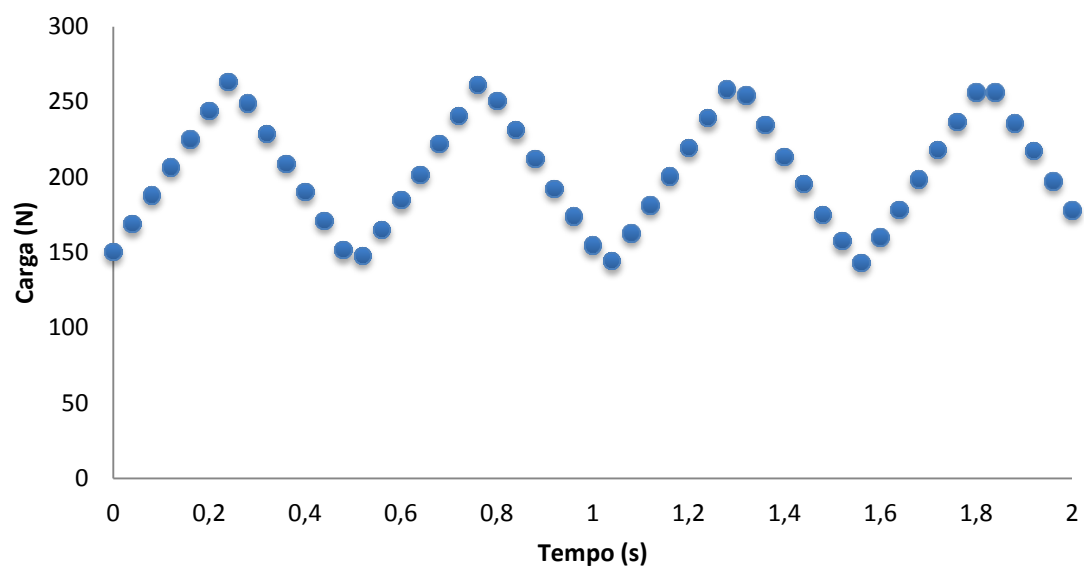


Figura 4.26 - Aquisição de dados com frequência de 50 Hz, que acabou por se revelar satisfatória.

CAPÍTULO 5

PROCEDIMENTOS NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Mediu-se inicialmente a largura e a espessura dos provetes usando um paquímetro digital com resolução de 0,01mm. As primeiras marcações para os ensaios foram feitas a partir da posição do filme (figura 5.1), localizado usando o microscópio Mitutoyo TM com resolução de 0,001mm.



Figura 5.1 - Marcações num dos provetes das medidas para os ensaios quase-estáticos e de fadiga.

A fase seguinte consistiu na realização de ensaios quase-estáticos na máquina Universal ShimadzuTM 50KN-AG a uma velocidade constante de 2mm/min (figura 5.2) para se obter o módulo E_1 de flexão dos provetes e a taxa crítica de libertação de energia G_{IIC} . Adotou-se a mesma geometria que iria ser usada posteriormente para os ensaios de fadiga (figura 4.10), ou seja, comprimento de fenda inicial $a = 32\text{mm}$ e distância entre apoios $2L = 100\text{mm}$.

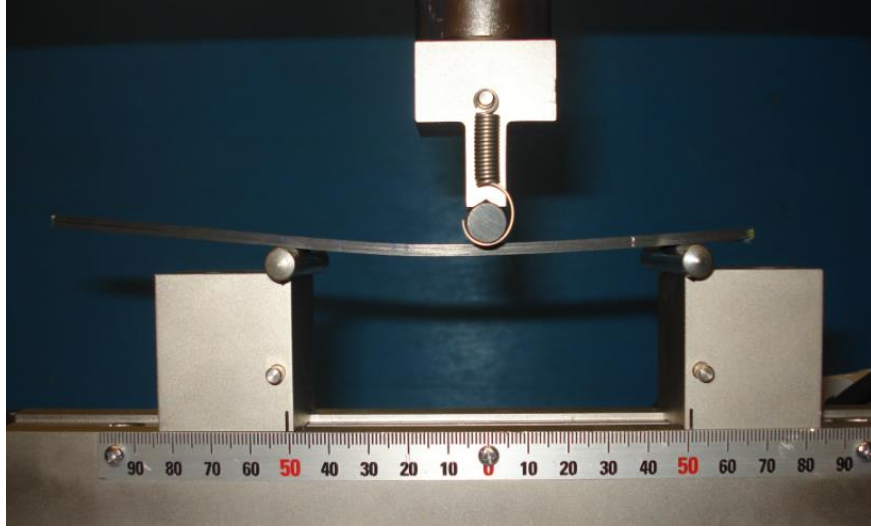


Figura 5.2 - Fotografia de ensaio quase-estático ENF efetuado na máquina Shimadzu™.

Para obter o módulo de flexão, definiu-se nas curvas carga-deslocamento a zona linear inicial para calcular a flexibilidade $C = \delta/P$, sendo δ o deslocamento e P a carga. A partir da teoria das vigas corrigidas adotada por Morais e Pereira (2007), a flexibilidade do provete ENF é dada por

$$C = \frac{2L^3 + 3(a + \Delta_{II})^3}{8E_1bh^3} + \frac{3L}{10G_{13}bh} \quad (5.1)$$

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

$$\Delta_{II} = h \sqrt{\frac{E_1}{78G_{13}}} \quad (5.2)$$

e com o módulo de corte $G_{13} = 4.1 \text{ GPa}$ [Morais e Pereira, 2007]. A flexibilidade de flexão pode obter-se de

$$C_f = C - \frac{3L}{10G_{13}bh} \quad (5.3)$$

descontando o efeito de corte transversal. O módulo de flexão pode ser estimado a partir dos valores experimentais de C resolvendo a equação

$$E_1 = \frac{2L^3 + 3(a + \Delta_{II})^3}{8C_f b h^3} \quad (5.4)$$

usando o método iterativo da secante, implementado numa folha de cálculo do Excel.

Na prática é algo difícil acompanhar a propagação de uma fenda em modo II, devido ao contato entre as duas faces do provete e à longa zona de processo [Morais e Pereira, 2007]. Para contornar estas dificuldades adotou-se o método da fenda efetiva [Morais e Pereira, 2007], que permite obter o comprimento de fenda efetivo a partir da flexibilidade medida

$$a_c = \sqrt[3]{\frac{8E_1 b h^3 C_f - 2L^3}{3}} \quad (5.5)$$

o que conduz a

$$G_{II} = \frac{9P^2 a_c^2}{16b^2 E_1 h^3} \quad (5.6)$$

Das curvas carga-deslocamento depreendeu-se que a propagação da fenda se iniciou para um deslocamento aproximado de 3,5mm, correspondente a uma carga máxima de 550N. Isto serviu de base para escolher os deslocamentos máximos a usar nos ensaios de fadiga.

A posição aproximada da frente da fenda foi definida através de observações ao microscópio. Para facilitar as observações usou-se um pequeno rolo de aço inserido na extremidade do provete para separar as duas metades (figura 5.3). É importante salientar que teve-se sempre o cuidado de não forçar demasiado a introdução do rolo de modo a não provocar um estalido proveniente do provete, som característico da propagação de uma fenda num compósito laminado de carbono. Não obstante, dadas as conhecidas

incertezas na determinação da posição exata da frente da fenda, foi utilizado o método da fenda efetiva já referido.



Figura 5.3 - Pino cilíndrico introduzido no provete para separar as duas metades do provete.

Os ensaios de fadiga foram todos realizados a uma frequência de 2Hz, impondo um deslocamento máximo δ_{\max} e um deslocamento mínimo δ_{\min} que foram sendo alterados de acordo com os resultados que iam sendo obtidos. O objetivo era dispor de um número apreciável de pontos para posterior construção do gráfico taxa de propagação da/dN versus ΔG_{II} ou $G_{II\max}$ que serve de base à Lei de Paris. Na verdade, como se usou o método da fenda efetiva, trata-se de da_c/dN . A tabela apresentada no Anexo D resume os ensaios efetuados em cada provete indicando os deslocamentos utilizados nos mesmos. A duração dos ensaios variou entre 25000 e 100000 ciclos, conforme a taxa de propagação indicada pela evolução das cargas.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS

5.1. Ensaios quase-estáticos

A figura 6.1 apresenta curvas carga-deslocamento típicas. De salientar que os valores dos deslocamentos apresentados na figura 6.1 contemplam já o desconto da flexibilidade da célula de carga da Shimadzu. Por seu turno, a tabela 6.1 resume os módulos de flexão E_1 e os valores de G_{IIC} calculados a partir dos procedimentos referidos no capítulo anterior.

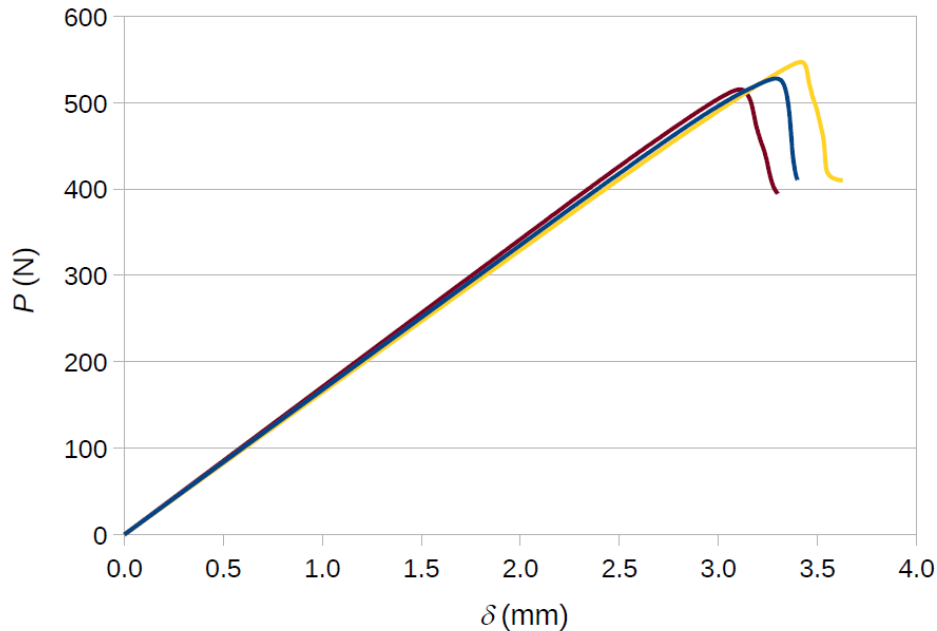


Figura 6.1 - Curvas carga-deslocamento típicas de ensaios quase-estáticos.

Os valores de E_1 estão algo abaixo dos 125 GPa obtidos anteriormente para este material [Morais e Pereira, 2007], o que se explica pelo menor teor de fibra, traduzido numa espessura algo superior à nominal. Já a dispersão é bastante baixa, situação habitual nas propriedades elásticas.

Tabela 6.1 – Módulos de flexão e taxas críticas de libertação de energia de deformação medidas.

Provete	E_1 (GPa)	$G_{IIC} - P_{max}$ (J/m ²)	$G_{IIC} - Max$ (J/m ²)
M1a1	116.3	1291	1344
M1a2	122.4	1218	1260
M1a3	114.8	1207	1294
M1a4	109.7	1305	1343
M1a5	108.5	1244	1287
M1a6	108.0	1175	1272
M1a7	118.8	1101	1140
M1a8	114.0	1110	1156
Média	114.1	1206	1262
Desv.pad. (%)	4.5	6.3	6.1

Os ensaios quase-estáticos revelaram também ausência de efeitos:

- De curva R significativo;
- Do filme nos valores de G_{IIC} (figura 6.2).

Caso o filme induzisse uma tenacidade inicial artificialmente alta, como reportado por exemplo por O'Brien e outros (2010), G_{IIC} baixaria logo após a propagação. Na realidade, os valores atingidos no ponto de carga máxima, atualmente considerado o ponto de iniciação mais fiável [ASTM Committee D-30, 2010], são quase iguais aos valores máximos do patamar (tabela 6.1). Note-se ainda que a dispersão é bastante baixa e que os valores de G_{IIC} são bastante mais elevados do que os medidos anteriormente – cerca de 900 J/m² [Morais e Pereira, 2007] – mas próximos dos obtidos recentemente por Sousa (2013) – 1.1 kJ/m². Isto explica-se novamente pelo menor teor de fibras destes provetes, mas não é de excluir a hipótese de ter havido alterações na formulação química da resina epóxida matriz deste material, precisamente no sentido de a tornar mais tenaz.

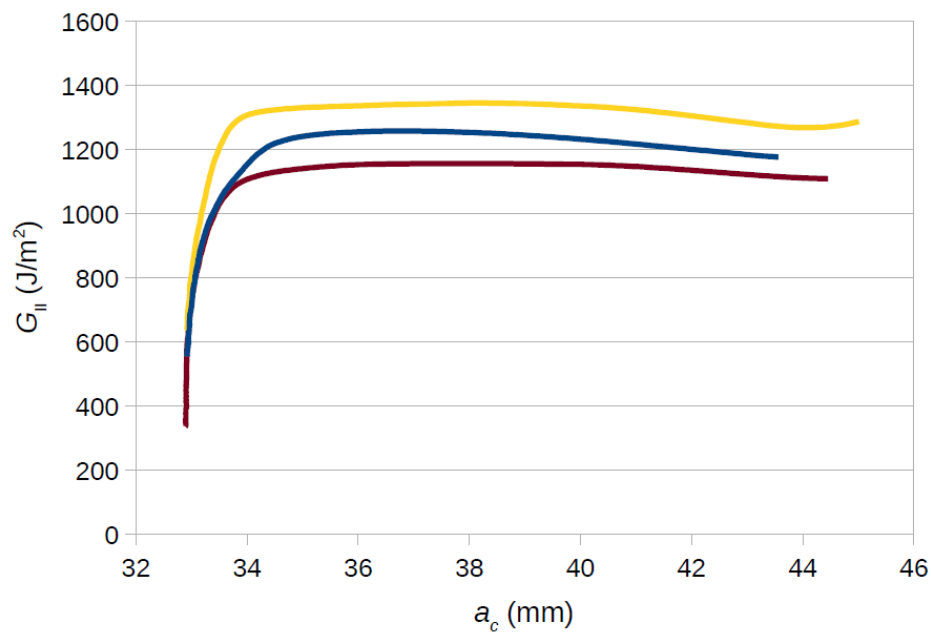


Figura 6.2 - Exemplos de Curvas R.

5.2. Ensaios de fadiga

As figuras 6.3 e 6.4 mostram evoluções típicas das cargas durante ensaios em que se registaram propagações de fenda lentas e rápidas, respetivamente. Note-se que as cargas máximas baixam bastante mais rapidamente com a propagação por se estar a impor deslocamentos. Em condições de propagação lenta, a carga mínima podia variar pouco, sendo mais afetada pelo ruído eletrónico.

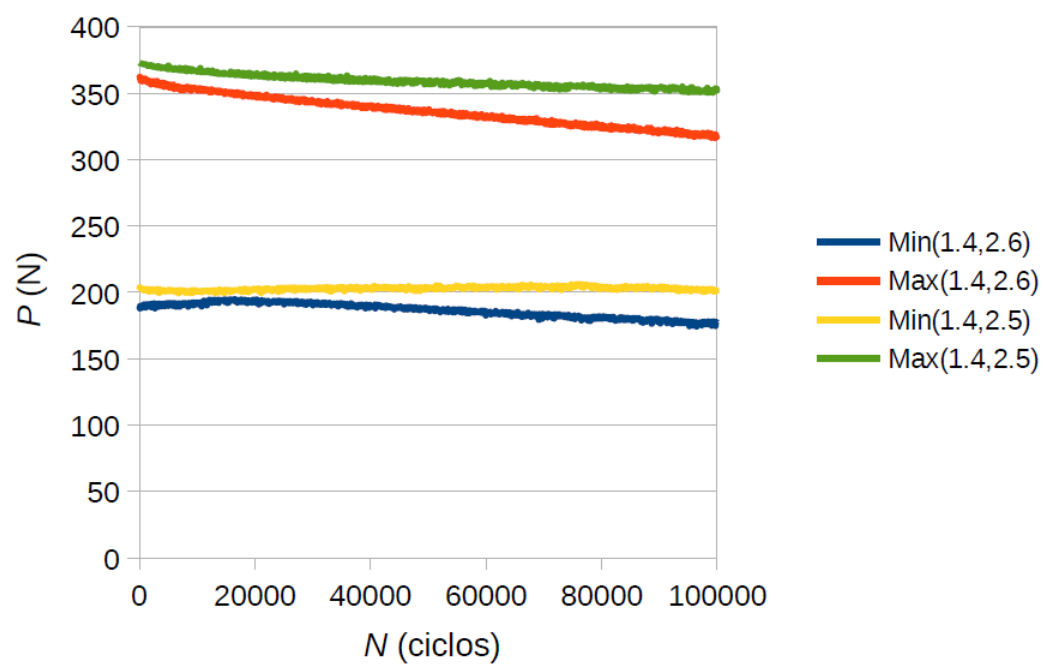


Figura 6.3 - Cargas mínima e máxima durante ensaios em condições de propagação lenta com as combinações (δ_{\min} , δ_{\max}) indicadas.

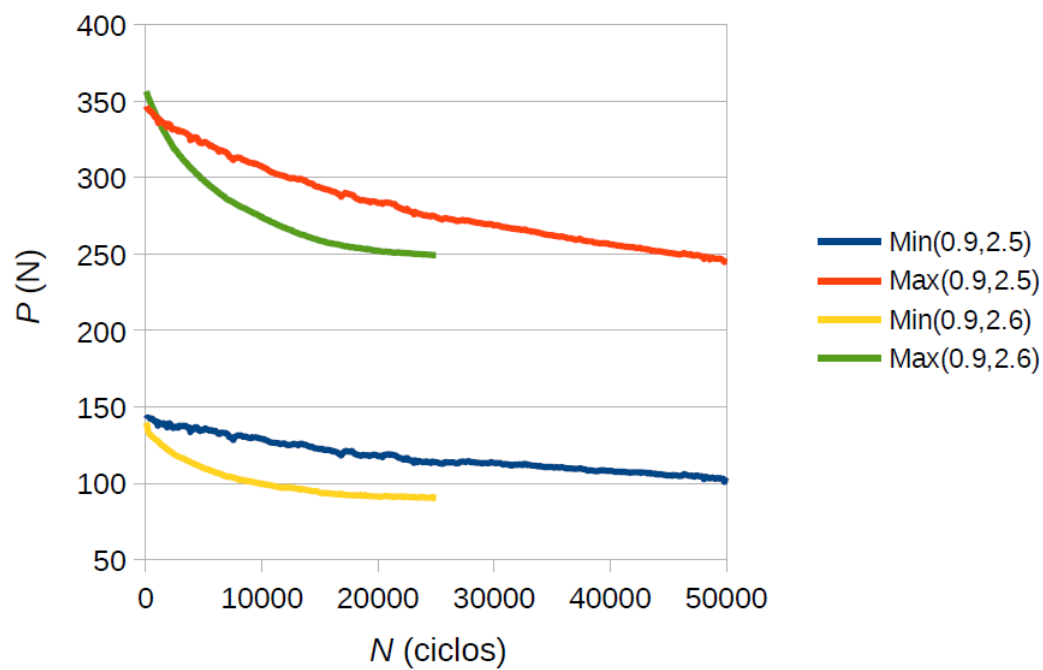


Figura 6.4 - Cargas mínima e máxima durante ensaios em condições de propagação rápida com as combinações (δ_{\min} , δ_{\max}) indicadas.

Construíram-se depois gráficos comprimento de fenda efetiva a_c versus número de ciclos N (figuras 6.5 e 6.6) a partir dos quais se obtiveram vários pontos (ΔG_{II} , $G_{II\max}$, da_c/dN). Esses pontos corresponderam a aproximações lineares por troços de $\Delta a_c = 1\text{mm}$, aproximações estas que se revelaram bastante rigorosas porque as variações de $G_{II\min}$ e de $G_{II\max}$ ao longo de um ensaio foram relativamente pequenas, mesmo em condições de propagação rápida (figura 6.7). Assim, em cada troço de $\Delta a_c = 1\text{mm}$ da_c/dN é o declive da aproximação linear e os valores de ΔG_{II} e de $G_{II\max}$ correspondentes são os valores médios no intervalo da aproximação.

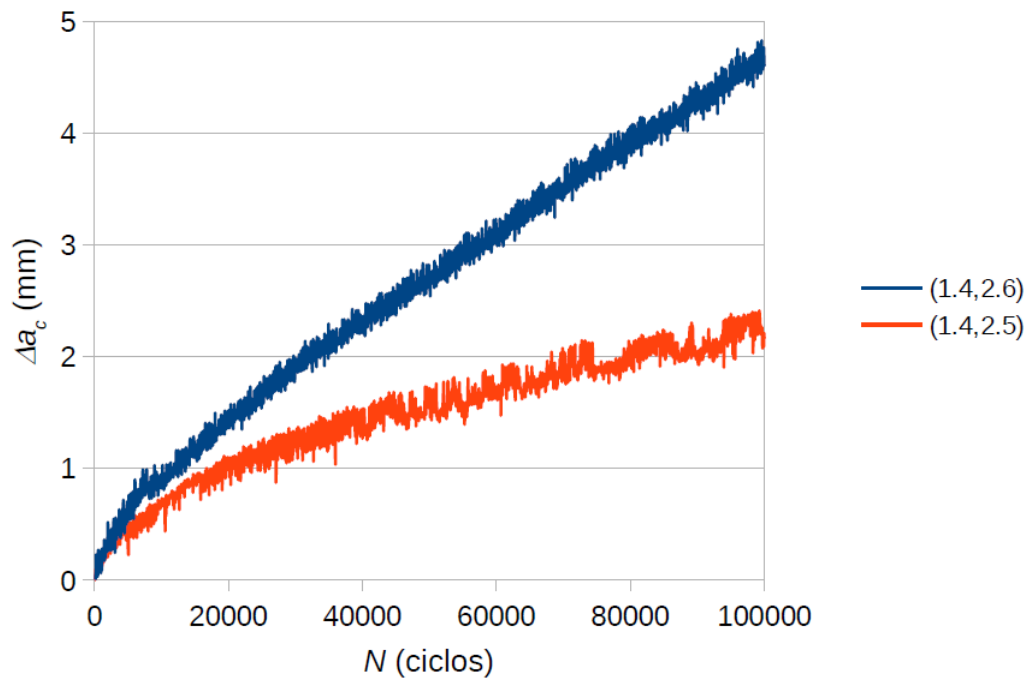


Figura 6.5 - Exemplos de evolução do comprimento de fenda efetivo com o número de ciclos em condições de propagação lenta com as combinações $(\delta_{\min}, \delta_{\max})$ indicadas.

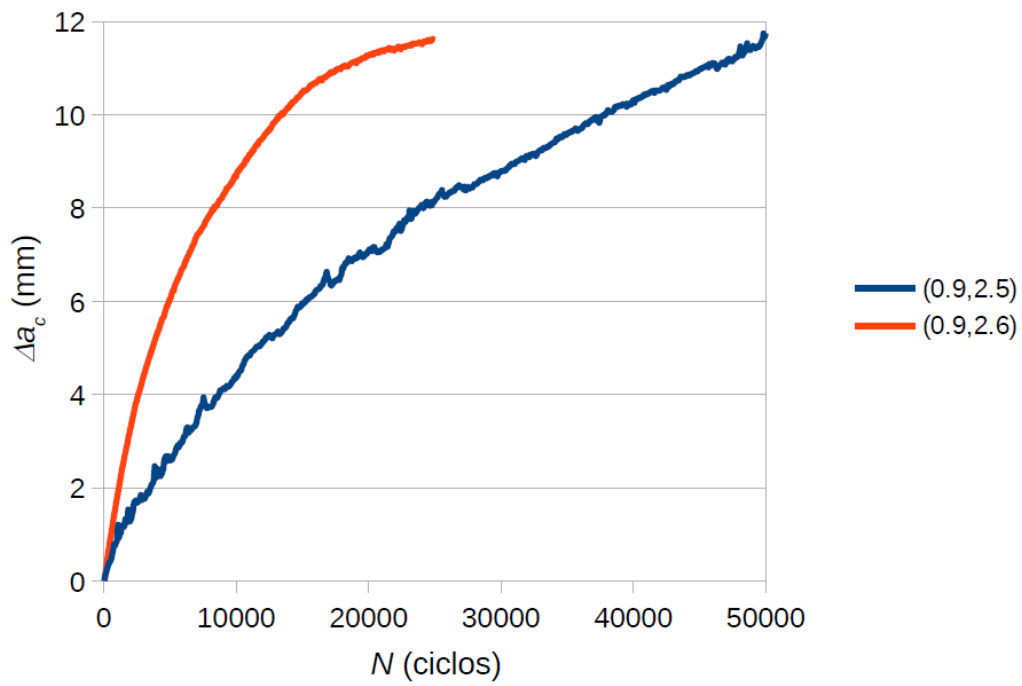


Figura 6.6 - Exemplos de evolução do comprimento de fenda efetivo com o número de ciclos em condições de propagação rápida com as combinações ($\delta_{\min}, \delta_{\max}$) indicadas.

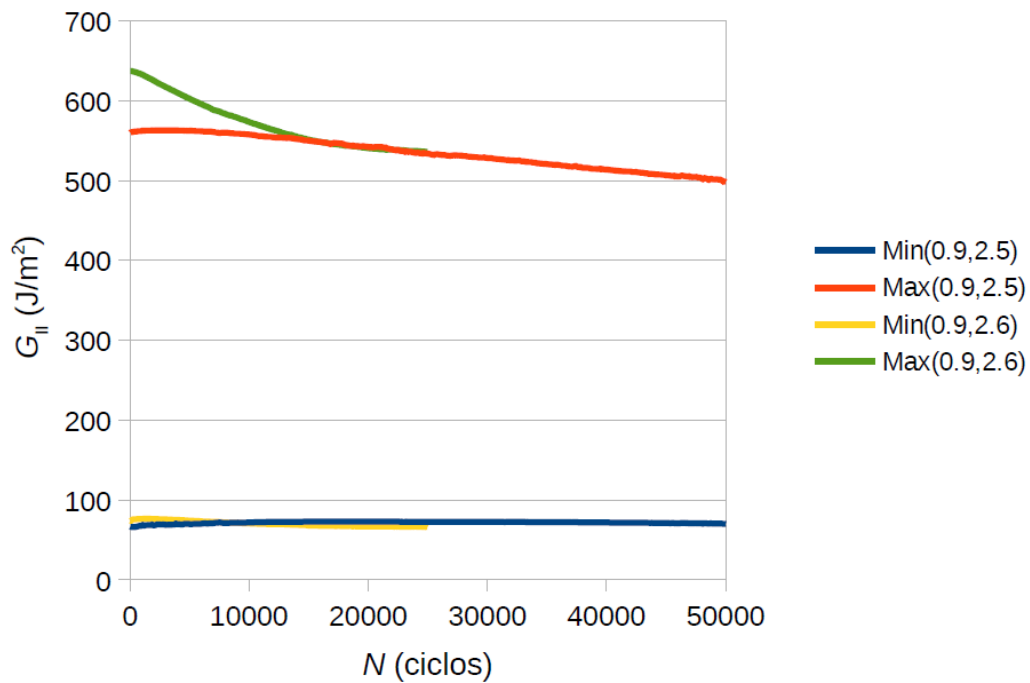


Figura 6.7 - Exemplos de evolução de $G_{II\min}$ e de $G_{II\max}$ com o número de ciclos em condições de propagação rápida com as combinações ($\delta_{\min}, \delta_{\max}$) indicadas.

Por fim, juntaram-se os pontos obtidos em todos os ensaios e construiu-se um primeiro gráfico da_c/dN versus $\Delta G_{II}/G_{IIc}$, em vez de apenas ΔG_{II} , de modo a ter a conta a variabilidade de G_{IIc} de provete para provete. À semelhança do que se verificou em estudos publicados [Pascoe e outros, 2013], esta normalização de ΔG_{II} reduziu um pouco a dispersão nos resultados, que é sempre elevada nos ensaios de fadiga. Os resultados da figura 6.8 revelaram ser consistentes com a Lei de Paris (equação 3.2), sendo o coeficiente de correlação 0.91, $D = 0.99$ mm/ciclo e $m = 8.75$, um valor relativamente elevado habitual (ver capítulo 4).

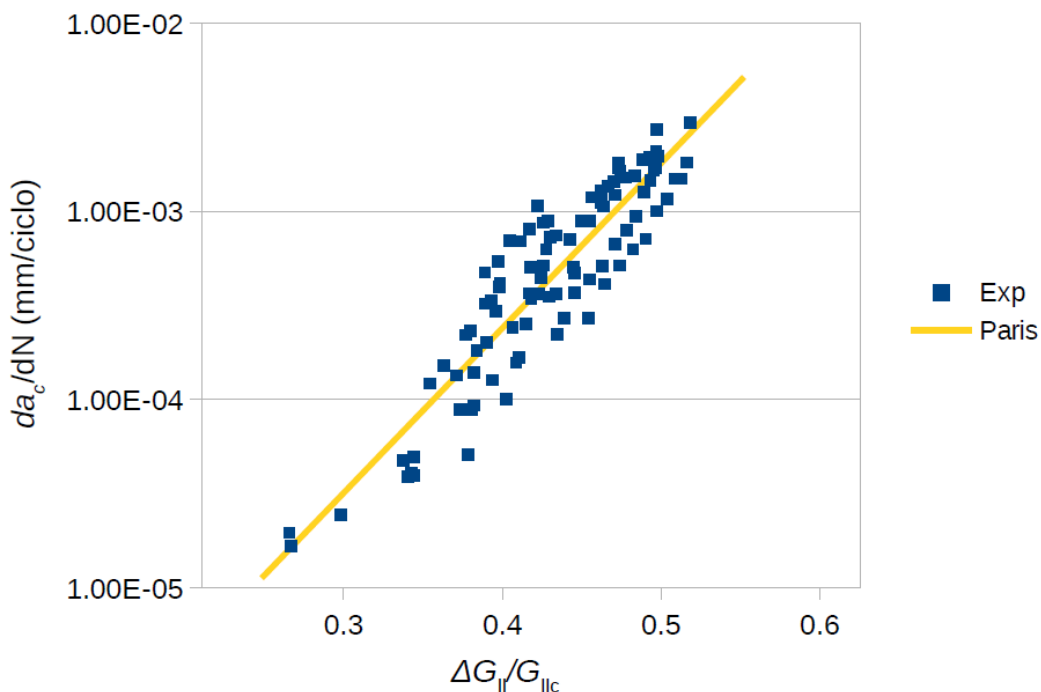


Figura 6.8 - Resumo de resultados da_c/dN versus $\Delta G_{II}/G_{IIc}$ e ajuste pela Lei de Paris.

Nesta fase era importante comparar os resultados deste trabalho como os obtidos por Sousa (2013), em que se usou uma geometria do provete um pouco diferente ($2L = 125$ mm, fenda inicial de $a = 40$ mm) e se variou apenas o deslocamento máximo de ensaio para ensaio. A metodologia de tratamento de dados foi também algo diferente, pelo que os resultados foram reanalisados (figura 6.9), conduzindo a parâmetros da Lei de Paris $D = 0.18$ mm/ciclo e $m = 6.37$, com coeficiente de correlação 0.95. As diferenças nos

resultados são visíveis na figura 6.9. Ainda assim, é possível uma boa aproximação global pela Lei de Paris com coeficiente de correlação 0.91, $D = 0.21$ mm/ciclo e $m = 6.74$.

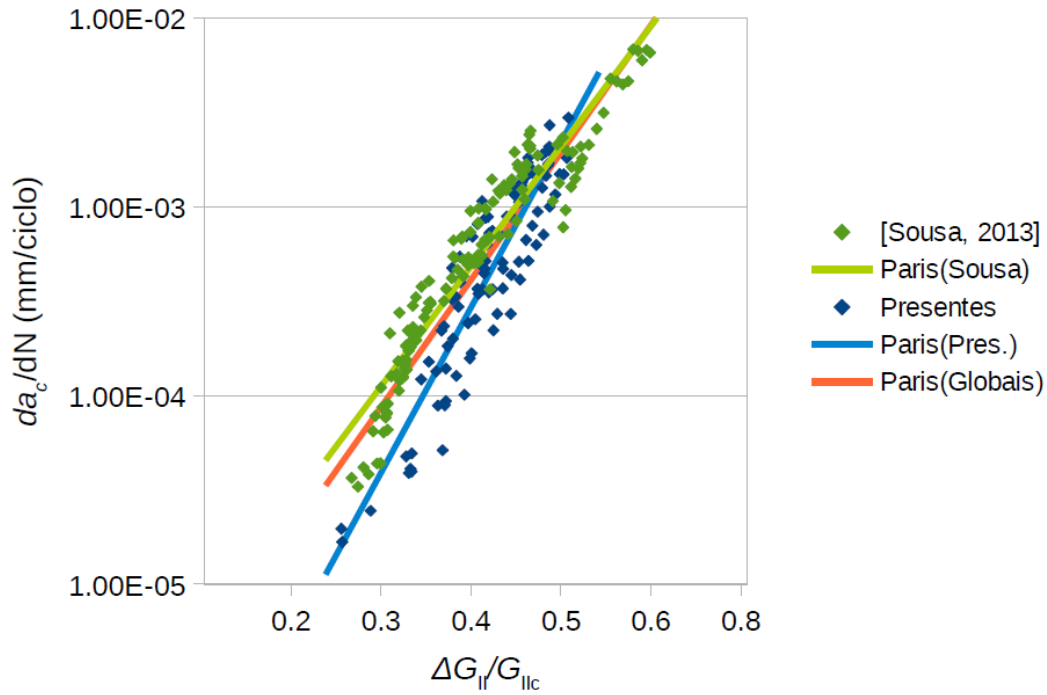


Figura 6.9 - Resumo de resultados da_c/dN versus $\Delta G_{II}/G_{IIc}$ medidos no trabalho presente e por Sousa (2013). Incluem-se as aproximações da Lei de Paris aos resultados de cada trabalho e globais.

Uma explicação imediata para as discrepâncias é o facto da taxa de propagação depender não só de ΔG_{II} , mas também de $G_{II\max}$. Todavia, os resultados da figura 6.9 e da figura 6.10 mostram que a taxa de propagação é mais sensível a ΔG_{II} . Os resultados de Sousa (2013) não permitiam esta conclusão, pois, tendo mantido um deslocamento mínimo constante, ao aumentar o deslocamento máximo aumentava-se simultaneamente ΔG_{II} e $G_{II\max}$.

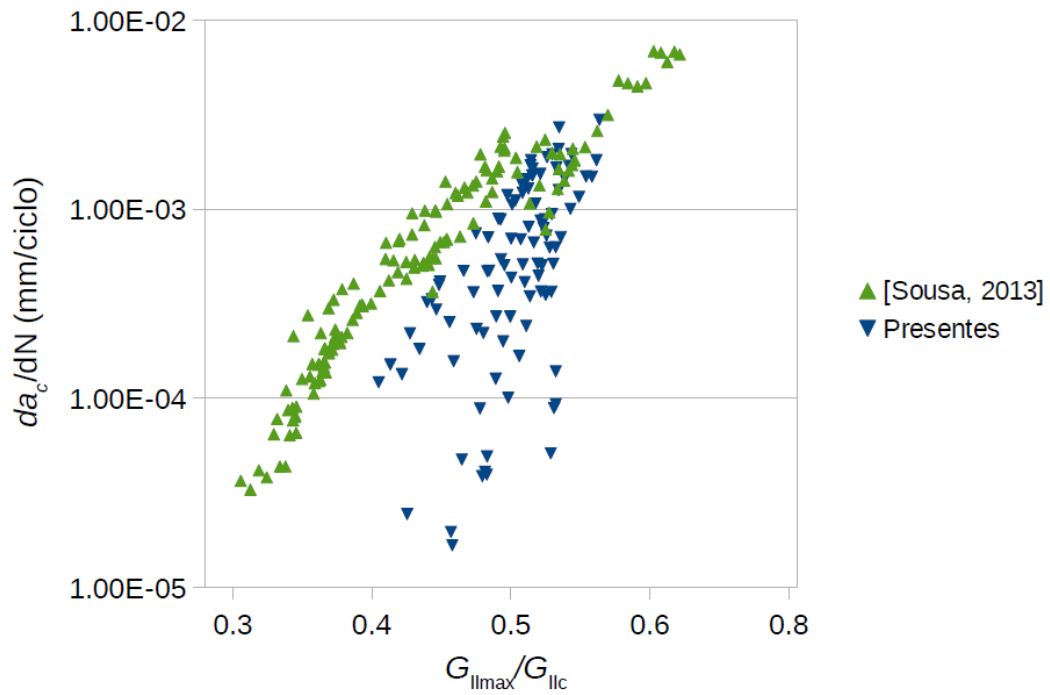


Figura 6.10 - Resumo de resultados da_c/dN versus $G_{II\max}/G_{IIc}$ medidos no trabalho presente e por Sousa (2013).

Para tentar compreender melhor os resultados, agruparam-se os pontos ($\Delta G_{II}/G_{IIc}$, da_c/dN) por intervalos de $G_{II\max}/G_{IIc} = 0.36-0.38$ a $0.50-0.52$, designados pelo valor médio de cada intervalo para efeitos de representação na figura 6.11. Esta indica que, para valores aproximadamente iguais de $\Delta G_{II}/G_{IIc}$, a propagação é frequentemente mais rápida para valores mais baixos de $G_{II\max}/G_{IIc}$. Este resultado aparentemente estranho pode explicar-se pelo facto de haver uma maior zona de processo quando $G_{II\max}/G_{IIc}$ é maior, diminuindo localmente a concentração de tensões que favorece a fadiga. Todavia, a dispersão nos resultados não permite conclusões definitivas a este respeito.

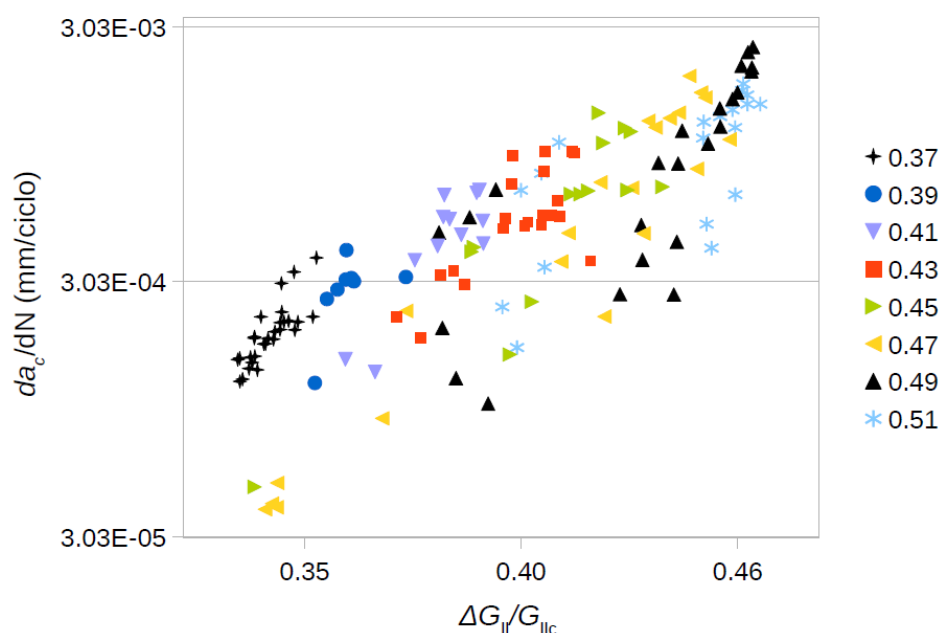


Figura 6.11 - Resumo de resultados da_c/dN versus $\Delta G_{II}/G_{IIc}$ medidos no trabalho presente e por Sousa (2013) agrupados por valores de $G_{II\max}/G_{IIc} = 0.37$ a 0.51.

Finalmente, embora não tenha sido objetivo deste trabalho definir os limiares de fadiga (*fatigue thresholds*), o presente trabalho dá algumas indicações relevantes, tomando como referência os ensaios realizados em que, durante 100000 ciclos, não se verificou qualquer propagação. Como se pode ver na tabela 6.2, os resultados apontam para $\Delta G_{II}/G_{IIc} \approx 0.28$. O facto de se ter variado quer o deslocamento máximo quer o deslocamento mínimo permite também concluir através do grau de dispersão que os limiares de fadiga são mais dependentes de $\Delta G_{II}/G_{IIc}$ do que de $G_{II\max}/G_{IIc}$.

Tabela 6.2 - Ensaio em que não se verificou propagação de fenda durante 100000 ciclos.

Provete	δ_{\min}	δ_{\max}	$\Delta G_{II}/G_{IIc}$	$G_{II\max}/G_{IIc}$
M1a1	1.9	2.7	0.25	0.49
M1a2	1.9	2.7	0.27	0.54
	1.9	2.8	0.26	0.61
M1a6	1.4	2.4	0.28	0.40
	1.4	2.5	0.31	0.43
M1a7	2.0	2.7	0.28	0.62
M1a8	1.4	2.3	0.28	0.42
	1.4	2.4	0.32	0.47
Média			0.28	0.50
Desv.pad. (%)			7.29	18.35

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTUROS

O objetivo principal deste trabalho era o estudo da delaminação sob fadiga em modo II de laminados carbono/epóxico. Para tal realizaram-se ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) sob deslocamentos cíclicos impostos, complementados com ensaios quase-estáticos. Os resultados obtidos permitem apresentar as seguintes conclusões:

- Os valores do módulo de flexão calculados para os provetes foram sensivelmente mais baixos do que os medidos anteriormente para o mesmo tipo de material, facto que se pode explicar pelo menor teor de fibras.
- Os valores de G_{IIc} foram superiores aos obtidos em estudos anteriores, o que se explica também pelo menor teor de fibras destes provetes e por possíveis alterações na formulação química da resina epóxida no sentido de a tornar mais tenaz.
- Verificou-se ausência de efeito de curva R significativo, o que é habitual neste tipo de material.
- Não foi detetada influência do filme gerador da delaminação inicial nos valores de G_{IIc} .
- Apesar do tratamento de sinal para filtragem do ruído eletrónico ter sido bastante eficaz, verificou-se por vezes a presença de ruído proveniente do sistema. Em condições de propagação lenta a carga mínima era a mais afetada pelo ruído.

- A implementação do novo sistema de aquisição de dados da *National Instruments*TM foi ainda mais eficaz na redução do ruído. Permitiu também reduzir os erros associados ao ajuste do pino com o provete, uma vez que no sistema anterior esse procedimento era realizado manualmente sem qualquer leitura da carga inicial, o que poderia induzir em erro.
- Os resultados dos ensaios de delaminação sob fadiga foram consistentes com a Lei de Paris, expressa em termos de taxa de propagação da fenda efetiva em função de $\Delta G_{II}/G_{IIc}$: a normalização de ΔG_{II} por G_{IIc} reduziu a dispersão dos resultados.
- Apesar do limiar de fadiga não ter sido objeto de uma determinação rigorosa, os resultados obtidos apontam para $\Delta G_{II}/G_{IIc} \approx 0.28$.

Demonstrou-se nesta dissertação que a MEF proporciona resultados bastante rigorosos. Não obstante, ao longo deste trabalho verificou-se existirem alguns aspetos importantes que podem ser melhorados em trabalhos futuros:

- Implementação de uma interface em linguagem de *LabView* para comunicação das instruções dadas à MEF e para interação com o novo sistema de aquisição de dados da *National Instruments*TM.
- Implementação de programa que permita gravar apenas os valores extremos de carga, reduzindo o tamanho dos ficheiros de dados. Da mesma forma, seria conveniente introduzir um código que termine automaticamente a gravação dos dados quando atingida a duração pretendida para o ensaio. De facto, como os ensaios são habitualmente bastante demorados, o utilizador pode não estar presente no momento exato de conclusão dos mesmos.
- Alteração da configuração da mesa inferior, que, tendo já que albergar diversos componentes, torna difícil a colocação dos provetes.

- Investigar a real necessidade dos pinos de posicionamento dos provetes, que se destinam a evitar um suposto deslizamento nos suportes, mas que podem causar algum atrito, afetando os valores das cargas medidas pela célula de carga.
- Conceção e construção de dispositivos para ensaios de modo I DCB e de modo-misto I-II MMB.

REFERÊNCIAS

[ACI, 1996] ACI – American Concrete Institute. State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures. ACI Committee 440. Detroit, Jan. 1996.

[Anderson, 1994] T. L. Anderson. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. CRC Press, 1994.

[ASTM Committee D-30, 2010]. Standard test method for determination of the mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites using the End-Notched Flexure (ENF) test. ASTM draft standard. October 19, 2010.

[ASTM E1823-13, 2013] Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[Barrett e Foschi, 1977] J. D. Barrett, R. O. Foschi. Mode II Stress Intensity Factors for Cracked Wood Beams. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, p. 371-378, 1977.

[Bastian e outros, 1989] F. L. Bastian, H. M. Caminha, M. Moraes. Apostila de Mecânica da Fratura, PEMM-COPPE-UFRJ, 1989.

[Beghini e outros, 2006] M. Beghini, L. Bertini, P. Forte. Experimental investigation on the influence of crack front to fiber orientation on fatigue delamination growth rate under mode II. Composites Science and Technology, Vol. 66, p. 240-247, 2006.

[Brunner e outros, 2008] A. J. Brunner, B. R. K. Blackman, P. Davies. A status report on delamination resistance testing of polymer-matrix composites. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 75, p. 2779-2794, 2008.

[Brunner e outros, 2013] A. J. Brunner, S. Stelzer, G. Pinter, G. P. Terrasi. Mode II fatigue delamination resistance of advanced fiber-reinforced polymer-matrix laminates: Towards the development of a standardized test procedure. International Journal of Fatigue, Vol. 50, p. 57-62, 2013.

[Bureau e outros, 2002] M. N. Bureau, F. Perrin, J. Denault, J. I. Dickson. Interlaminar fatigue crack propagation in continuous glass fiber/polypropylene composites. International Journal of Fatigue, Vol. 24, p. 99-108, 2002.

[Callister e Rethwisch, 2009] W. D. Callister Jr., D. G. Rethwisch. Materials Science and Engineering: An Introduction. 8th Edition. John Wiley and Sons, 2009.

[Carvalhoso, 2012] P. I. A. Carvalhoso. Finalização de máquina para ensaios de fadiga sob delaminação. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2012.

[Crawford, 2002] R. Crawford. Plastics Engineering, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann, 2002.

[Dowling, 2006] N. E. Dowling. Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 3rd Edition, Prentice Hall, 2006.

[Griffith, 1920] A. A. Griffith. Phenomena of rupture and flow in solids. Philos. Trans. R. Soc. London Ser., Vol. A221, p. 163–198, 1920.

[Hashemi e outros, 1990] S. Hashemi, A. J. Kinloch, J. G. Williams. The analysis of interlaminar fracture in uniaxial fibre-polymer composites. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 427, p. 173-199, 1990.

[Hollaway e Leeming, 1999] L. C. Hollaway, M. B. Leeming. Strengthening of reinforced concrete structures using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering. 1st Edition, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999.

[Hollaway, 1993] L. C. Hollaway. Polymer Composites for civil and structural engineering. Glasgow, Blackie Academic and Professional, 1993.

[Inglis, 1913] C. E. Inglis. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Trans. Inst. Nav. Archit. London, Vol. 55, p. 219–230, 1913.

[ISO 15114, 2014] Fibre-reinforced plastic composites -- Determination of the mode II fracture resistance for unidirectionally reinforced materials using the calibrated end-loaded split (C-ELS) test and an effective crack length approach. Geneva (Switzerland): International Organization for Standardization

[Júnior, 2004] E. H. Júnior. Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicações de curvas de resistência J-da para previsão de colapso em dutos, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

[LEPCom, 2014] Laboratório de Engenharia de Polímeros e Compósitos Online <http://lepcom.demet.ufmg.br/website/index.php/pt/linhas-de-pesquisa/interfaces/compósitos>, Acedido em Junho de 2014.

[Matsubara e outros, 2006] G. Matsubara, H. Ono, K. Tanaka. Mode II fatigue crack growth from delamination in unidirectional tape and satin-woven fabric laminates of high strength GFRP, International Journal of Fatigue, Vol. 28, 1177-1186, 2006.

[Matthews e Rawlings, 1999] F. L. Matthews, R. D. Rawlings. Composite Materials: Engineering and Science. Woodhead Publishing Ltda and CRC Press, 1999.

[McCrum e outros, 1999] N. McCrum, C. Buckley, C. Bucknall. Principles of Polymer Engineering, 2nd Edition, 1999.

[Melo, 2012] F. J. Queirós de Melo. Introdução à Mecânica de Fratura. Textos de apoio à unidade curricular de opção do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012.

[Morais e Pereira, 2007] Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy unidirectional laminates. Composites Part A, Vol. 38, p. 785-794, 2007.

[Morais, 2011] A. Morais. Novel cohesive beam model for the End-Notched Flexure (ENF) specimen. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 38, p. 3017-3029, 2011.

[Moura e outros, 2011] M. Moura, A. Morais e A. Magalhães, Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico, 2ª Edição, 2011.

[NI, 2014] National Instruments. Disponível na Internet: <http://www.ni.com/labview/pt/>. Acedido em 10 de Setembro de 2014.

[O'Brien e outros, 2010] T. K. O'Brien, W. M. Johnston, G. J. Toland. Mode II Interlaminar Fracture Toughness and Fatigue Characterization of a Graphite Epoxy Composite Material, NASA Langley Research Center, 2010.

[Pardini, 2000] L. C. Pardini. Preformas para Compósitos Estruturais. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 10: p. 100-109, 2000.

[Paris e Erdogan, 1963] P. Paris, F. Erdogan. A critical Analysis of Crack Propagation Laws. J. Basic Eng. Tran. ASME, p. 528-534, 1963.

[Paris e outros, 1961] P. Paris, M. Gomez, W Anderson. A Rational Analytic Theory of Fatigue. Trends Eng., Vol. 13, p. 9-14, 1961.

[Pascoe e outros 2013] J. A. Pascoe, R. C. Alderliesten, R. Benedictus. Methods for the prediction of fatigue delamination growth in composites and adhesive bonds – A critical review. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 112-113, p. 72-96, 2013.

[Pereira e Morais, 2008] A. B. Pereira, A. B. de Morais. Mixed mode I + II interlaminar fracture of carbon/epoxy laminates. Composites Part A, Vol. 39, p. 322–333, 2008.

[Pereira, 2006] António Manuel de Bastos Pereira. Fratura interlaminar de compósitos de matriz polimérica. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

[Plascams, 1998] PLASCAMS Database. Versão 3.0 para Microsoft Windows 95, Rapra Technology Lda., U. K, 1998.

[Pugno e outros, 2006] N. Pugno, M. Ciavarella, P. Cornetti, A. Carpinteri. A generalized Paris' law for fatigue crack growth. Journal of The Mechanics and Physics of Solids, Vol. 54, p. 1333-1349, 2006.

[Reyne, 1990] M. Reyne. Les Plastiques-Applications et Transformations. Hermes, Paris, 1990.

[Rezende e outros, 2011] M. C. Rezende, M. L. Costa, E. C. Botelho. Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática. Sao Paulo: Artliber Editora, 2011.

[Shindo e outros, 2009] Y. Shindo, T. Takeda, F. Narita, N. Saito, S. Watanabe, K. Sanada. Delamination growth mechanisms in woven glass fiber reinforced polymer composites under mode II fatigue loading at cryogenic temperatures. Composites Science and Technology, Vol. 69, p. 1904-1911, 2009.

[Sousa, 2013] J. A. A. Sousa. Melhoramento e Teste da Máquina de Ensaio de Fadiga. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2013.

[Strohaecker, 1999] Strohaecker T.R. Mecânica da Fratura, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, 1999.

[Sutherland, 1999] H. J. Sutherland. On the Fatigue Analysis of Wind Turbines, SAND99-0089, Sandia National Laboratories, Albuquerque, p. 133, 1999.

[Tarnowski, 2003] G. A. Tarnowski. Determinação da pressão de colapso em dutos API 5L X56 aplicando o método R6. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

[TU Delft, 2014], Delft University of Technology: TU delft. Disponível na internet: <http://www.lr.tudelft.nl/index.php?id=26757&langen#delamination>. Acedido em 10 de Março de 2014.

[Ventura, 2009] A. M. F. M. Ventura, Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas, Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 21, p. 10-19, 2009.

[Westergaard, 1939] H. M. Westergaard. Bearing pressures and cracks: Journal of Applied Mechanics, Vol. 6, p. A49-A53, 1939.

[Zhender, 2007] A. T. Zehnder. Lecture Notes on Fracture Mechanics. Cornell University, 2007.

ANEXOS

Anexo A

Valores típicos de cargas máximas e mínimas obtidas pela MEF e Shimadzu.

	Inicial		Final	
	Força Max [N]	Força Min [N]	Força Max [N]	Força Min [N]
Shimadzu	452,7203	334,8001	435,435	320,371
MEF	410,0725391	304,5768054	402,1296384	302,1676362

Cálculos típicos dos deslocamentos reais da MEF e Shimadzu.

	Inicial		Final	
	dMax [mm]	dMin [mm]	dMax [mm]	dMin [mm]
Shimadzu	2,650200767	1,963171989	2,65210215	1,96475919
MEF	2,429352124	1,798979308	2,434594439	1,80056936

Anexo B

Valores da força aplicada na célula de carga da MEF e correspondentes valores digitais para o *offset* 1000.

Carga [N]	Valores (10 bits)
0	1000,12
4,35	985,94
9,60	975,53
19,50	955,27
37,80	922,10
78,60	837,78
158,75	673,12
317,60	363,04
397,50	213,27

Valores da força aplicada na célula de carga da MEF e correspondentes valores digitais para o *offset* 500.

Carga [N]	Valores (10 bits)
0	498,69
4,30	488,20
9,20	474,78
18,70	455,80
37,80	413,90
77,20	328,88
157,20	161,78
200,10	75,63
231	20,39

Anexo C

Valores de calibração da célula de carga para o sistema em LabVIEW.

Carga [N]	Valores (bits)
0	-389,96
5,4	-364,12
10,9	-337,46
20,8	-291,64
40	-200,78
80	-13,13
160,4	357,05
320	1067,34
450	1614,85

Anexo D

Resumo das combinações de deslocamentos impostos nos ensaios efetuados.

Provetes	δ_{\min} (mm)	δ_{\max} (mm)
M1a1	1,3	2,5
	1,3	2,8
	1,9	2,7
M1a2	1,3	2,5
	1,3	2,7
	1,5	2,7
	1,9	2,7
	2,2	2,9
M1a3	1,3	2,5
	1,3	2,7
	1,3	2,8
M1a4	0,9	2,8
	1,3	2,5
	1,3	2,7
	1,3	2,8
M1a5	1,3	2,5
	1,3	2,7
	1,3	2,8
M1a6	0,9	2,5
	0,9	2,7
	1,4	2,4
	1,4	2,5
	1,4	2,6
M1a7	0,9	2,5
	0,9	2,6
	1,4	2,3
	2	2,7
	2	2,8
M1a8	0,9	2,5
	0,9	2,6
	1,4	2,3
	1,4	2,4
	1,4	2,5

Anexo E

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
```

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

```
n1 = 50 'médias
```

```
k = 1
```

```
L = 1
```

```
valor = 5
```

```
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 coluna 1 (originais) com as médias da coluna 2 e filtra pelo método das Médias Deslizantes. Escreve os valores válidos na coluna 3.

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

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

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

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, portanto a média é para um espaço temporal de 50 (n1) pontos originais mas que agora (em cells(1,3)) serão menos.

media = media + Cells(i, 3) 'da primeira 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 '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) - 994.75) / 1.9796 'valores da calibração da célula de carga

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) - 994.75) / 1.9796 '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

End Sub

Anexo F

Código da Macro de Filtragem para o sistema LabVIEW

```
Sub extremos()
```

```
'***** 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
```

```
amostra = 1299 'depende da amostra do ensaio
```

```
n = 1
```

```
j = 1
```

```
minimo = Cells(1, 1)
```

```
maximo1 = Cells(1, 1)
```

```
For i = 1 To ult
```

```
If Cells(i, 1) < minimo Then
```

```
minimo = Cells(i, 1)
```

```
End If
```

```
If Cells(i, 1) > maximo1 Then
```

```
maximo1 = Cells(i, 1)
```

```
End If
```

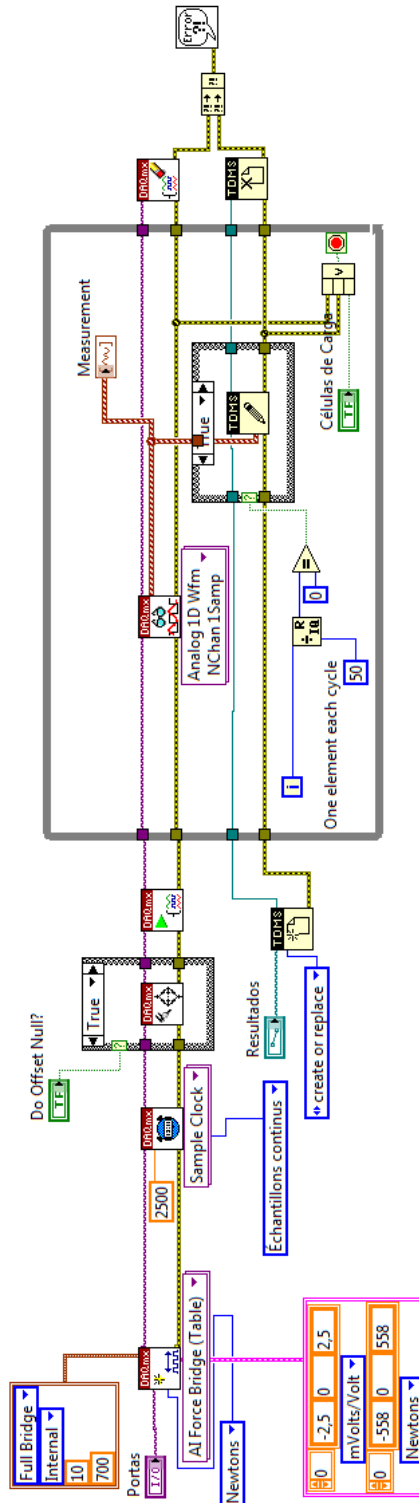
```
n = n + 1
```

```
If n = amostra Then
```

```
Cells(j, 2) = minimo  
Cells(j, 3) = maximo1  
j = j + 1  
n = 1  
minimo = Cells(i, 1)  
maximo1 = Cells(i, 1)  
End If  
Next  
  
End Sub
```

Anexo G

Diagrama de bloques LabVIEW



Anexo H

Resumo das especificações do chassi NI cDAQ-9178

Quantidade de slots	8
Sistema operacional / target	Real-Time Windows
Suporte a LabVIEW RT	Sim
LabVIEW RT Support	
National Instruments LabVIEW with the LabVIEW Real-Time Module can be integrated with supported hardware to deliver deterministic, real-time performance for data acquisition and control systems. Using LabVIEW graphical programming, a LabVIEW Real-Time embedded control application can be developed on a desktop machine, and then downloaded and executed on an independent hardware target.	
Trigger interno	Sim
Requisitos de alimentação	
Potência total disponível	15 W
Faixa de tensão de entrada	9 V - 30 V
Contadores / temporizadores	
Contadores	4
Dimensões	32 bits
Choque e vibração	
Choque em operação	30 g
Vibração aleatória	5 Hz - 500 Hz
Faixa de frequência de operação aleatória	0.3 g
Especificações físicas	
Comprimento	25.4 cm
Largura	8.81 cm
Altura	5.89 cm
Altura	878 gram
Temperatura de operação	-20 °C - 55 °C
Altitude máxima	5000 m

Anexo I

Resumo das especificações do módulo NI-9237

Família de produtos	Industrial I / O
Tipo de medição	Strain / Bridge-based sensor
Form Factor	CompactDAQ CompactRIO
Sistema operacional / target	Real-Time Windows
Conformidade com RoHS	Sim
Tipo de isolamento	Isolação entre canais e terra
Entrada analógica	
Canais single-ended	0
Canais diferenciais	4
Resolução da entrada analógica	24 bits
Faixa máxima de tensão	
Range	-25 mV / V - 25 mV / V
Accuracy	0.0375 mV / V
Configurações de ponte	Full Bridge Half Bridge Quarter Bridge
Amostragem simultânea	Yes

Simultaneous Sampling

A property of a measurement system in which each input or output channel is digitized or updated at the same instant. You will need simultaneous sampling for applications where the time relationship between inputs is important, such as phase analysis of AC signals.

Because channel-dedicated analog-to-digital converters (ADCs) are used to sample data simultaneously between inputs, the maximum sample rate is applicable to each channel and is not divided by the total number of channels. Devices that don't have simultaneous sampling capabilities use multiplexing to connect each channel to its ADC.

Interval scanning is a low-cost option to simulate simultaneous sampling for low-frequency signals such as temperature or pressure. This method scans the input channels at one interval and uses a second interval to determine the time before repeating the scan. The input channels are scanned within microseconds, creating the effect of simultaneously sampling the input channels.

Tensão de excitação	2 V
	2.5 V
	3.3 V
	5 V
	10 V
Condicionalamento de sinais	Anti-aliasing filter Bridge completion Voltage excitation
Saída analógica	
Quantidade de canais	0
E / S digitais	
Canais bidirecionais	0
Canais somente de entrada	0
Canais somente de saída	0
Contadores / temporizadores	
Contadores	0
Especificações físicas	
Comprimento	9 cm
Largura	2.3 cm
Conector de E / S	RJ50
Temperatura de operação	-40 °C - 70 °C