



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Rafael dos Santos Jorge

**ANÁLISE DO ESTADO DE DEFORMAÇÃO EM  
LAMINADOS VIDRO/EPÓXIDO IMERSOS EM  
ÁGUA SALGADA SUJEITOS A CARGAS CÍCLICAS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na área de Produção e Projeto, orientada pela Professora Doutora Maria Augusta Neto e pelo Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica de Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Outubro de 2021



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Análise do estado de deformação em laminados vidro/epóxico imersos em água salgada sujeitos a cargas cíclicas**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

## **Deformation analysis of immersed in a saltwater environment glass/epoxy laminates subject to cyclic loads**

**Autor**

**Rafael dos Santos Jorge**

**Orientadores**

**Maria Augusta Neto**

**Ricardo Nuno Madeira Soares Branco**

**Júri**

- |                   |                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Presidente</b> | <b>Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro</b><br><b>Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>                                                                                                                            |
| <b>Orientador</b> | <b>Professora Doutora Maria Augusta Neto</b><br><b>Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>                                                                                                                                             |
| <b>Vogais</b>     | <b>Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes</b><br><b>Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra</b><br><b>Doutor Joel Alexandre da Silva de Jesus</b><br><b>Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra</b> |

**Coimbra, Outubro, 2021**







## **Agradecimentos**

Gostaria de apresentar o meu profundo agradecimento a algumas pessoas que contribuíram ativa e passivamente para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores Professora Doutora Maria Augusta Neto e Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco pelo apoio e disponibilidade que me garantiram ao longo destes meses para realização deste projeto.

A toda a minha família que me garantiu apoio ao longo de todo o meu percurso académico e de toda a minha vida, que me ensinaram valores morais essenciais a uma vida de felicidade, que me guiaram até este caminho em que me encontro, e que acima de tudo nunca me deixaram baixar os braços. Obrigado do fundo do coração.

Aos meus amigos e colegas que estiveram a meu lado ao longo destes cinco anos de ensino, com os quais também aprendi valores importantes de amizade e companheirismo. Dentre eles enfatizo o Gonçalo Rodrigues, Pedro Costa, Ruben Nascimento, Rui Coimbra, Pedro Rodrigues, Alice Figueiredo, Diogo Sá Pinto, David Campos, Leonardo Albuquerque, Carlos Campos, Leandro Barros e Gonçalo Lopes. Todos levo comigo para a vida.

Aos meus amigos de infância e juventude que me acompanharam e acompanham desde sempre, que independentemente da circunstância se mantêm a meu lado.

A todos os docentes que passaram pela minha vida de ensino e que de certa forma contribuíram para o meu crescimento cultural e intelectual.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica que durante estes cinco anos tornaram este departamento numa segunda casa.

Um enorme obrigado a todos.





## Resumo

O uso de materiais compósitos em diversas as áreas de engenharia tem sido cada vez mais abundante devido à robustez e às características variadas que se podem obter através da mistura de diferentes tipos de materiais.

A indústria naval é um setor no qual a utilização de materiais compósitos prevalece sobre outros tipos de materiais, pelo que é natural desenvolver estudos e investigações em materiais para este setor em específico. Neste setor os compósitos são sujeitos a solicitações mecânicas variadas em simultâneo com a inserção em ambiente corrosivo.

Esta dissertação tem como objetivo principal entender o efeito que o tempo de imersão em ambiente salino (0,229 e 900 dias) tem na resposta à fadiga de compósitos de resina epoxídica reforçado com fibras de vidro, bem como entender o efeito que o esforço de pré-tensão (0%, 25%, 50% e 75% da tensão de rotura) pode ter na vida à fadiga nestes materiais. Os ensaios com tempo de imersão com 0 e 229 dias foram efetuados em estudos anteriores.

Relativamente às amostras com tempos de imersão de 900 dias, foram ensaiados 18 provetes do material compósito, observando-se, após este período, uma percentagem de absorção de água de cerca de 1% do peso do provete. Destes, 9 provetes organizados em grupos de três foram sujeitos a valores de pré-tensão de 25%, 50% e 75% do máximo valor de tensão que o material pode suportar. Os restantes provetes foram testados sem pré-tensão.

Aquando dos ensaios à fadiga, os provetes foram observados com um sistema de correlação de imagem digital VIC3D® equipado com duas câmaras calibradas. Após obtenção dos valores do campo da primeira deformação principal e da deformação na direção de y (direção de solicitação), estes foram analisados gráfica e analiticamente com recurso ao programa Microsoft Excel®.

Com o aumento do teor de água no provete há a perda de resistência à fadiga do mesmo, como se comprovou pelas curvas S-N obtidas para os vários casos: a curva dos provetes imersos durante 900 dias no ambiente salino apresenta piores resultados do que as curvas S-N dos provetes de controlo e imersos 229 dias, o que confirma a maior redução de

resistência à fadiga no caso dos provetes sujeitos a maiores tempos de imersão em ambientes corrosivos salinos.

Relativamente à perda de resistência do provete causada pela aplicação de esforços de pré-tensão, não se obtiveram resultados totalmente conclusivos, uma vez que os resultados não apresentaram um comportamento definido.

**Palavras-chave:** Compósitos laminados vidro/epóxi, Ensaio de fadiga, Degradação de compósitos, Curvas S-N, Correlação digital de imagem.

## Abstract

The use of composite materials is being more and more abundant due to their robustness and due to their variety of characteristics which can result from the mixture of different types of materials.

The naval industry is a major sector in which composite materials play a significant role. This motivates the investigation and development of composites for this specific sector. In this type of industry the materials are subjected to complex service conditions which may include contact with corrosive environments.

This dissertation aims to understand the effect of seawater environments on fatigue behaviour of glass/fiber reinforced epoxy composites subjected to different immersion times (0, 229 and 900 days) and different pre-stress levels (0%, 25%, 50% and 75% of the yield strength of the tested material). The tests for immersion times of 0 and 229 days were done in a previous study.

Regarding the samples in seawater for 900 days, 18 specimens were studied. The mass increased 1% of the specimens. From them, 9 specimens, organised into three groups of three, were subjected to pre-stresses of 25%, 50% and 75%. The remaining 9 specimens were tested without pre-stress.

During the fatigue tests, the specimens were observed with a VIC3D® digital image correlation program system, equipped with two calibrated cameras. After extracting the first principal strain fields and the y axis strain values, the results were graphical and analytically analysed using *Microsoft Excel*®.

With the increase of the of seawater immersion time, there is a loss fatigue resistance, as demonstrated by the obtained S-N curves for the different batches: the 900 day immersed specimens showed worse results than those of the 229 day immersed specimens and the control specimens. This fact confirms an increased reduction of fatigue life for higher immersion times in corrosive saltwater environments.

The analysis of the fatigue strength of the specimens subjected to pre-stress-values was not fully conclusive because the results have shown an undefined behaviour.

**Keywords** Glass fiber/epoxy laminate composites, Fatigue testing, Composite degradation, S-N Curves, Digital image correlation.

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo .....	1
1.2. Estrutura da Dissertação .....	2
2. Estado da arte.....	5
2.1. Materiais Compósitos .....	5
2.1.1. Composição e propriedades.....	5
2.1.1.1 Compósitos de matriz polimérica .....	6
2.1.1.2 Tipos de fibras .....	6
2.1.2. Tipos de dano .....	7
2.1.2.1 Fissuração da matriz .....	8
2.1.2.2 Rotura da fibra .....	8
2.1.2.3 Delaminação .....	8
2.1.2.4 Separação da fibra da matriz.....	9
2.2. Fadiga.....	9
2.2.1 Variáveis influentes .....	10
2.2.2 Modelos de previsão e de comportamento .....	11
2.2.3 Métodos de monitorização e registo de dados.....	13
2.3. Comportamento de materiais compósitos sujeitos a ambientes hostis .....	15
2.4. Correlação digital de imagem (DIC) .....	17
3. Materiais e Procedimento experimental .....	19
3.1. Materiais .....	19
3.1.1. Provetes .....	19
3.1.1 Máquina de Fadiga.....	22
3.1.1 Correlação digital de imagem .....	23
3.2 Ensaio de fadiga .....	24
3.3 Recolha e processamento de dados.....	25
4. Resultados e discussão .....	27
4.1. Curvas S-N (Tensão-Vida) .....	27
4.2. Efeito da pré-tensão e do tempo de imersão .....	29
4.2.1. Análise ao número de ciclos.....	29
4.2.2. Análise da deformação nos provetes pré-tracionados .....	32
4.3. Efeito da tensão na vida do provete .....	39
4.4. Análise do campo de deformações em redor do furo .....	42
4.4.1. Provetes imersos pré-tensionados.....	43
4.4.2. Provetes imersos sem pré-tensão aplicada.....	49

5. Conclusões e propostas para projetos futuros .....	51
5.1. Conclusões.....	51
5.2. Propostas para projetos futuros.....	52
Referências Bibliográficas .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação dos dois tipos principais de delaminação .....	9
Figura 2.2 – Representação das diferentes cargas dinâmicas de fadiga .....	9
Figura 2.3 – Efeitos da foto-oxidação numa corda de polímeros- <a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Foto-oxidação_2021">https://pt.wikipedia.org/wiki/Foto-oxidação 2021</a> .....	16
Figura 3.1 - Provete de resina epoxídica reforçado com fibra de vidro .....	20
Figura 3.2 – Provete de resina epoxídica reforçado com fibra de vidro com padrão <i>speckle</i> .....	21
Figura 3.3 - INSTRON 1341 .....	22
Figura 3.4 - Esquema do setup do DIC .....	23
Figura 3.5 - Setup do programa VIC3D® .....	23
Figura 3.6 - Zona de análise do provete .....	26
Figura 4.1 - Curva S-N para os testes de controlo, provetes imersos por 229 e 900 dias ...	28
Figura 4.2 - Valores de vida à fadiga, em ciclos, dos provetes pré carregados.....	30
Figura 4.3 – Gráfico da média de deformação principal em função da vida dos provetes P25-1, P50-2 e P75-1 (esquerda) e gráfico da média de deformação sobre o eixo yy em função da vida dos provetes P25-1, P50-2 e P75-1 (direita) .....	33
Figura 4.4 - Gráfico da percentagem média de deformação principal em função da vida dos provetes P P25-1, P50-2 e P75-1 (esquerda) e gráfico da percentagem média de deformação sobre o eixo yy em função da vida do provete P25-1, P50-2 e P75-1 (direita) .....	34
Figura 4.5 – Gráfico da média de deformação principal em função da vida dos provetes P25-3, P50-3 e P75-2 (esquerda) e gráfico da média de deformação sobre o eixo yy em função da vida dos provetes P25-3, P50-3 e P75-2 (direita) .....	36
Figura 4.6 - Gráfico da percentagem média de deformação principal em função da vida dos provetes P P25-3, P50-3 e P75-2 (esquerda) e gráfico da percentagem média de deformação sobre o eixo yy em função da vida do provete P25-3, P50-3 e P75-2 (direita) .....	37
Figura 4.7 Gráfico da média de deformação principal em função da vida dos provetes P1, P2 e P8 (esquerda) e gráfico da média de deformação sobre o eixo yy em função da vida dos provetes P1, P2 e P8 (direita).....	39
Figura 4.8 - Gráfico da percentagem média de deformação principal em função da vida dos provetes P P1, P2 e P8 (esquerda) e gráfico da percentagem média de deformação sobre o eixo yy em função da vida do provete P1, P2 e P8 (direita).....	40

Figura 4.9 - Representação da deformação principal do provete P25-1 criada pelo programa VIC3D®.....	43
Figura 4.10 - Representação da deformação principal do provete P50-2 criada pelo programa VIC3D®.....	44
Figura 4.11 - Representação da deformação principal do provete P25-3 criada pelo programa VIC3D®.....	45
Figura 4.12 - Representação da deformação principal do provete P50-3 criada pelo programa VIC3D®.....	46
Figura 4.13 - Representação da deformação principal do provete P75-2 criada pelo programa VIC3D®.....	47
Figura 4.14 – Representação da deformação principal dos provetes P25-1, P25-3, P50-2, P50-3, P75-1 e P75-2 criada pelo programa VIC3D® .....	48
Figura 4.15 - Representação da deformação dos provetes P1, P2, P3, P8 e P9 criada pelo programa VIC3D®.....	49



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades de diferentes tipos de fibras.....	7
Tabela 3.1 – Propriedades da resina epoxídica Biresin®CR122 com endurecedor CH122-3 .....	19
Tabela 3.2 - Dimensões e características dos provetes.....	21
Tabela 3.3 - Cargas e tensões aplicadas nos provetes .....	25
Tabela 4.1 - Valores do número de ciclos realizados por cada provete .....	29
Tabela 4.2 – Parâmetros de realização dos ensaios e resultados dos ensaios dos provetes pré-tensionados.....	30
Tabela 4.3 - Média de ciclos realizados por cada tipo de provete.....	30
Tabela 4.4 - Equações das linhas de tendência dos provetes P25-1, P50-2 e P75-1 .....	34
Tabela 4.5 Equações das linhas de tendência dos provetes P25-3, P50-3 e P75-2 .....	37
Tabela 4.6 - Parâmetros de realização dos ensaios e resultados dos ensaios dos provetes pré-tensionados.....	39
Tabela 4.7 - Equações das linhas de tendência dos provetes P1, P2 e P8 .....	40



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A_s$  – Área de superfície

$E$  – Módulo de Elasticidade

$F_{máx}$  – Força máxima

$F_{mín}$  – Força mínima

$F_m$  – Força média

$F_a$  – Força alternada

$N_f$  – Número de ciclos

$P$  – Carga

$R$  – Relação de tensões

$T_g$  – Temperatura de transição vítrea

$\Delta\sigma$  – Gama de tensão

$\varepsilon$  – Deformação

$\varepsilon_1$  – Deformação principal

$\varepsilon_{1med}$  – Valor médio da primeira deformação principal

$\varepsilon_{1i}$  – Valor inicial da primeira deformação principal

$\varepsilon_{yymed}$  – Valor médio da deformação na direção do eixo yy

$\varepsilon_{yy}$  – Deformação na direção do eixo yy

$\varepsilon_u$  – Deformação final

$\varepsilon_f$  – Deformação de rotura por fadiga

$\rho$  – Densidade

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_R$  – Tensão de rotura

$\sigma_a$  – Tensão alternada

$\sigma_m$  – Tensão média

$\sigma_{máx}$  – Tensão máxima

$\sigma_{min}$  – Tensão mínima

$\sigma_u$  – Tensão de rotura

$\emptyset$  - Diâmetro

## **Siglas**

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DIC – *Digital Image Correlation*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

UV – Ultravioleta





## 1. INTRODUÇÃO

Existem vários tipos de materiais a partir dos quais a indústria fabrica todo o tipo de componentes. Não havendo materiais cerâmicos, metálicos ou poliméricos que preenchessem a lista de características necessárias à extração de máximo potencial de um componente, foi necessário criar um tipo de material que apresentasse características de dois ou mais materiais de diferente natureza em simultâneo. Surgem os compósitos.

Usualmente resulta da mistura de apenas dois tipos de materiais, e apresenta qualidades mecânicas e químicas bastante melhores que as dos materiais que o constituem isolados. Os materiais compósitos aplicam-se em variados tipos de indústria, sendo que a indústria aeronáutica e naval são dos maiores utilizadores destes materiais.

De modo a obter um material leve e resistente em simultâneo, são criados materiais com uma matriz polimérica revestidos com fibras de cerâmicos ou metais, o que lhes garante a estrutura com resistência mecânica necessária para suportar cargas que naturalmente o polímero isolado não conseguiria.

Os materiais utilizados na indústria naval são sujeitos ao ambiente marítimo, que especialmente para metais é um ambiente bastante corrosivo. Deste modo foram criados materiais poliméricos reforçados com fibras que podem ser aplicados nesta indústria e apresentam não só resistência ao ambiente marítimo e às solicitações à qual os materiais estão sujeitos, como também durabilidade e baixo peso, o que torna o compósito uma opção bastante versátil para este ambiente hostil. Claramente que apesar de mais durabilidade e resistência, quando sujeitos a solicitações de fadiga os constituintes do material compósito acabam por se degradar.

### 1.1. Objetivo

Nesta dissertação é realizado um estudo da resistência à fadiga que um compósito laminado vidro/epoxídico sujeito a um ambiente marítimo durante 900 dias apresenta.

Inicialmente os 16 provetes utilizados neste estudo, com um furo central, foram sujeitos a testes de fadiga, sendo que destes, 9 foram sujeitos a uma pré-tensão.

Os testes foram todos realizados nas mesmas condições, com a mesma frequência de carga (10 Hz), embora com valores de carga diferentes.

Foi traçada uma curva S-N com os valores recolhidos dos ensaios aos provetes sem pré-tensão.

Todos os provetes foram observados com um sistema de correlação digital de imagem, VIC3D®, que captava imagens da zona em redor do furo e apresentava os deslocamentos e deformações ocorridos entre fotografias. Foram criados, com os valores obtidos no programa, gráficos com os valores de deformação em função do número de ciclos dos provetes selecionados.

Após obter todos os gráficos pretendidos, foi realizada uma comparação entre os valores obtidos neste estudo e noutro estudo semelhante com provetes não sujeitos ao ambiente corrosivo e sujeitos ao ambiente corrosivo durante 229 dias, realizado por Catarina Gonçalves [1].

## **1.2. Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos organizados da seguinte maneira:

- Introdução – Como o nome indica, apresenta sucintamente o que será descrito ao longo da dissertação;
- Estado da arte – Neste capítulo é apresentada uma pesquisa baseada em bibliografia escrita por outros autores acerca dos tópicos abordados nesta dissertação, tais como materiais compósitos, fadiga, comportamento de materiais compósitos sujeitos a ambientes hostis e correlação digital de imagem;
- Materiais e procedimento experimental – São apresentados os materiais dos provetes bem como a máquina utilizada para fatigar os mesmos, uma breve explicação de funcionamento do programa VIC3D® e os cálculos que permitiram selecionar as tensões desejadas;
- Resultados e discussão – Os resultados dos ensaios são apresentados em tabelas e analisados graficamente. Posteriormente são analisadas algumas das imagens captadas com o programa VIC3D®.



- Conclusão – São apresentadas as conclusões retiradas da discussão de resultados e propostos novos projetos.



## **2. ESTADO DA ARTE**

Serão apresentados neste capítulo conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico, bem como informações e conceitos relevantes à realização deste trabalho retirados da bibliografia.

Serão revistos quatro tópicos importantes no âmbito deste trabalho, com uma breve apresentação e descrição de cada um. Inicialmente será apresentado o que é um material compósito, seguido de uma abordagem ao conceito fadiga, uma análise a comportamento de materiais compósitos sujeitos a ambientes hostis e finalmente um meio de análise à integridade estrutural utilizando extensometria.

### **2.1. Materiais Compósitos**

Os materiais compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais, em que cada material que o constitui pode apresentar propriedades físicas, químicas e mecânicas diferentes. As propriedades do material compósito dependem das propriedades dos materiais que o constituem, bem como das suas percentagens no mesmo.

Estes materiais têm vindo a ser utilizados com inúmeros propósitos em várias áreas, devido à sua versatilidade e variedade, pois, estes, permitem uma grande variedade de combinações de materiais. Algumas destas áreas de aplicação são a construção civil (pontes, edifícios), indústria automóvel, naval, aeronáutica, e, até, biomédicas[2].

Embora sejam usados há milhares de anos, nas últimas duas décadas a sua utilização tem vindo a densificar-se devido à exigência do mercado de materiais com determinadas propriedades, as quais apenas os materiais compósitos podem apresentar[3].

#### **2.1.1. Composição e propriedades**

A maioria dos materiais compósitos resulta da combinação de dois constituintes; a matriz que geralmente apresenta alta ductilidade e baixa tensão de rotura, e engloba o segundo constituinte, que usualmente regula as propriedades finais do material. Assim, sendo a matriz a fase contínua de um compósito, é usual classificar os materiais compósitos consoante o seu tipo de matriz: polimérica, metálica ou cerâmica. Nesta dissertação serão

abordados os compósitos de matriz polimérica dado que serão utilizados no desenvolvimento deste estudo.

Relativamente ao segundo constituinte é usual classificar os materiais compósitos em compósitos reforçados com partículas e compósitos reforçados com fibras. Nos compósitos reforçados com fibras surgem os laminados, que serão alvo deste trabalho. Nestes, o volume e a orientação das fibras influencia o comportamento do material [2].

Uma característica de relevância nestes materiais é o baixo rácio de peso/força. Outras propriedades são: alta resistência à corrosão, fadiga, impacto, desgaste e deformação, baixa condutividade elétrica e térmica [3] relativamente a outros tipos de materiais.

#### **2.1.1.1 Compósitos de matriz polimérica**

Sendo o tipo de compósitos mais utilizado no mercado, estes apresentam uma baixa densidade devido ao peso específico das resinas e das fibras de reforço. Têm uma boa resistência a ambientes quimicamente agressivos e a oscilações acentuadas do clima no qual estão inseridos. São considerados também facilmente adaptáveis a qualquer forma de molde, o que aumenta o número de aplicações para este tipo de compósito. Algumas fibras de reforço destes materiais são a fibra de vidro, fibra de aramido ou até fibra de carbono. A matriz do compósito pode ser termoplástica ou termoendurecível, sendo que a primeira tem processo de reutilização enquanto a segunda, após cura do material, não permite reutilização.

#### **2.1.1.2 Tipos de fibras**

Há três tipos principais de fibras no mercado, sendo estas fibra de vidro, fibra de aramido e fibra de carbono. De acordo com a Tabela 2.1 as duas últimas apresentam as melhores propriedades, contudo o seu elevado preço torna a escolha da fibra de vidro mais apelativa na maioria das aplicações.

Tabela 2.1 - Propriedades de diferentes tipos de fibras [4].

Propriedade	Vidro E	Carbono	Kevlar® 49
Resistência à tração [MPa]	2410	3100	3617
Módulo de elasticidade em tração [GPa]	69	220	124
Alongamento na rotura [%]	3,5	1,40	2,5
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	2,54	1,75	1,48

Dentro das fibras de aramido, existem o Kevlar® 29 e o Kevlar® 49. Ambas apresentam elevada resistência mecânica e baixa densidade, com a distinção de que o tipo 49 apresenta um elevado módulo de elasticidade, e constitui o reforço de algumas matrizes poliméricas, sendo amplamente aplicada nas indústrias automóvel, marítima e aeroespacial. O tipo 29 encontra-se presente em proteção balística e em alguns tipos de cabos, entre outros.

As fibras de vidro podem ser compostas pelo denominado vidro E, um tipo de vidro com uma resistência à tração de cerca de 2 GPa, cerca de metade do valor da resistência à tração do vidro S (4 GPa), contudo ambos apresentam o mesmo valor de rigidez, 69 GPa. O último apresenta um custo mais elevado que o vidro E, e encontra-se, em geral, em aplicações de elevado valor acrescentado, nomeadamente os setores militar e aeroespacial [4].

As fibras podem ser orientadas de três maneiras diferentes: contínuas unidirecionais; descontínuas e orientadas de modo aleatório; unidirecionais tecidas ortogonalmente, mais conhecidas como tecidos.

Para este trabalho foram utilizados compósitos reforçados com fibras de vidro E.

### 2.1.2. Tipos de dano

Os mecanismos de dano podem ocorrer na matriz, no reforço, ou em ambos. O dano pode ser causado no fabrico ou pela utilização e solitação do material. Relativamente

ao dano induzido durante o fabrico, as falhas podem ocorrer durante o empilhamento da matriz ou durante o processo de cura [5]. Os mecanismos de dano por fadiga podem ser:

- Rotura da matriz;
- Fissuração da fibra;
- Delaminação;
- Separação da fibra da matriz.

#### **2.1.2.1 Rotura da matriz**

Usualmente é o primeiro dano a ocorrer no compósito. Na ocorrência deste mecanismo completa ou parcialmente, o material está em risco de apresentar rotura total. É provocada pelas cargas cíclicas, uma vez que a oscilação de carga (e até inversão de carga, no caso de tração/compressão) solicita primeiramente a própria matriz.

Um dos problemas mais graves causados pela rotura da matriz, para além da deterioração da própria matriz, é a exposição da fibra ao ambiente, que acelera o processo de deterioração da matriz, principalmente se o compósito se encontrar num ambiente corrosivo [1,6].

#### **2.1.2.2 Fissuração da fibra**

É das falhas mais graves que ocorrem no compósito, uma vez que as fibras conferem a maioria da resistência ao compósito. Este mecanismo de falha é acionado pelos esforços de tração (quando a tensão máxima admissível do material é atingida) e pelos esforços cortantes entre a matriz e a fibra, é irreversível e torna o compósito não reutilizável [1,6].

#### **2.1.2.3 Delaminação**

É mais facilmente desenvolvido e notado em laminados com várias camadas e com orientações de fibras diferentes. Este mecanismo de falha é formado após a propagação de uma fenda por todas as camadas, pelo que se considera dependente da rotura da matriz. Há dois tipos principais de delaminação, dependendo do tipo de carregamento: abertura de fenda e corte. O primeiro ocorre quando o material é tracionado, enquanto o segundo ocorre quando o material é sujeito a esforços cortantes. As solicitações estão representadas na figura 2.1[7] pelo *Mode I* (Tração) e *Mode II e III* (esforços cortantes), respetivamente [1,6].

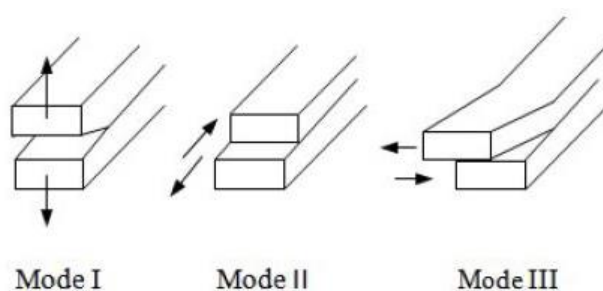


Figura 2.1 - Representação dos dois tipos principais de delaminação.

#### 2.1.2.4 Separação da fibra da matriz

Na situação de ter uma fraca ligação entre a fibra e a matriz, pode ocorrer a separação entre ambas. Esta traduz-se numa abertura de fenda paralela à orientação da fibra. Este tipo de falha é causado pela obtenção da deformação elástica máxima, devido aos valores elevados das cargas aplicadas [1,6].

## 2.2. Fadiga

A fadiga é um modo de ruína de materiais, considerado o mais importante em órgãos de máquinas uma vez que ocorre em cerca de 80% a 90% das peças em serviço. É causada por cargas dinâmicas ao longo de vários ciclos, provocando abertura de fendas no material e posterior fratura. O carregamento, como se esquematiza na figura 2.2 [8], podem ser de tração, torção, compressão e flexão.

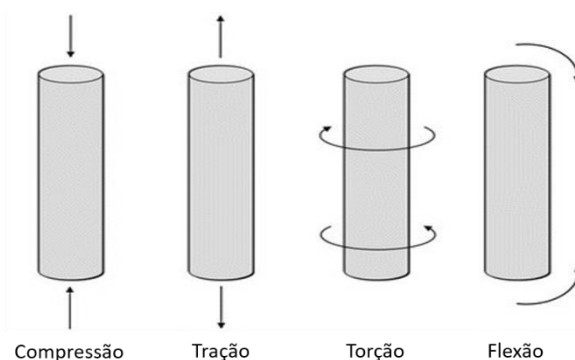


Figura 2.2 – Representação das diferentes cargas dinâmicas de fadiga.

A rotura por fadiga caracteriza-se por apresentar três fases principais: o período de nucleação e iniciação da fenda, que consiste na nucleação de fendas e no seu crescimento microscópico; posteriormente, a fase de propagação da fenda, na qual ocorre, como o nome indica, a propagação estável das fendas criadas inicialmente; e a rotura final, que ocorre quando a secção da peça deixa de ser suficiente para suportar o carregamento aplicado.

Os materiais compósitos são selecionados para as mais variadas aplicações, pelo que podem ser sujeitos a todos os tipos de cargas, estáticas ou dinâmicas, em ambientes corrosivos e temperaturas extremas. Sendo heterogêneos e ortotrópicos, o comportamento de dano dos compósitos reforçados com fibra de vidro é bastante complexo para analisar, pelo que ainda não há nenhum modelo preciso e definido para calcular ou prever a sua vida à fadiga [9].

### **2.2.1 Variáveis influentes**

Os resultados dos ensaios de fadiga, usualmente, apresentam grande dispersão uma vez que dependem de vários fatores tais como: dimensões do provete; tipo de carregamento; processo de fabrico; microestrutura; geometria da peça; acabamento superficial e nível de defeitos do material. Esta combinação complexa pode ter uma influência significativa na vida final dos componentes sujeitos a cargas cíclicas.

No caso específico dos materiais compósitos, a vida à fadiga de um componente está também dependente de vários fatores, nomeadamente: o material da matriz; as frações volúmicas de cada componente; a orientação das fibras; a humidade no material; a porosidade do material; a temperatura de operação; a frequência e intensidade da carga cíclica [10].

Outro fator que se deve considerar nas solicitações durante os testes de fadiga é a frequência do ciclo de carga, a qual deve ser suficientemente baixa para evitar um aquecimento do material. As fibras de vidro são bastante suscetíveis a humidade, o que pode implicar aumento de defeitos na sua superfície, e conseqüentemente alterações comportamentais do material [11–13]. Devido às variações de composição destes materiais, a determinação da vida à fadiga é um problema complexo.



De acordo com uma análise de *Samborsky* [14], a vida à fadiga varia com a fração volúmica da fibra. O aumento desta implica um incremento no contacto entre fibras, o que, de um modo geral, causa uma diminuição na resistência à fadiga.

### 2.2.2 Modelos de previsão e de comportamento à fadiga

Como referido anteriormente, é bastante difícil prever o comportamento de um material compósito à fadiga, contudo há alguns modelos que permitem estimar, de forma aproximada, o comportamento do material.

De modo a poder distinguir diferentes modelos de fadiga de compósitos laminados, *Degrieck* e *Van Paepegem* [15] dividiram os modelos de comportamento à fadiga em três tipos diferentes: modelo de vida à fadiga macroscópica (curvas S-N); modelo de resistência e rigidez residual; e modelo de danos progressivos [10].

É possível obter um valor de dano no material através da medição de alterações nas propriedades do mesmo, tais como a resistência e a rigidez residuais e até da própria vida do material. Assim, um modelo baseado na degradação da rigidez do compósito, a qual pode ser medida e interpretada facilmente, é proposto por *Whitworth* [16] tendo em consideração uma relação entre a vida à fadiga e a rigidez residual através da seguinte equação:

$$\frac{dE(N)}{dN} = -E(0)QvN^{v-1} \quad (1)$$

onde  $E(0)$  representa a rigidez inicial,  $N$  representa o número de ciclos à fadiga e  $Q$  e  $v$  são parâmetros que podem ser aproximados através da equação  $Q = a_1 + a_2v$  na qual  $a_1$  e  $a_2$  são constantes dependentes do material.

Integrando a equação (1) obtém-se uma de degradação da rigidez que toma a seguinte forma:

$$1 - \frac{E(N)}{E(0)} = \frac{a_1 + a_2v}{f^v} (N^v - 1) \quad (2)$$

Uma vez que não é possível obter a rigidez de falha ( $E(N)$ ) até ocorrer a rutura do provete, para substituir o seu valor, é introduzido um critério de deformação até à ocorrência desta. Este critério baseia-se nos seguintes pressupostos:

- (i) se a curva tensão-deformação do ensaio do provete se mantém linear até à rutura, a rigidez do provete pode ser determinada com a equação

$$E(0) = \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} \quad (3)$$

onde  $\sigma_u$  representa a tensão de rotura e  $\varepsilon_u$  representa a deformação no momento de rotura;

- (ii) se a curva tensão-deformação do ensaio do provete se mantém linear durante os ciclos de fadiga, então a rigidez de rotura pode ser escrita como

$$E(N) = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_f} \quad (4)$$

onde  $\sigma_{max}$  representa a tensão máxima aplicada e  $\varepsilon_f$  representa a deformação de rotura por fadiga.

Uma vez que a rotura ocorre quando a deformação por fadiga iguala o valor da deformação final ( $\varepsilon_f = \varepsilon_u$ ), podemos deduzir uma equação que relaciona os dois valores de rigidez que com modificações para contabilizar efeitos não lineares [17] adquire a seguinte forma:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_u} = b_1 \left[ \frac{E(N)}{E(0)} \right]^{b_2} \quad (5)$$

onde  $b_1$  e  $b_2$  são constantes resultantes de ensaios. Tem-se assim o critério de falha por deformação.

Aplicando este critério à equação (2) tem-se uma equação que permite avaliar e prever em média a vida à fadiga de materiais compósitos reforçados com fibras:

$$1 - \left( \frac{\sigma_{max}}{b_1 \sigma_u} \right)^{\frac{1}{b_2}} = \frac{a_1 + a_2 v}{f^v} (N^v - 1) \quad (6)$$

na qual  $v$  depende da tensão máxima aplicada,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , da razão de tensões,  $R$ , e da frequência,  $f$ . Na expressão anterior, a porosidade do material e a temperatura são consideradas constantes.

Uma vez que os parâmetros referidos acima são os que controlam o comportamento do material no ensaio,  $v$  pode ser escrito da forma seguinte:

$$v = A_1 * H(R, \sigma_{m\acute{a}x}, \sigma_u) \quad (7)$$

onde  $A_1$  é uma constante tabelada para o tipo de material. Deve, ainda, referir-se que os valores de  $R$  e  $\sigma_{m\acute{a}x}$  afetam não-linearmente os valores de vida à fadiga do material, Sendeckyj [18] e Hertzberg [19] definiram  $H$  através da seguinte expressão:

$$H(R, \sigma_{m\acute{a}x}, \sigma_u) = \sigma_u^{1-\alpha} * \sigma_{m\acute{a}x}^{\alpha} (1 - R)^{\alpha} \quad (8)$$

na qual  $\alpha$  é uma constante com equação dada por

$$\alpha = 1.6 - \psi \sin \theta \quad (9)$$

onde  $\theta$  é o menor ângulo entre a orientação da fibra e a direção de carregamento.  $\Psi$  assume o valor de  $R$  se este for inferior a 1, caso contrário assume o valor  $1/R$ .

Tem-se uma equação de  $v$  escrita:

$$v = A_1 * \sigma_u \left( \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_u} (1 - R) \right)^{1.6 - \psi \sin \theta} \quad (10)$$

Uma vez que os valores de  $\sigma_u$ ,  $R$ ,  $\theta$  e  $\psi$  para o material que esteja em ensaio são conhecidos, o valor de  $v$  torna-se função de  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , pelo que a expressão da vida à fadiga assume o formato logarítmico:

$$\text{Log}N = \frac{1}{v} \log \left\{ \frac{1 - \left( \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{b_1 \sigma_u} \right)^{\frac{1}{b_2}}}{a_1 + a_2 v} * f^v + 1 \right\} \quad (11)$$

sendo os valores de  $A_1$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  e  $b_2$  parâmetros característicos do material e que podem ser obtidos através de ensaios experimentais [10].

### 2.2.3 Métodos de monitorização e registo de dados

Os métodos de registo e monitorização de danos causados por fadiga dividem-se em duas categorias: monitorização das fissuras por fadiga, que tem início aquando da formação da fissura, e monitorização de degradação por fadiga, que toma o lugar antes da formação da fissura. Alguns destes métodos podem ser emissão acústica, testes de dureza da superfície, ultrassónicos, magnéticos ou de queda de potencial, estudos de difrações de raios-X e aniquilação de positrões. Apesar de serem todos adequados ao estudo do comportamento dos metais, o método das emissões acústicas, o método ultrassónico e as difrações de raios-X são também apropriados ao estudo do comportamento dos compósitos [20].

Relativamente a monitorização das fissuras, alguns dos métodos que podem ser usados são:

- Técnica das emissões acústicas, que consiste em medir as ondas acústicas de tensão causadas por picos de energia libertados pelo material de uma fonte localizada devido à tensão aplicada no mesmo. Estes picos de energia podem ser libertados devido a deformação

plástica, nucleação das fissuras e a sua propagação, fratura e separação de componentes do material [21][22];

- Métodos ultrassónicos, que consistem em enviar ondas ultrassónicas na direção do material em ensaio com utilização de transdutores, as quais vão ser refletidas ou difratadas quando encontram descontinuidades no mesmo. Através da análise à velocidade do som no material pode ser localizado e dimensionado o tamanho da fissura [23];
- Queda de potencial elétrico, é um método se envia uma corrente elétrica pelo material, medindo-se as quedas de potencial em zonas específicas onde é espectável a existência de fissuras. É utilizado tanto ao longo do tempo ensaio como instantaneamente para monitorizar a fissura instantaneamente. Esta técnica permite monitorização do potencial e possibilita a sua calibração para diferentes cenários [20][24].

Para a monitorização da degradação do material que ocorre antes da fissuração, alguns dos métodos utilizados são:

- Testes de dureza da superfície, baseados na teoria de que a degradação causada por fadiga até à iniciação da fissura tem influências na dureza da superfície do material em ensaio.
- Métodos magnéticos, que se aplicam a materiais ferromagnéticos, com a premissa de que há uma forte relação entre o processo de magnetização do material e a microestrutura [25], uma vez que a magnetização ocorre através do movimento das paredes de domínio no material, o que será afetado consoante as características microestruturais.
- Difração de raios-X, que consiste em bombardear com um feixe de radiação o provete e estudar a difração e intensidade dos feixes refratados. Esta técnica é aplicada para determinar tensões residuais macroscópicas, densidades de deslocações, ou micro-deformações.
- Aniquilação de eletrões, que consiste na projeção de um feixe de positrões sobre o material, permitindo através da análise da

espectroscopia a obtenção do tempo de aniquilação e a distribuição de energia pelos dois fótons resultantes da colisão de cada um dos pósitrons.

- Métodos ultrassônicos de monitorização de degradação, que diferem em análise dos métodos ultrassônicos para monitorização de fissuras. Uma vez que o método não é sensível o suficiente para detetar diretamente defeitos microestruturais iniciais, uma vez que estes são menores que os comprimentos de onda dos ultrassons [26], é analisada a atenuação, velocidade e harmónicas secundárias para caracterizar a degradação microestrutural [20].

Para além destes métodos mencionados, que se baseiam no registo e análise de dados gráfica e matematicamente, também existem métodos visuais para análise do efeito do fenómeno de fadiga em provetes, os quais serão discutidos a seguir.

### **2.3. Comportamento de materiais compósitos sujeitos a ambientes hostis**

Quando sujeitos a ambientes corrosivos, por norma a maioria dos materiais tendem a perder resistência mecânica, uma vez que a exposição do material a agentes químicos, físicos ou mecânicos ou todos em simultâneo os podem degradar irreversivelmente. Podem ocorrer danos na matriz, no reforço ou em ambos. Ambientes aquáticos salinos são considerados corrosivos, nos quais ocorrem fenómenos de fotólise ou foto-oxidação [27].

A fotólise consiste na dissociação de moléculas por efeito de luz ou radiação ultravioleta que causa a insaturação do polímero presente no compósito.

A foto-oxidação consiste na redução do peso molecular do polímero resultado do contacto com oxigénio ou ozono, sendo o processo catalisado através de radiação ultravioleta, altas temperaturas e concentrações de tensão localizadas. Este processo, tal como todos os processos de corrosão, fragilizam o material, reduzindo a resistência às solicitações mecânicas do mesmo. Visualmente, é fácil identificar o resultado da foto-oxidação uma vez que o material fica descolorado e ganha rugosidade, como se observa na Figura 2.3. Neste processo são gerados aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos devido à existência de grupos cromóforos nas macromoléculas, os quais absorvem raios UV.



**Figura 2.3 – Efeitos da foto-oxidação numa corda de polímeros-  
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Foto-oxidação> 2021.**

Os processos de degradação que envolvem luz UV normalmente ocorrem quando as fibras estão diretamente expostas ao ambiente [28], pelo que se estas estiverem isoladas pela matriz o processo de degradação pode ser mais demorado. O processo de degradação do material causados pela radiação UV pode ser acelerado pela poluição da atmosfera em redor do material compósito.

Para além da radiação UV, a humidade, a temperatura e os meios ácidos/alcalinos contribuem também para a degradação das fibras. O dano causado num material compósito devido à água e humidade no compósito é causado pelo contacto direto com estas, que chegam ao interior do material por meio das fibras, da natureza hidrófila das matrizes, por poros existentes na matriz ou até por aberturas no material causadas pelas condições de serviço.

A presença de água também pode promover o descolamento da interface fibra/resina devido ao contacto com substâncias presentes na superfície da fibra. Assim, a degradação dos constituintes individuais por junção das suas moléculas com as de água e a sua separação geram a perda de resistência do compósito [29]. Um dos fatores que influencia a capacidade de absorção da água por parte do material é a polaridade do material em relação à água, uma vez que quanto maior for a polaridade da matriz, maior a sua capacidade de absorção. Posto isto, adição de elementos reativos não-polares ao material conduz a uma redução na absorção da água e consequentemente a um aumento da resistência do material [30–32]. Outro fator que condiciona a capacidade de absorção de água no compósito é a configuração molecular da resina, uma vez que pode haver estruturas mais ou menos compactas que proporcionam, respetivamente, maior ou menor absorção de água por parte do compósito, permitindo que a água se aloje nos interstícios da estrutura [27].

A humidade à qual o compósito está sujeito pode facilitar o aparecimento de bactérias e fungos que danifiquem o material compósito, reduzindo a sua resistência. Tal como influenciam a penetração da água, a estrutura cristalina das moléculas do material também influencia a entrada de humidade no material, sendo facilitada quando o material tem um arranjo menos compacto. Ao penetrar no material, a humidade cria tensões internas que quando excedem as forças de ligação da matriz provocam fissuras no material e, inclusive, na sua superfície, o que leva à entrada de água no compósito, afetando as propriedades mecânicas [33,34].

As oscilações na temperatura também fazem parte dos fatores que influenciam a vida dos compósitos, uma vez que a maioria dos materiais são utilizados em ambientes variados. A diferença nas propriedades dos componentes usados nos materiais compósitos, nomeadamente nos coeficientes de expansão térmica, gera tensões internas quando há alterações térmicas que quando superiores à resistência mecânica do material criam fissuras no material, fragilizando-o, podendo facilitar a entrada de água e de humidade [35]. Outro problema que advém do facto de o material estar sujeito a uma grande variedade de temperaturas é quando o compósito é sujeito a temperaturas de serviço próximas da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ): uma vez que os polímeros perdem muitas das suas propriedades quando atingem a  $T_g$ , o compósito é também afetado quando é sujeito a temperaturas dessa ordem, ficando com propriedades físicas e mecânicas inferiores, o que afeta o seu comportamento mecânico e à fadiga [30].

## **2.4. Correlação digital de imagem (DIC)**

Como foram apresentados no subcapítulo 2.2, há vários métodos de análise e visualização do desenvolvimento do dano por fadiga num material. Um dos métodos existentes não mencionados nesse subcapítulo é a correlação digital de imagem tridimensional (DIC 3D). Este é mencionado separadamente e com maior detalhe, neste subcapítulo, por ser o método utilizado nesta dissertação.

Inventado nos anos 80 [36], a DIC é um método ótico fiável, fácil de utilizar e é realizado sem necessidade de contacto com o provete aquando da recolha de dados. Tendo uma vertente de medição em 3D, a tecnologia pode ser utilizada para medir a forma, deslocamento e deformação de superfícies planas e não planas [37,38] sujeitas a cargas

externas em diferentes escalas, o que a torna versátil e apta para caracterizar mais tipos de provetes [39].

A DIC pode ser realizada apenas com uma câmara, obtendo-se uma imagem a duas dimensões (2D) que permite apenas medir deformações de provetes planos. Se se optar por utilizar duas câmaras, obtém-se uma análise a três dimensões (3D) que permite observar deslocamentos nos três eixos, podendo analisar assim as superfícies não planas, como referido anteriormente.

O método permite seguir o campo de micro movimentos da superfície do provete através de várias imagens tiradas com um intervalo de tempo normalmente constante. Utilizando um software próprio, é depois possível aplicar algoritmos de correlação de imagem de modo a mapear uma imagem da superfície do provete. O mapeamento requer um padrão de manchas aleatório que pode ser pintado ou pode ser natural do material, embora esta opção seja pouco usual. Este tem que exibir necessariamente um grande contraste e pode ser pintado com tinta comum, desde que esta não interfira com as características do material. A tinta utilizada não deve ser brilhante, uma vez que esta pode interferir com a luz e causar o mau funcionamento do programa [40].

Através do padrão na superfície do provete são definidas zonas de análise compostas por vários pixéis (*subsets*) que posteriormente serão processadas e analisadas. Estas zonas podem ser de diferentes tamanhos, contudo quanto maior a sua dimensão, menor será a resolução. É através destes *subsets* que a translação, rotação e deformação são determinados pelo algoritmo do programa. Os *subsets* das imagens são comparados com *subsets* fixos da imagem de referência, calculando os valores de deslocamento de cada *subset* e assim é criado o campo de deslocamentos e o campo de deformações da superfície do provete [40].

As manchas podem variar de tamanho, contudo não podem ser demasiado grandes, havendo o risco de um *subset* ficar inteiramente numa mancha e impedindo o algoritmo de efetuar a correspondência com os outros *subsets* [40].



### 3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será feita uma abordagem dos materiais utilizados nesta dissertação e ao procedimento experimental para obtenção dos principais resultados

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Provetes

Foram produzidas placas a partir de um tecido bidirecional de fibra de vidro de 1195P (195 g/m<sup>2</sup>) e uma resina epoxídica Biresin® CR122 com endurecedor Biresin® CH122-3 com uma dimensão de 330 × 330 mm<sup>2</sup>. Foi adicionado 30% do peso da resina em endurecedor de acordo com as indicações do fabricante. Os produtos da Biresin® foram fornecidos pela Sika e apresentam as propriedades indicadas na tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Propriedades da resina epoxídica Biresin®CR122 com endurecedor CH122-3 [1].**

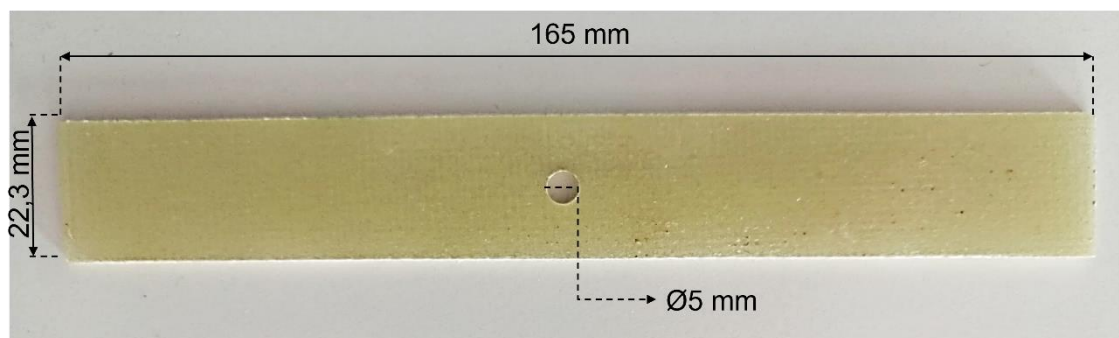
Propriedade	Resina Biresin® CR122 com endurecedor CH122-3
$\rho$	1170 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_R$	84 [MPa]
$E$	2800 [MPa]
$\varepsilon$	5,8 [%]
Resistência à flexão	129 [MPa]
Resistência ao impacto	47 [kJ/m <sup>2</sup> ]
$T_g$	114 [°C]

As placas foram colocadas em vácuo durante cerca de 4 horas, de modo a eliminar quaisquer bolhas de ar existentes no material e, simultaneamente, foi-lhes aplicada uma carga de 2,5 kN durante 12 horas utilizando uma prensa, com objetivo de manter uma fração de fibra e de espessura do laminado constante. De acordo com a ficha técnica do fabricante a pós-cura foi realizada a 60°C durante 8 horas.

Obtiveram-se laminados com uma média de 2,3 milímetros de espessura, constituídos por 12 camadas, com uma orientação de fibras com a sequência [0°, 45°, 90°, 45°, 0°, 90°]s. Em seguida foram todos retificados através de fresagem, para apresentarem

secções com área igual. Posteriormente, as placas foram cortadas com peças com forma retangular de dimensões médias de  $165 \times 22,3 \text{ mm}^2$  e perfurados, em simultâneo, em séries de 12 provetes, tentando garantir homogeneidade dimensional dos furos. Inicialmente foi preparada a zona de furação com uma broca mais fina e, posteriormente, foi utilizada uma broca de maior diâmetro para finalizar a maquinação. Os provetes nas extremidades da série foram descartados de modo a garantir que não continham mais defeitos que os do centro da série.

Na figura 3.1 é apresentado o provete, com a forma retangular e com um furo de 5 mm de diâmetro no seu centro para criar uma zona de concentração de tensões e, assim, ser possível analisar o efeito da presença do furo na vida útil do provete. O peso médio dos provetes após maquinação era cerca de 13,74g. Após maquinação, todos os provetes foram imersos num ambiente aquático salino durante 900 dias



**Figura 3.1 - Provede de resina epoxídica reforçado com fibra de vidro.**

Foram medidos os valores de largura e espessura dos provetes em três pontos diferentes dos mesmos e, posteriormente, foi calculado o valor médio. Estas medidas diferiam milimetricamente de provete para provete, os valores considerados em cada caso são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dimensões e características dos provetes.

Provete	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área de Superfície na zona de corte do furo (mm <sup>2</sup> )	Pré-tensão
P1	21,97	2,29	40,18	-
P2	21,97	2,29	40,18	-
P3	21,97	2,29	40,18	-
P5	21,97	2,29	40,18	-
P7	22,40	2,37	41,30	-
P8	22,47	2,36	41,18	-
P9	22,48	2,27	39,67	-
P25_1	21,97	2,29	40,18	25%
P25_2	22,50	2,11	36,93	
P25_3	22,39	2,24	38,95	
P50_1	22,44	2,33	40,64	50%
P50_2	22,52	2,45	42,92	
P50_3	22,46	2,17	37,89	
P75_1	22,40	2,13	37,06	75%
P75_2	22,44	2,03	35,40	
P75_3	22,44	2,21	38,54	

A denominação dos provetes sujeitos a pré-tensão inclui o valor da mesma, tendo PXX\_Y no qual XX representa o valor de percentagem de pré-tensão e Y o número do provete.

Após a imersão, por um período de 900 dias, os provetes foram pesados novamente e registou-se um incremento médio de massa de aproximadamente 1,04%, passando a massa média dos provetes para 13,88g depois deste período.

Em seguida todos os provetes selecionados para análise com o programa de correlação digital de imagem foram pintados de branco e salpicados com tinta preta para criar o padrão *speckle*, ficando como apresentado na seguinte figura 3.2:



Figura 3.2 – Provete de resina epoxídica reforçado com fibra de vidro com padrão *speckle*.

### 3.1.1 Máquina de Fadiga

A máquina utilizada para submeter o provete à fadiga foi uma INSTRON® 1341 servo-hidráulica com uma célula de carga com 100 kN de capacidade máxima, apresentada na figura 3.3.



Figura 3.3 - INSTRON 1341.

### 3.1.1 Correlação digital de imagem

As análises do campo de deslocamento e de campo de deformação na região do furo foi efetuada com a técnica de correlação de imagem digital (DIC) com ajuda de duas câmaras de alta velocidade Point Grey Grass 2054M-C, com resolução máxima de 1624x1224 pixels. Estas foram fixadas simetricamente numa calha com um ângulo de captação na ordem dos 45°, como está representado na figura 3.4, e posteriormente foram calibradas com ajuda de uma placa com uma pintura pontilhada em grade 9x9.

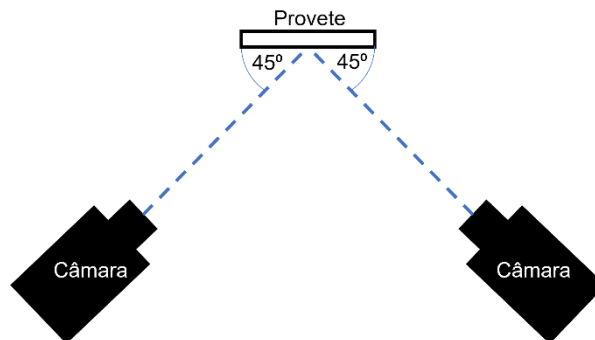


Figura 3.4 - Esquema do setup do DIC.

O sistema foi ligado a um computador com o software de correlação de imagem, VIC3D® da Correlated Solutions®, e o software Vic-Snap® que permitem captar imagens das duas câmaras em simultâneo e avaliar as deformações no provete. O sistema encontra-se na figura 3.5:

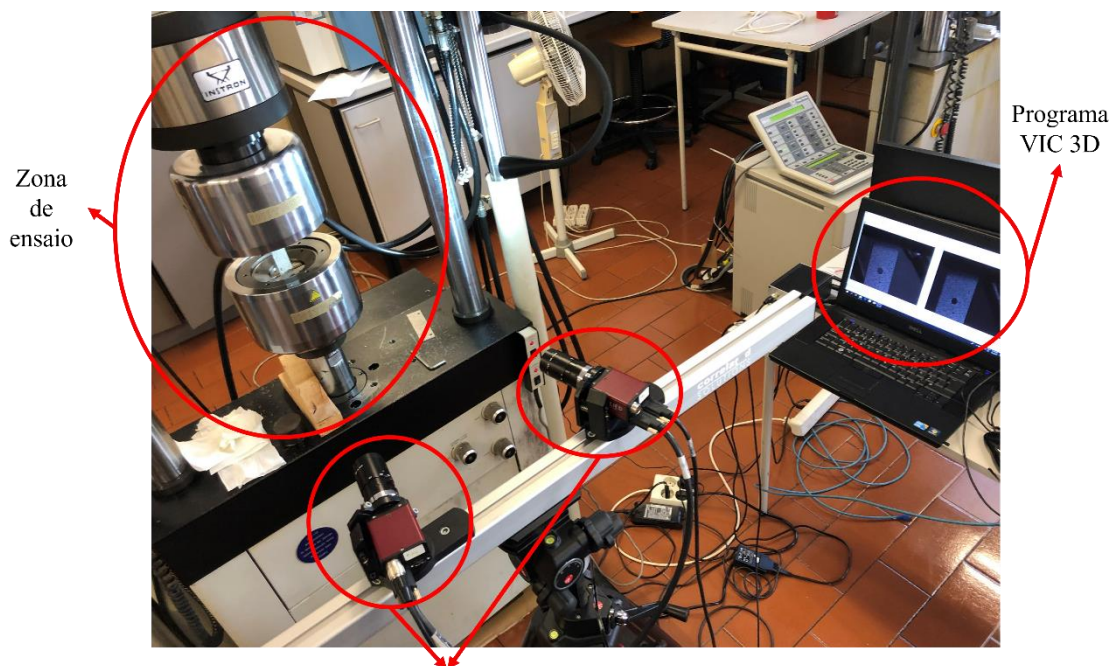


Figura 3.5 - Setup do programa VIC3D®.

### 3.2 Ensaio de fadiga

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente com uma razão de tensões  $R = 0,1$ . Uma vez que o rápido movimento do provete poderia provocar aquecimento dos provetes e alterar as propriedades das fibras ou da matriz, foi utilizada uma frequência cíclica de 10 Hz. Todos os ensaios foram efetuados seguindo as recomendações da norma ASTM D3479 (2012).

A carga ( $P$ ) foi definida de modo a ter os valores desejados de tensão aplicada no provete, com base na equação (12):

$$\sigma = \frac{P}{A_s} \quad (12)$$

sendo  $A_s$  o valor área da secção transversal na latitude do furo no provete.

Após a seleção do valor máximo para a carga  $P$ , que corresponde à força máxima ( $F_{máx}$ ), procedeu-se ao cálculo da força mínima ( $F_{mín}$ ), da força média ( $F_m$ ) e da força alternada ( $F_a$ ), através das equações (12), (13) e (14), respetivamente.

$$F_{mín} = F_{máx} * R \quad (13)$$

$$F_m = \frac{F_{máx} + F_{mín}}{2} \quad (14)$$

$$F_a = \frac{F_{máx} - F_{mín}}{2} \quad (15)$$

Com base nas equações (13-15) foram selecionados os seguintes valores para os provetes, apresentados na tabela 3.3:

**Tabela 3.3 - Cargas e tensões aplicadas nos provetes.**

Provete	F <sub>máx</sub> (N)	F <sub>mín</sub> (N)	F <sub>alternada</sub> (N)	F <sub>média</sub> (N)	$\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\sigma_{máx}$ (MPa)
P1	4700	470	2115	2585	52,6	64,3	116,9
P2	5500	550	2475	3025	61,6	75,3	136,9
P3	4875	487,5	2193,8	2681,3	54,6	66,7	121,3
P5	5500	550	2475	3025	61,6	75,3	136,9
P7	5653	565,3	2543,9	3109,2	61,6	75,3	136,9
P8	4176	417,6	1879,2	2296,8	45,6	55,8	101,4
P9	4641	464,1	2088,5	2552,6	52,6	64,3	116,9
P25_1	5500	550	2475	3025	61,6	75,3	136,9
P25_2	5500	550	2475	3025	67,0	81,9	148,9
P25_3	5332	533,2	2399,4	2932,6	61,6	75,3	136,9
P50_1	5563	556,3	2503,4	3059,7	61,6	75,3	136,9
P50_2	5876	587,6	2644,2	3231,8	61,6	75,3	136,9
P50_3	5187	518,7	2334,2	2852,9	61,6	75,3	136,9
P75_1	5073	507,3	2282,9	2790,2	61,6	75,3	136,9
P75_2	4846	484,6	2180,7	2665,3	61,6	75,3	136,9
P75_3	5276	527,6	2374,2	2901,8	61,6	75,3	136,9

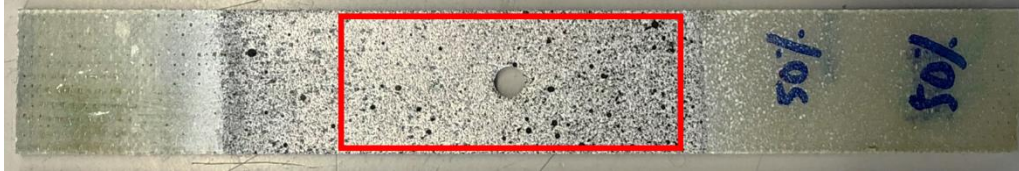
Os valores de tensão alternada ( $\sigma_a$ ), tensão média ( $\sigma_m$ ) e tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ) resultam da substituição do valor da carga  $P$  na equação (12) pelos valores de força alternada, força média e força máxima obtidos nas equações (13-15), considerando para cada provete a respetiva área útil da secção transversal.

### 3.3 Recolha e processamento de dados

No início do ensaio era aplicada a carga máxima ao provete e era captada uma imagem para avaliar o campo de deformação para a carga máxima.

Após o início do ensaio e a respetiva monitorização, foram extraídos com ajuda do programa VIC3D® os valores correspondentes à deformação principal, deformação sobre a direção de sollicitação ( $\epsilon_{yy}$ ) e deslocamentos ocorridos na superfície do provete, na zona em redor do furo.

A zona de análise apresenta-se delineada pelo retângulo vermelho representado na figura 3.6:



**Figura 3.6 - Zona de análise do provete.**

As observações eram feitas periodicamente: era pausada a aplicação de cargas cíclicas no provete, a carga máxima era então aplicada ao mesmo e era captada a imagem do provete.

Foram então exportados para o programa Microsoft Excel® os valores essenciais ao projeto e executa-se uma análise numérica e gráfica aos mesmos.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos testes ao material e da recolha de dados, de acordo com o procedimento experimental descrito no capítulo 3, neste capítulo procede-se à sua apresentação e análise.

### 4.1. Curvas S-N (Tensão-Vida)

As curvas S-N serão utilizadas para representar os resultados dos testes de fadiga realizados a provetes com as mesmas características. Estas curvas permitem apresentar a tensão aplicada em função do número de ciclos realizados até à rotura do provete ou à chegada de um limite estipulado de ciclos, assumindo vida infinita neste último caso. No eixo das abcissas são apresentados os valores do número de ciclos suportados pelos provetes, enquanto no eixo das ordenadas está contida a informação da amplitude de tensão utilizada nos respetivos provetes.

Após registados os valores de todos os testes no gráfico e obtida a curva S-N, extrai-se a equação da linha de tendência característica da curva, a qual pode assumir diferentes aproximações. Neste caso foi selecionada uma linha de tendência de potência:

$$y = a * x^b \quad (16)$$

Na qual os valores de y e x correspondem, respetivamente, a tensão alternada ( $\sigma_a$ ) e ao número de ciclos completos pelo provete ( $N_f$ ). Os coeficientes a e b são constantes do gráfico de cada curva. O valor de  $R^2$  obtido representa a aproximação dos valores em relação à linha de tendência e varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo deste último melhor.

Com os resultados dos provetes imersos durante 900 dias foi possível obter uma equação da curva S-N:

$$\sigma_a = 101,59 * N_f^{-0,054} \quad (17)$$

com um valor de  $R^2$  de 0,8108.

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados no âmbito desta dissertação e os resultados obtidos por Catarina Gonçalves [1]. Apesar dos testes com os provetes imersos durante 900 dias apresentarem dois provetes com um número

elevado de ciclos completos, é possível observar pela linha de tendência que a maioria destes apresenta menor tempo de vida à fadiga do que os restantes, isto é, do que os provetes de controlo e dos provetes submersos por 229 dias. Há, uma ligeira diferença dos provetes de controlo para os imersos durante 229 dias, mas a diferença entre os últimos e os imersos durante 900 dias é mais acentuada.

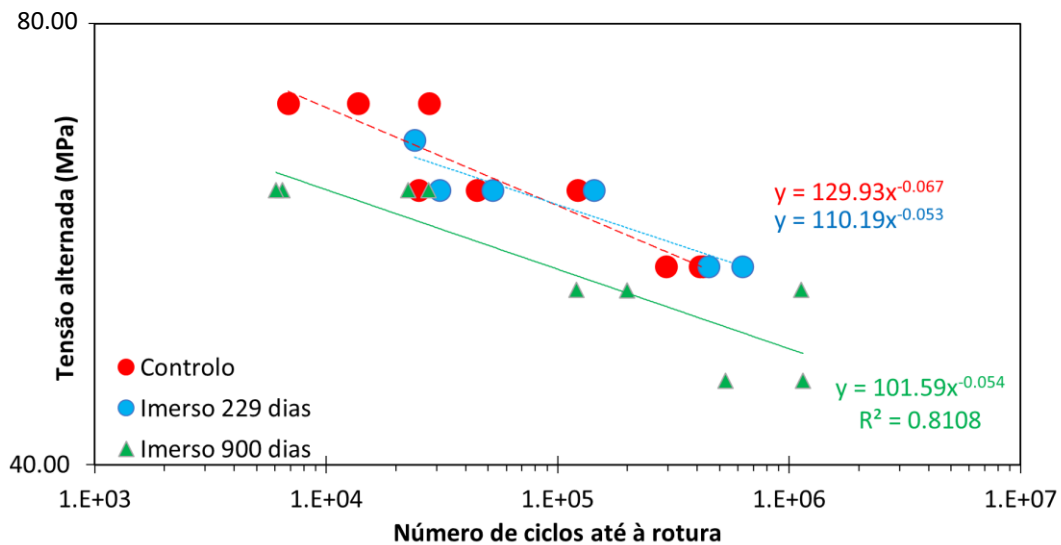


Figura 4.1 - Curva S-N para os testes de controlo, provetes imersos por 229 e 900 dias.

Dois dos provetes sofreram problemas durante o teste: o provete N3 sofreu rutura na zona da amarra, ao invés da zona de concentração de tensões induzida pelo furo como seria expectável; e o provete N5 que foi inadvertidamente dobrado aquando da preparação do teste, tornando-o frágil em relação aos outros. Por estas razões, dos nove testados, serão analisados apenas sete.

Havendo uma grande dispersão dos valores de todos os provetes, apenas em dois dos sete em análise se observou um comportamento de ciclos semelhante aos provetes de controlo. A dispersão observável pode ser resultado: da maquinação do provete, não sendo possível obter dois provetes exatamente iguais; do desalinhamento vertical do provete na máquina de fadiga que, apesar de ser verificado com um esquadro e um nivelador, pode oscilar e causar estes valores; de alguma introdução de concentração de tensões resultado da preparação do provete para o teste.

Efetuada um cálculo da média de número de ciclos de todos os provetes sujeitos a uma tensão alternada equivalente a 61,6 MPa, uma tensão média de 75,3 MPa, uma tensão

mínima de 13,7 MPa e uma tensão máxima de 136,9 MPa é obtido um resultado apresentado na tabela 4.1:

**Tabela 4.1 - Valores do número de ciclos realizados por cada provete.**

		N <sub>f</sub>	N <sub>f</sub> médio
Controlo	N3	121935,00	63923,00
	N6	25034,00	
	N10	44800,00	
Imerso 229 dias	P1	30804,00	75478,33
	P2	143463,00	
	P3	52168,00	
Imerso 900 dias	P2	22624,00	25175,50
	P3	6459,00	
	P5	6047,00	
	P7	27727,00	

De acordo com o expectável, observa-se um comportamento significativamente pior relativamente ao número de ciclos realizados à fadiga por parte dos últimos provetes em análise, muito certamente devido ao maior período de exposição ao ambiente corrosivo. Contudo os resultados em comparação com os outros dois tipos de provetes não são coerentes, uma vez que para a mesma tensão alternada os provetes de controlo, que nunca foram expostos ao ambiente corrosivo utilizado no estudo, apresentam um comportamento menos resistente à fadiga em comparação com os provetes imersos durante 229 dias.

## 4.2. Efeito da pré-tensão e do tempo de imersão

### 4.2.1. Análise ao número de ciclos

A pré-tensão poderá causar uma significativa alteração das propriedades mecânicas do provete, bem como o tempo de imersão em ambientes corrosivos. Nesta análise será verificado se é ou não possível correlacionar estes dois importantes meios de introdução de tensões de deterioração no material. Segue-se a tabela 4.2 com os parâmetros de realização e os resultados dos ensaios dos provetes pré-tensionados.

**Tabela 4.2 – Parâmetros de realização dos ensaios e resultados dos ensaios dos provetes pré-tensionados.**

Provete	Pré-tensão	$\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	$\sigma_{máx}$ (MPa)	$N_f$ (ciclos)	$\epsilon_{1i}$ máxima
P25_1	25%	61,60	75,28	136,88	13,69	136,88	318475	0,0184
P25_2		67,03	81,92	148,95	14,90	148,95	270389	---
P25_3		61,60	75,28	136,88	13,69	136,88	50302	0,0183
P50_1	50%	61,61	75,30	136,90	13,69	136,90	24989	0,0158
P50_2		61,60	75,29	136,89	13,69	136,89	27629	0,0207
P50_3		61,61	75,30	136,90	13,69	136,90	23039	0,0188
P75_1	75%	61,60	75,28	136,88	13,69	136,88	717099	0,0174
P75_2		61,60	75,28	136,88	13,69	136,88	381847	0,0118
P75_3		61,60	75,29	136,89	13,69	136,89	16402	0,0221

De modo a obter uma ideia visual dos valores acima apresentados, foram colocados num gráfico de colunas, figura 4.2, os valores respetivos de vida à fadiga, em ciclos, dos provetes pré-tensionados sujeitos ao ambiente corrosivo durante 229 e 900 dias, bem como três provetes de controlo para obter uma comparação mais composta.



**Figura 4.2 - Valores de vida à fadiga, em ciclos, dos provetes pré-tensionados.**

Foram também colocados na tabela 4.3 os valores da média de ciclos realizados por cada tipo de provete

**Tabela 4.3 - Média de ciclos realizados por cada tipo de provete e condição de teste.**

Tipo de Provete	Controlo	25% (229)	25% (900)	50% (229)	50% (900)	75% (229)	75% (900)
Média de ciclos de vida	63923	87671	213055	62034	25219	147844	371783

---

O gráfico apresenta um comportamento anormal por parte dos provetes com 25% e 75% de pré-tensão, uma vez que os resultados apresentados são bastante distintos entre eles, contudo comparando ao comportamento dos dois tipos de provetes pré-tensionados observamos uma geometria bastante semelhante, isto é, ambos apresentam valores de ciclos de vida altos, médios e baixos, dentro da mesma pré-tensão e do mesmo tempo de imersão.

Nos provetes com pré-tensão de 25%, os que apresentam um melhor comportamento foram os que ficaram expostos ao ambiente corrosivo durante mais tempo, com uma média de 213055 ciclos realizados. Os provetes sujeitos a uma exposição de 229 dias realizaram cerca de menos de metade desse valor.

Em relação aos provetes com pré-tensão de 50%, estes apresentam um comportamento bastante regular relativamente ao expectável em termos do tempo de imersão. Os provetes com maior tempo de exposição ao ambiente corrosivo apresentam em média piores resultados de resistência, com cerca de pouco mais de um terço de vida à fadiga dos provetes com apenas 229 dias de exposição ao ambiente corrosivo.

Os provetes com pré-tensão de 75% têm prestações bastante desequilibradas relativamente ao tempo de imersão: os provetes com mais tempo de imersão são os que apresentam uma maior resistência à fadiga, indiciando que a presença em ambientes salinos fomenta uma boa resistência dos provetes sujeitos a três quartos da pré-tensão.

Observa-se assim um comportamento padrão dos provetes com 25% e 75% de pré-tensão: apresentam valores médios de vida à fadiga bastante superiores à média de ciclos à fadiga por parte dos provetes de controlo e, em ambos, a prestação dos provetes com mais tempo de imersão é significativamente melhor do que a dos provetes de controlo e dos provetes imersos durante 229 dias. Assim, estes resultados podem indicar um melhoramento da resistência dos provetes quando pré-tensionados a 25% ou 75% e simultaneamente imersos longos períodos de tempo em ambientes corrosivos.

Curiosamente, não se verifica este comportamento nos provetes com pré-tensão de 50%. O valor médio de vida à fadiga destes provetes é inferior ao valor médio de ciclos de vida à fadiga nos provetes de controlo, tanto para os provetes de 229 como os de 900 dias de imersão em ambiente corrosivo. Este seria o resultado expectável, uma vez que o ambiente corrosivo deve fragilizar e danificar algumas fibras, reduzindo o número de ciclos a que o provete pode estar sujeito.

Utilizando apenas esta análise, as conclusões retiradas são ambíguas pois apesar de para os provetes de 50% de pré- tensão o ciclo de vida à fadiga ser expectável, e inferior aos ciclos de vida dos provetes de controlo, para os provetes com 25% e 75% o comportamento é totalmente contrário ao que seria suposto. Não há uma coerência no número de ciclos completados pelos provetes, sendo que deveriam apresentar um número de ciclos decrescente consoante o crescimento da pré- tensão e não oscilar abruptamente, como ocorre neste caso. Este fenómeno pode dever-se ao processo de maquinação dos provetes, ao manuseamento destes após fabrico ou ao procedimento de aplicação da pré- tensão.

#### **4.2.2. Análise da deformação nos provetes pré-tensionados**

Foram seleccionados para esta análise os três provetes com melhor e os três provetes com pior tempo de vida à fadiga de cada situação (25%, 50% e 75% de pré- tensão). Todos estes apresentam valores iguais de tensão alternada ( $\sigma_a = 61,6$  MPa) e de tensão média ( $\sigma_m = 75,3$  MPa) de modo que o estudo seja o mais equilibrado possível. Em análise estão os gráficos de deformação principal média ( $\epsilon_{1med}$ ) e deformação média segundo o eixo y ( $\epsilon_{yymed}$ ), que coincide com a direção de solitação. Para esta foram utilizados gráficos com informações organizadas de diferentes maneiras: gráficos de deformação em função do número de ciclos, e gráficos da percentagem de deformação em função da percentagem de vida à fadiga completa. Estes são apresentados nas figuras dos subcapítulos 4.2.2.1, 4.2.2.2 e 4.3.

Todas as informações relativas a deformações foram captadas somente em redor do furo, sendo impraticável analisar toda a área do provete.

Assim, os provetes seleccionados para o grupo com melhor desempenho foram os P25-1, P50-2 e P75-1, enquanto para o grupo com pior desempenho foram P25-3, P50-3 e devido a dificuldades na análise dos dados recolhidos num dos provetes com 75% de pré- tensão, foi utilizado o provete P75-2 ao invés do provete P75-3, sendo este último o que apresentou um pior resultado de vida à fadiga.

Nos gráficos percentuais os valores da vida dos provetes não chegam a atingir os 100% de vida uma vez que o programa VIC3D® era utilizado periodicamente e em praticamente todos os casos este não captava informação exatamente antes da rutura do provete. Houve também ocasiões em que o provete era ensaiado e a captação de imagem era

interrompida, pelo que os registos por vezes não atingiam sequer 50% de vida, o que explica a grande lacuna de dados dos provetes no final de vida.

#### 4.2.2.1. Análise dos provetes com melhor resistência à fadiga

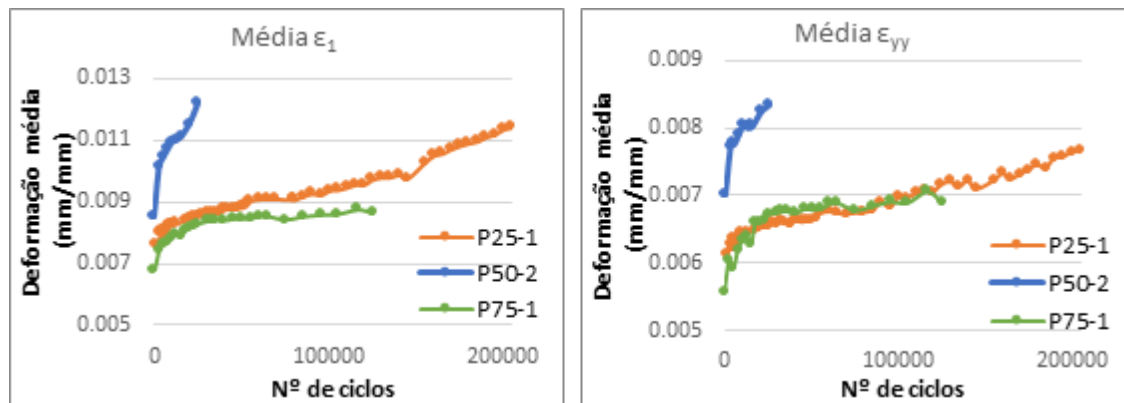


Figura 4.3 – Gráfico da média de deformação principal em função da vida dos provetes P25-1, P50-2 e P75-1 (esquerda) e gráfico da média de deformação sobre o eixo yy em função da vida dos provetes P25-1, P50-2 e P75-1 (direita).

A figura 4.3 apresenta dois gráficos distintos: um de deformação principal média dos provetes em função do número de ciclos, e outro de deformação média segundo o eixo y em função do número de ciclos.

Através da observação dos gráficos da figura 4.3 tem-se uma clara amostra da fraca prestação de longevidade do provete P50-2, o melhor dos provetes com uma pré-tensão de 50%, o que se constatou na análise anterior ao número de ciclos. Não só foi o provete com o menor número de ciclos completo, como também é o que apresenta um maior declive de deformação média, comparando com o P25-1 e o P75-1. O provete P75-1 apresenta os menores valores de deformação, dentro do intervalo de dados registado, o que se poderia justificar com o facto de este ter sido previamente tensionado a 75% e, portanto, com o sistema de recolha de dados utilizado, o registo de deformação deste provete seria o menor. Contudo esta teoria é imediatamente anulada: seguindo esta ordem de ideias, o provete com segunda menor deformação deveria ser o P50-2, uma vez que é o que apresenta a segunda maior pré-tensão, o que não se verifica. Resta o P25-1 que, por sua vez, registou valores de deformação bastante semelhantes ao P75-1. Uma explicação para este fenómeno poderá ter a ver com as características do provete em si, causadas pela maquinação e furação do provete, ou pode mesmo estar relacionado com o facto de o provete sujeito a uma pré-tensão de 50% ficar mais fragilizado que os outros dois tipos de provetes pré-tensionados.

Interessa salientar que os níveis de deformação registados com o VIC3D® são coerentes com a ideia que a degradação do provete provocada pela exposição a ambiente corrosivo vai alterar o nível de deformação inicial. O valor médio da deformação principal é significativamente maior para o provete P50-2 do que para os restantes. Além disso, entre o provete P25-1 e P75-1 há uma variação do declive da curva de deformação na fase inicial. Este declive é maior no provete P75-1 do que no provete P25-1. Esta variação parece indicar que quanto maior o declive maior poderá ter sido a deterioração do provete pela ação do ambiente corrosivo e carregamento.

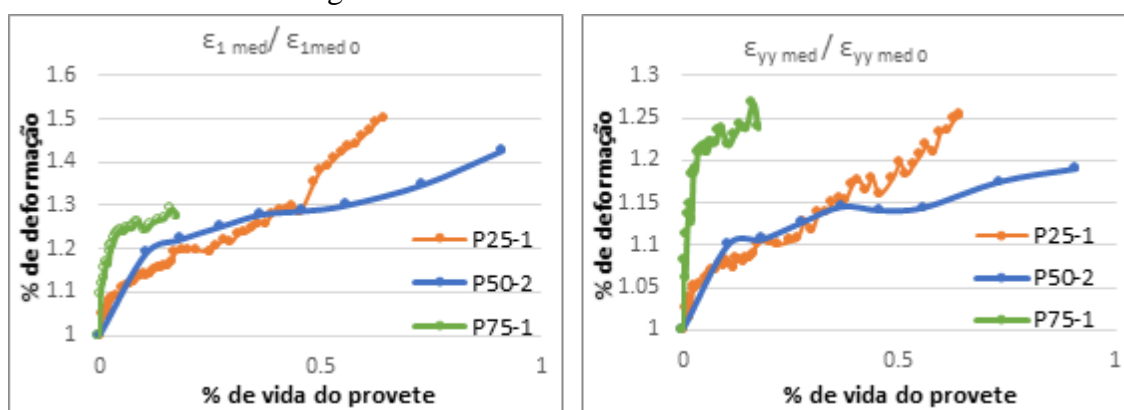


Figura 4.4 - Gráfico da percentagem média de deformação principal em função da vida dos provetes P25-1, P50-2 e P75-1 (esquerda) e gráfico da percentagem média de deformação sobre o eixo yy em função da vida do provete P25-1, P50-2 e P75-1 (direita).

Tabela 4.4 - Equações das linhas de tendência dos provetes P25-1, P50-2 e P75-1.

Linhas de tendência linear	
$\epsilon_{1 \text{ med}} / \epsilon_{1 \text{ med } 0}$	$\epsilon_{yy \text{ med}} / \epsilon_{yy \text{ med } 0}$
$y_{P25\_1} = 0,638 x + 1,054$ $R^2 = 0,82$	$y_{P25\_1} = 0,319 x + 1,035$ $R^2 = 0,59$
$y_{P50\_2} = 0,362 x + 1,113$ $R^2 = 0,82$	$y_{P50\_2} = 0,160 x + 1,061$ $R^2 = 0,75$
$y_{P75\_1} = 1,004 x + 1,149$ $R^2 = 0,59$	$y_{P75\_1} = 0,953 x + 1,128$ $R^2 = 0,56$

A figura 4.4 apresenta dois gráficos de percentagem de deformação: deformação principal média percentual dos provetes em função da percentagem do número de ciclos, e



---

deformação média percentual segundo o eixo  $y$  em função da percentagem do número de ciclos.

Pode observar-se nos gráficos da figura 4.4 que a percentagem de deformação do provete P75-1 é relativamente acentuada no início, e o declive da linha de tendência é superior à unidade, o que pode ser resultado de ter estado sujeito a 75% de pré-tensão em simultâneo com o tempo de imersão. Relativamente a deformação  $\epsilon_1$ , o provete atinge cerca de 30% de deformação em metade do tempo que os outros dois tipos de provetes (com 25% e 50% de pré-tensão) o fazem, o que demonstra uma menor tolerância à fadiga por parte do P75-1, o que seria de esperar tendo em conta que a pré-tensão a que foi sujeito era superior. Este apresenta uma deformação  $\epsilon_{yy}$  bastante elevada, tendo o valor registado de deformação mais elevado, cerca de 27%.

Os provetes com pré-tensão de 25% e 50% apresentam um declive significativamente menos acentuado no início da deformação, tendo ambos um comportamento relativamente semelhante até meia vida, diferindo apenas na segunda metade da vida. A partir desta segunda fase, provete com melhor comportamento à fadiga, dentro do intervalo registado, é o provete com 50% de pré-tensão. De acordo com o expectável, o provete P25-1 deveria apresentar o melhor comportamento, sendo este o que tem a menor deformação inicial e, portanto, deveria oferecer uma maior resistência à fadiga, o que não se verifica.

Nos dois gráficos se verifica um comportamento geral do provete constante para os dois tipos de deformação: o provete P50-2 apresenta o menor declive de deformação, seguido do P25-1 e finalmente do provete P75-1. Estas prestações são difíceis de explicar, uma vez que não há uma correlação que possa ser realizada entre a percentagem de pré-tensão e o declive de deformação.

#### 4.2.2.2. Análise dos provetes com pior resistência à fadiga

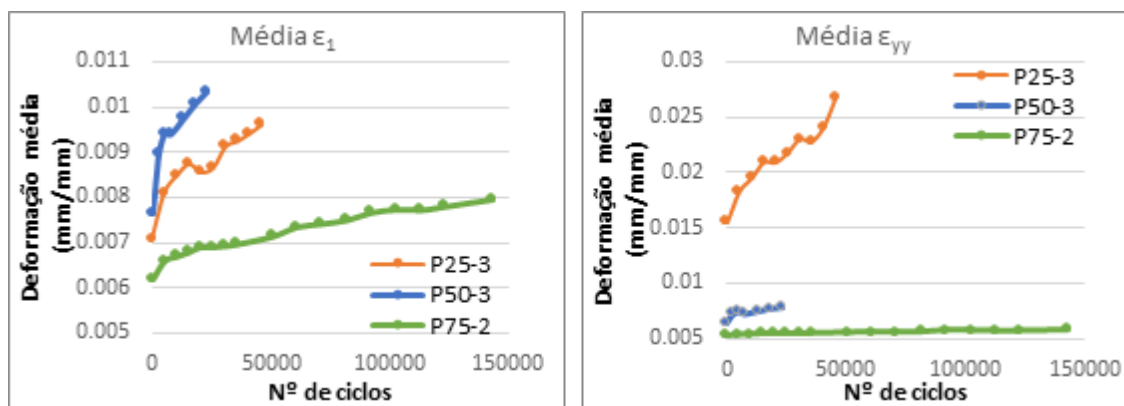


Figura 4.5 – Gráfico da média de deformação principal em função da vida dos provetes P25-3, P50-3 e P75-2 (esquerda) e gráfico da média de deformação sobre o eixo yy em função da vida dos provetes P25-3, P50-3 e P75-2 (direita).

Analisando agora os gráficos da figura 4.5, que apresentam valores de deformação média principal e segundo o eixo y em função do número de ciclos, observamos que os provetes com piores prestações a nível de vida à fadiga apresentam uma maior dispersão de resultados diretos. Observa-se que os valores de deformação média  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_{yy}$  são inversos para os provetes com 25% e 50% de pré-tensão, isto é, para deformação média principal o provete P50-3 apresenta os maiores valores, enquanto para deformação média segundo o eixo y o provete P25-3 supera os outros provetes nos valores. O valor de  $\epsilon_1$  média para o provete P50-3 cresce acentuadamente na fase inicial e continua com um declive elevado até completar o número de ciclos até à rutura, apresentando, dentre os três níveis de pré-tensão, o maior valor de deformação. Ainda relativamente gráfico da esquerda na figura 4.5, podemos observar um declive acentuado por parte do provete P25-3, contudo este diminui e estabiliza ao longo dos ciclos até à rutura.

O gráfico da direita na figura 4.5 apresenta valores de médios de deformação  $\epsilon_{yy}$  bastante diferentes, uma vez que o provete P25-3 apresenta uma deformação máxima registada praticamente três vezes superior à deformação principal. É possível observar as diferenças no desenvolvimento da fenda no provete na figura 4.11 captada com o programa VIC3D®. Já P50-3 verifica uma ligeira redução no valor de deformação, sendo este valor bastante inferior ao da deformação do provete com 25% de pré-tensão inicial. Os valores para ambos os provetes podem ser resultado de já ter havido uma pré deformação durante a tração do provete, fazendo com que a deformação segundo o eixo y dependa da pré-

deformação ocorrida durante o ensaio de tração. Daí resultam valores altos do provete que sofreu um pré-tensionamento de apenas 25%, face ao provete de pré-tensionamento de 50% que apresenta uma menor deformação  $\varepsilon_{yy}$  durante o teste de vida à fadiga

Para ambos os gráficos o comportamento do provete P75-2 mostra-se bastante regular, tendo um declive de crescimento de deformação pouco acentuado, o que se pode dever ao facto de 75% da peça já se encontrar deformada, pelo que a deformação registada durante o teste não adquire valores tão altos como a dos outros provetes.

Através da figura 4.6, que apresenta a percentagem de deformação em função da percentagem de vida do provete, é possível adotar uma perspetiva diferente em relação à deformação dos provetes: apresentam deformações iniciais bastante elevadas, com declives relativamente semelhantes.

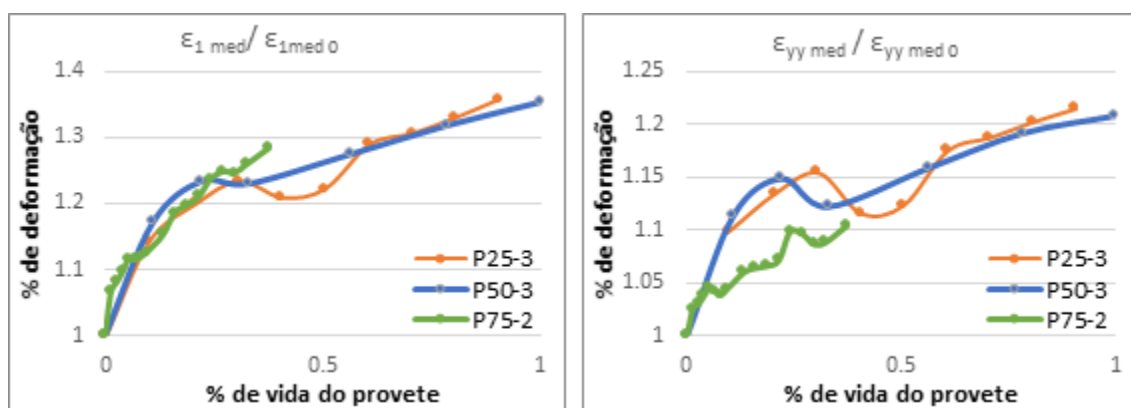


Figura 4.6 - Gráfico da percentagem média de deformação principal em função da vida dos provetes P25-3, P50-3 e P75-2 (esquerda) e gráfico da percentagem média de deformação sobre o eixo yy em função da vida do provete P25-3, P50-3 e P75-2 (direita).

Tabela 4.5 Equações das linhas de tendência dos provetes P25-3, P50-3 e P75-2.

Linhas de tendência linear	
$\varepsilon_{1 \text{ med}} / \varepsilon_{1 \text{ med } 0}$	$\varepsilon_{yy \text{ med}} / \varepsilon_{yy \text{ med } 0}$
$y_{P25_3} = 0,316 x + 1,085$ $R^2 = 0,87$	$y_{P25_3} = 0,132 x + 1,089$ $R^2 = 0,54$
$y_{P50_3} = 0,279 x + 1,107$ $R^2 = 0,77$	$y_{P50_3} = 0,158 x + 1,067$ $R^2 = 0,72$
$y_{P75_2} = 0,658 x + 1,062$ $R^2 = 0,93$	$y_{P75_2} = 0,238 x + 1,023$ $R^2 = 0,81$

Relativamente à deformação principal percentual verifica-se um comportamento igual de deformação por parte dos três provetes até cerca de 7% do tempo de vida do provete, apresentando todos perto de 15% de deformação. Os provetes voltam a encontrar uma zona com valores semelhantes, quando apresentam cerca de 25% de deformação com 30% da vida completa. A partir desse ponto as curvas assumem formas totalmente diferentes.

Na figura 4.6, a curva P25-3 apresenta imediatamente uma depressão difícil de justificar, talvez por uma falha no programa, prosseguindo com a deformação de um modo constante até cerca de 36% de deformação a 90% da vida do provete. O provete P50-3 assume uma depressão menos acentuada, tendo a curva de deformação após a mesma um declive constante até ao fim de vida, apresentando uma menor deformação principal percentual do que o provete P25-3. Embora apenas haja informação acerca de 37% da vida do provete P75-2, podemos ver um comportamento relativamente regular, mantendo um elevado declive relativamente aos dois outros provetes.

Através das linhas de tendência do gráfico pode ter-se uma perceção do anteriormente afirmado: o declive da linha do P75-2 é cerca de duas vezes superior que o declive do P25-3, tendo um valor significativo. Isto demonstra que o provete P75-2 estava a apresentar deformações a um ritmo bastante mais elevado do que os outros provetes.

O comportamento da deformação média  $\varepsilon_{yy}$  mostra-se mais heterogéneo, inicialmente, devido à curva P75-2 que se distancia das outras antes de completar 5% de deformação. De forma similar, no gráfico da esquerda da figura 4.6 observa-se uma depressão notável de ambas as curvas P25-3 e P50-3. Com os dados recolhidos, observamos uma maior deformação média  $\varepsilon_{yy}$  do provete P25-3, atingindo os 22% do valor inicial. Relativamente a linhas de tendência, todos os provetes apresentam um declive de deformação reduzido, sendo o maior o do provete P75-2 como acontece na deformação principal média. De acordo com o crescimento da pré-tensão no provete, verifica-se um declive de deformação em  $yy$  crescente também, sendo este o cenário expectável uma vez que o provete com maior deformação deve ser o provete mais frágil e mais fácil de deformar

### 4.3. Efeito da tensão na vida do provete

Os ensaios onde o programa VIC3D® foi utilizado apresentam os parâmetros e valores na seguinte tabela 4.6:

Tabela 4.6 - Parâmetros de realização dos ensaios e resultados dos ensaios dos provetes pré-tensionados.

Provete	$\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$N_f$ (ciclos)	$\epsilon_{1i}$ máxima
P1	52,64	64,33	116,97	11,70	116,97	120555	0,0235
P2	61,60	75,28	136,88	13,69	136,88	22624	0,0158
P3	45,64	55,78	101,42	10,14	101,42	1145839	0,0143
P5	61,60	75,28	136,88	13,69	136,88	6047	0,024
P7	61,60	75,29	136,89	13,69	136,89	27727	0,0161
P8	45,64	55,78	101,41	10,14	101,41	532316	0,0103
P9	52,64	64,34	116,98	11,70	116,98	1125198	0,0124

Os provetes foram sujeitos a carregamentos distintos, selecionadas consoante a tensão alternada pretendida. Foram selecionados três provetes sujeitos a diferentes tensões alternadas para obter uma comparação clara acerca do efeito da tensão na vida à fadiga do provete em análise. Do comportamento destes três provetes, foram extraídas as equações lineares da linha de tendência para a zona de deformação II dos mesmos.

Os resultados em análise são os dos provetes P1, P2 e P8, com os desempenhos de deformação em função do número de ciclos representados nos gráficos da figura 4.7:

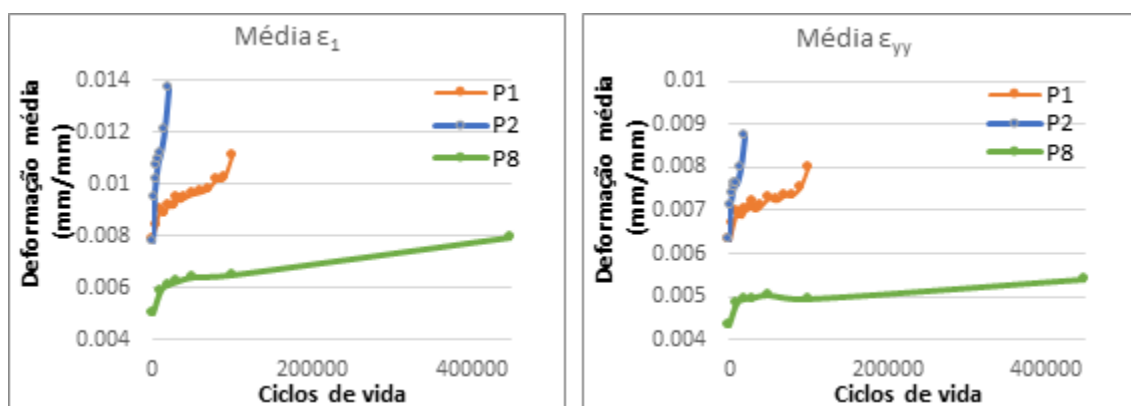


Figura 4.7 Gráfico da média de deformação principal em função da vida dos provetes P1, P2 e P8 (esquerda) e gráfico da média de deformação sobre o eixo yy em função da vida dos provetes P1, P2 e P8 (direita).

Os resultados obtidos nestes ensaios são bastante expectáveis: quanto maior o valor da tensão aplicada no provete, menor o número de ciclos completo pelo mesmo e maior a deformação apresentada.

Os provetes P1 e P2 apresentam uma deformação significativamente superior à deformação do provete P8, cuja deformação principal média final é ligeiramente superior à deformação inicial dos dois primeiros provetes. Isto demonstra que com um aumento de cerca de 7MPa os provetes podem apresentar um comportamento totalmente diferente, não só a nível de deformação como também a nível de número de ciclos completos. O provete P8 completou 4,85 vezes mais ciclos do que o provete P1 e 26,4 vezes o número de ciclos do P2, o que pode ser considerado uma diferença extremamente acentuada entre a vida dos 3 provetes. Deve-se claramente à intensidade da tensão aplicada.

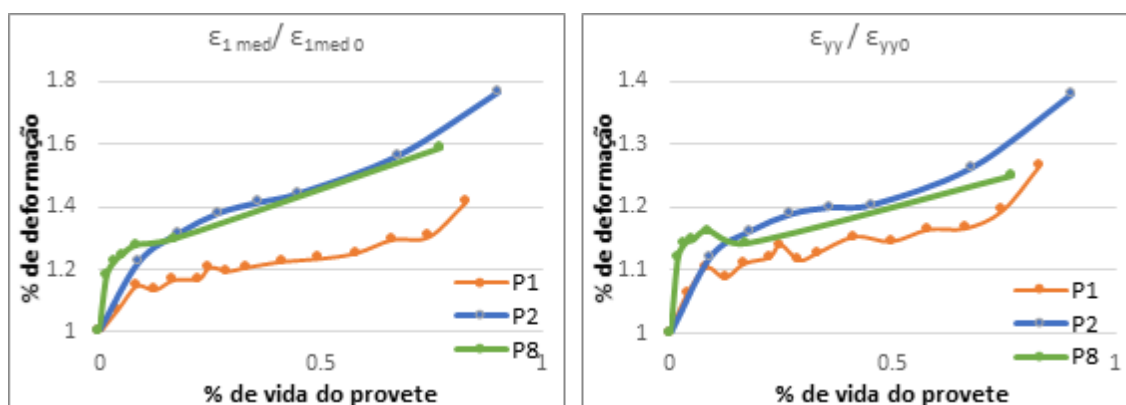


Figura 4.8 - Gráfico da percentagem média de deformação principal em função da vida dos provetes P1, P2 e P8 (esquerda) e gráfico da percentagem média de deformação sobre o eixo yy em função da vida do provete P1, P2 e P8 (direita).

Tabela 4.7 - Equações das linhas de tendência dos provetes P1, P2 e P8.

Linhas de tendência linear	
$\epsilon_{1 \text{ med}} / \epsilon_{1 \text{ med } 0}$	$\epsilon_{yy \text{ med}} / \epsilon_{yy \text{ med } 0}$
$y_{P1} = 0,353x + 1,079$ $R^2 = 0,88$	$y_{P1} = 0,208x + 1,058$ $R^2 = 0,83$
$y_{P2} = 0,719x + 1,124$ $R^2 = 0,93$	$y_{P2} = 0,339x + 1,066$ $R^2 = 0,89$
$y_{P8} = 0,574x + 1,167$ $R^2 = 0,92$	$y_{P8} = 0,196x + 1,107$ $R^2 = 0,54$

Na figura 4.8, o provete P8, que apresenta o melhor comportamento à fadiga, é o que apresenta uma maior percentagem de deformação principal ( $\epsilon_1$ ) no início de vida, com cerca de 20% do provete deformado aquando da primeira recolha de dados, aos 10000 ciclos de vida completos. Em simultâneo, os outros provetes P1 e P2 têm um comportamento e valores percentuais de deformação inicial semelhantes entre si, com cerca de 10% de deformação completos nos primeiros ciclos de vida.

Após 15% de vida completos, os provetes P2 e P8 adquirem um comportamento semelhante, destacando-se o comportamento do provete P1 que apresenta a menor deformação percentual em função da percentagem de vida do mesmo. Esta situação reflete-se nas equações lineares dos três provetes: o provete P1 apresenta um declive bastante inferior aos restantes, tendo o maior declive o provete P2.

Relativamente a deformação percentual  $\epsilon_1$  não há nenhuma relação entre o declive e o valor da tensão a que o provete se encontra sujeito, uma vez que o provete sujeito a menor tensão, P8, é o que apresenta o declive de deformação percentual médio. De modo a obter valores coerentes, o provete P8 deveria apresentar o menor declive de relação % de deformação/ % de vida à fadiga, tendo no valor mais alto o P2.

Assim o provete P2 apresenta uma maior percentagem de deformação registada como era expectável, cerca de 77%, seguido do valor do P8 com 59% de deformação, e finalmente o provete P1 com apenas 42% de deformação  $\epsilon_1$  registada.

A deformação sobre y ( $\epsilon_{yy}$ ) apresenta resultados visualmente semelhantes, embora matematicamente diferentes. O provete P8, tal como na deformação  $\epsilon_1$ , tem um início de vida com bastante abrupto em termos de deformação, com 15% de deformação sobre y com apenas 8,5% de vida completos. Há uma depressão pontual nos valores registados após esta percentagem de vida inicial, a qual se pode dever a um erro na aquisição de resultados. Daí até ao último registo da vida do provete, aos 77% de vida, há uma deformação de cerca de 10%, apresentando o provete uma deformação final  $\epsilon_{yy}$  de 25%. Este é assim o provete que apresenta, dos dados recolhidos, a menor deformação percentual.

O provete P1 apresenta registos de deformação relativamente estáveis, tendo oscilações nos valores de deformação obtidos pouco significativas e apresentando um aumento na percentagem de deformação totalmente normal de um ensaio de fadiga. Os dados são recolhidos até aos 83% de vida do provete, apresentando 27% de deformação  $\epsilon_{yy}$  registada e ficando este provete entre os valores de deformação dos provetes P8 e P2.

P2 tem a maior percentagem de vida estudada dos três provetes, com 90% da mesma registada. Inicia com um declive de deformação ligeiramente acentuado, baixando depois para um registo mais constante. O último valor de deformação sobre y recolhido é 38%, mais 11% do que o provete anterior.

Numa análise matemática ao comportamento dos provetes verificam-se resultados gerais para esta deformação semelhantes: o provete P8 apresenta a linha de tendência com menor declive, embora bastante perto do valor do declive da linha de tendência para o provete P1, e o provete P2 apresenta o maior declive de deformação, como era de esperar.

#### **4.4. Análise do campo de deformações em redor do furo**

Procede-se neste subcapítulo à análise das imagens captadas com o programa VIC3D® relativas à deformação principal  $\epsilon_1$  para os provetes ensaiados. De modo a garantir coerência analítica, a análise será feita aos mesmos provetes (aos imersos e imersos pré-tracionados) que foram estudados acima e outros dois que apresentaram o maior número de ciclos completos, P3 e P9.

Este tipo de análise servirá somente para encontrar uma explicação visual e tentar correlacionar a imagem com os dados recolhidos de modo a encontrar alguma explicação para resultados obtidos na análise anterior.

Não serão colocadas todas as imagens recolhidas de cada provete. Dentro de cada figura, a escala é sempre igual, diferindo apenas de provete para provete.

No canto superior esquerdo de cada imagem situa-se o número da captação e o respetivo número de ciclos na seguinte forma:  $N_x = y$  ciclos, sendo x o número da imagem e y o número de ciclos.



#### 4.4.1. Provetes imersos pré-tensionados

##### 4.4.1.1. Provetes com melhor resistência à fadiga

Como se concluiu acima, os provetes pré-tensionados que apresentaram melhor resistência ao longo dos ensaios foram P25-1, P50-2 e P75-1. Em análise visual estarão os provetes P25-1 e P50-2, nas figuras 4.9 e 4.10, respetivamente. No canto superior esquerdo de cada imagem

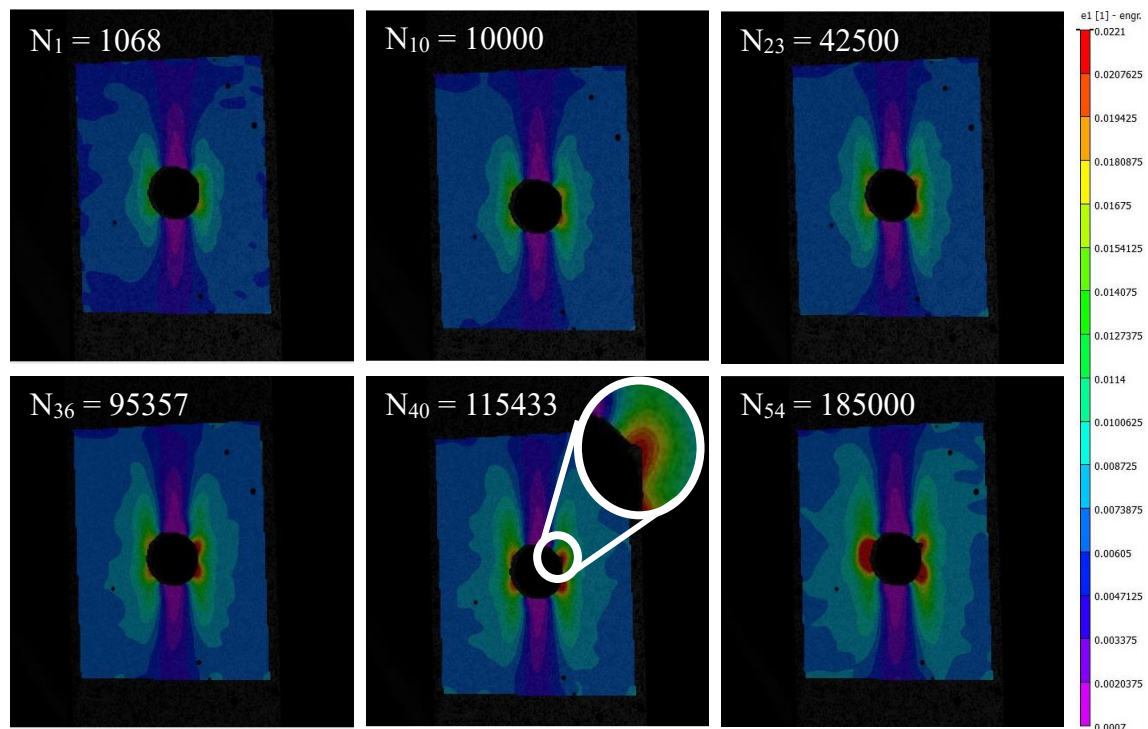


Figura 4.9 - Representação da deformação principal do provete P25-1 criada pelo programa VIC3D®.

Na figura 4.9 apresentam-se captações do provete P25-1, sendo dos provetes com maior registo visual efetuado, e posto isto a seleção de figuras para analisar foi tomada com base em alterações no provete consideradas importantes. Observam-se dois campos de deformação inicial em zonas opostas do furo (cor verde) aos 1068 ciclos, o que é expectável de acontecer. As zonas de deformação expandem ao longo do ensaio, embora a variação de dimensão não seja muito visível para imagens consecutivas. Aos 42500 ciclos tornam-se visíveis as primeiras manchas de deformação mais acentuada, a vermelho em redor do furo. Na imagem  $N_{40}$ , com 115433 ciclos, observa-se com ampliação a primeira alteração na forma do furo, uma fenda na zona da mancha superior direita. Esta acaba por se propagar, o que se vê na  $N_{54}$ , tal como as manchas de deformação mais detetável em redor do furo, provavelmente provocando a rutura do provete, com 318337 ciclos.

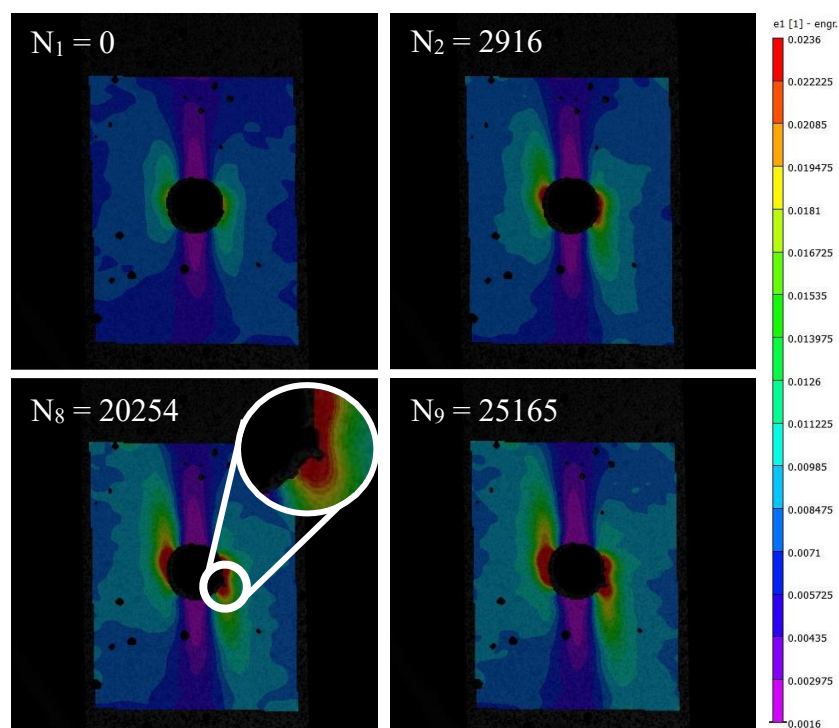


Figura 4.10 - Representação da deformação principal do provete P50-2 criada pelo programa VIC3D®.

Do provete P50-2 foram captadas menos imagens, situadas na figura 4.10, contudo há uma progressão visível na deformação em redor do furo, aparecendo na imagem  $N_2$  aos 2916 ciclos as primeiras manchas de deformação mais notáveis. Na imagem  $N_8$ , aos 20254 ciclos, as manchas de zona deformada ganham intensidade e surge a primeira fenda, ampliada na imagem, cuja propagação, verificada na imagem 9, é apontada como a causa da rutura do provete, aos 27629 ciclos. Observa-se ainda um aumento da deformação na mancha esquerda ao furo.

As imagens referentes ao provete P75-1 são pouco esclarecedoras, uma vez que não se alteram significativamente ao longo da vida do provete, devendo-se a dificuldades de aquisição de imagem. Posto isto estas não serão analisadas.

#### 4.4.1.2. Provetes com pior resistência à fadiga

Dos provetes pré-tracionados com piores prestações à fadiga, serão analisados todos os 3 que foram analisados na secção 4.2.2.2.

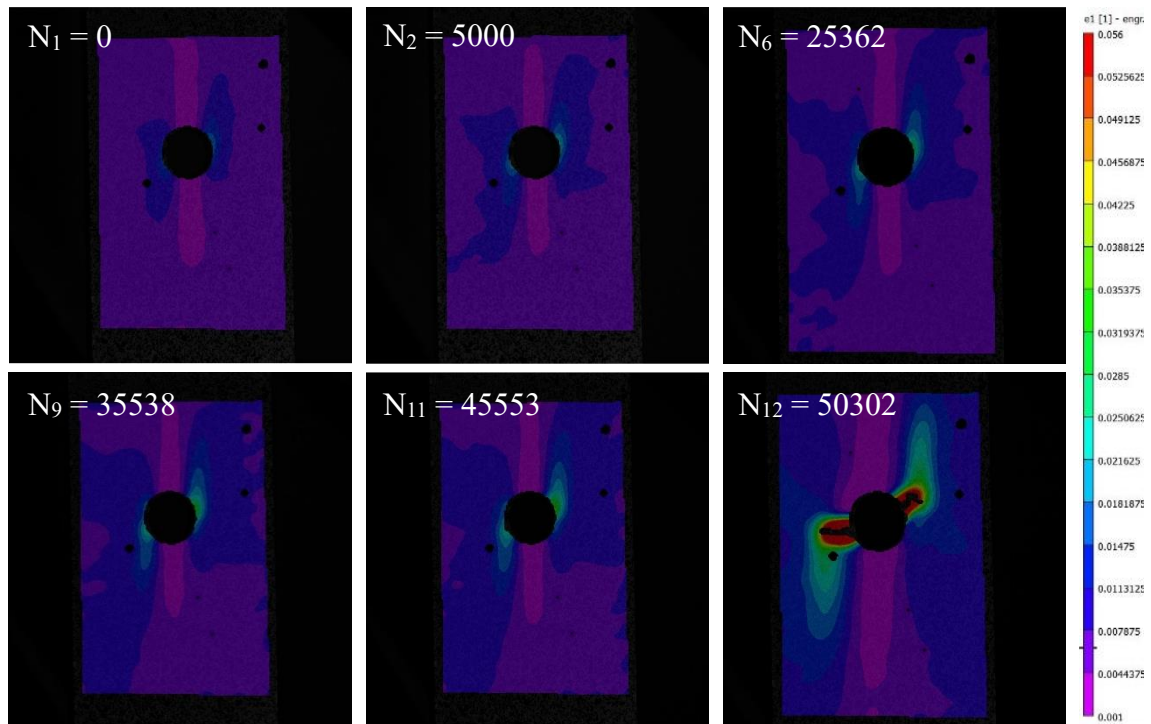
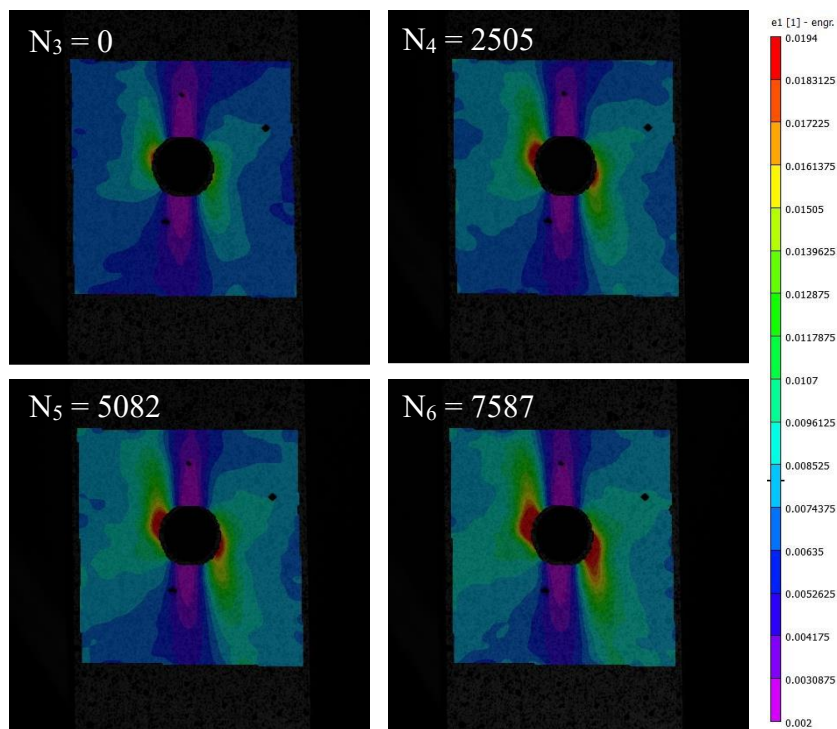


Figura 4.11 - Representação da deformação principal do provete P25-3 criada pelo programa VIC3D®.

É possível, ao longo das imagens da figura 4.11 que representam a deformação principal ocorrida ao longo do ensaio do provete P25-3, acompanhar uma evolução da deformação em redor do furo. Esta torna-se claramente visível a partir da imagem captada aos 25362 ciclos, aparecendo uma mancha azulada em redor do furo na  $N_6$ . A deformação mais intensa e consequente rutura surgiram nos últimos 5000 ciclos do provete, uma vez que a imagem  $N_{12}$  foi captada momentos antes da rutura do mesmo. É possível observar a fenda já bastante propagada no provete, indicando que a rutura em breve seria inevitável.



**Figura 4.12 - Representação da deformação principal do provete P50-3 criada pelo programa VIC3D®.**

Na figura 4.12, na qual se apresentam captações do provete P50-3, verifica-se uma constante propagação da mancha de deformação ao longo dos ciclos, sendo visualmente mais perceptível a partir da imagem  $N_4$ , tirada aos 2505 ciclos. Embora a mancha da esquerda não altere significativamente, a mancha à direita do furo apresenta uma maior mudança de tamanho e de forma. Não é possível observar nenhuma fenda a formar-se, contudo é provável que o provete tenha ruído na zona vermelha, como nos provetes anteriores.

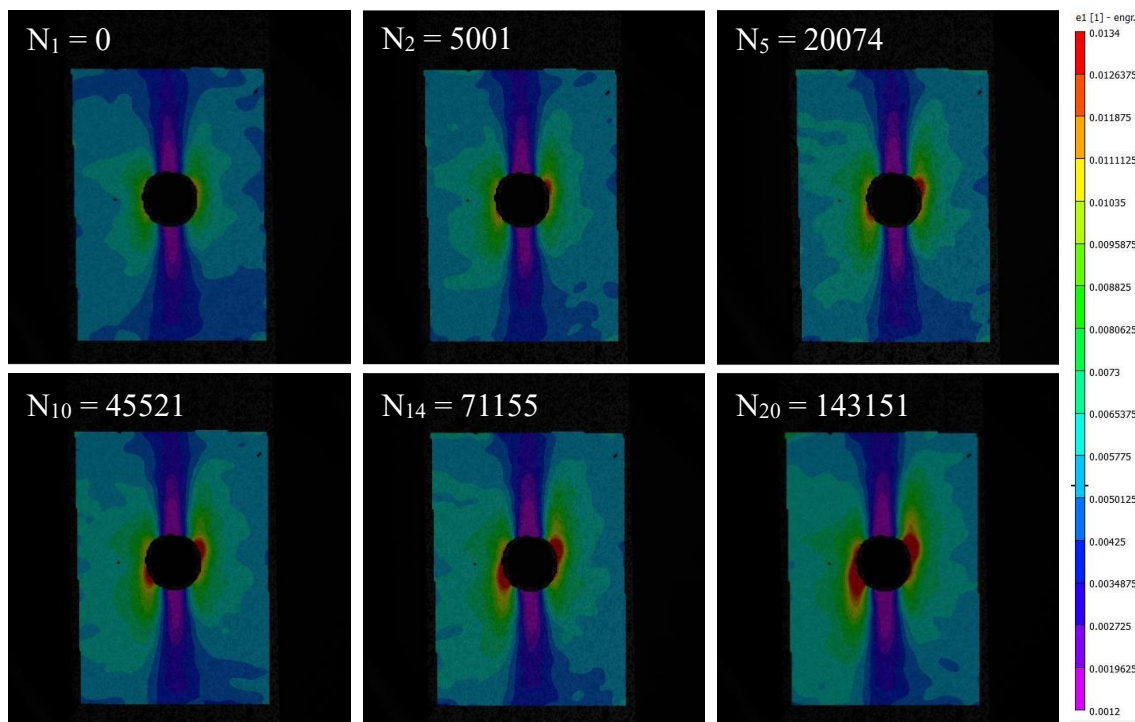


Figura 4.13 - Representação da deformação principal do provete P75-2 criada pelo programa VIC3D®.

O provete P75-2 apresenta na figura 4.13 deformação  $\varepsilon_1$  na imagem  $N_2$ , aos 5001 ciclos, que embora pequena é visível. É a partir desta zona de deformação inicial, superior direita em relação ao furo, que a deformação se desenvolve, como se pode observar nas últimas três fotografias. É possível verificar que o crescimento da deformação em redor do furo é bastante lento e constante, uma vez que não se nota uma alteração visual tão grande como seria de esperar dos 71155 para os 143151 ciclos. Complementando este comentário há o gráfico da figura 4.5 da secção 4.2.2.2 que contém os dados de deformação e demonstra um crescimento constante da deformação no provete P75-2. Isto indica que o provete tem uma orientação de fibras que impede um rápido desenvolvimento de deformações, ou então que o facto de ter 75% de pré-tensão lhe confere uma deformação constante até à rutura uma vez que parte do material já está deformado.

#### 4.4.1.3. Comparação de deformação final de vários provetes

Abaixo representadas na figura 4.14 estão as últimas imagens captadas dos provetes com melhor (acima) e pior (abaixo) resistência à fadiga de modo a ter uma comparação visual de cada um deles:

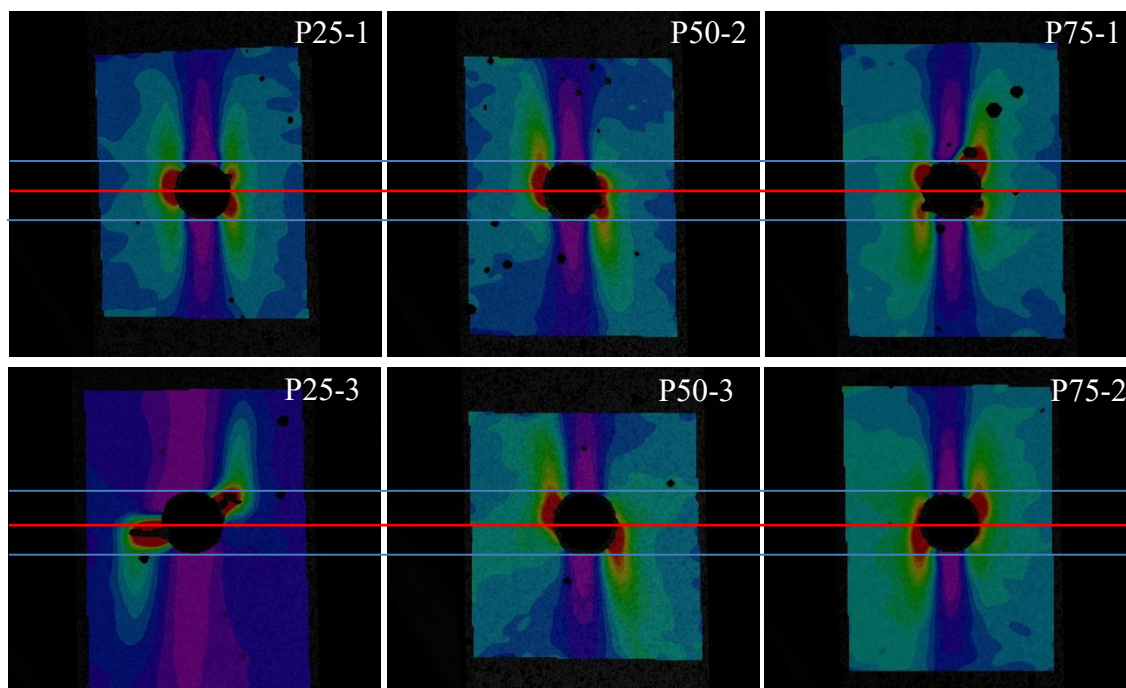


Figura 4.14 – Representação da deformação principal dos provetes P25-1, P25-3, P50-2, P50-3, P75-1 e P75-2 criada pelo programa VIC3D®.

As três imagens superiores da figura 4.14 representam as últimas imagens captadas com o VIC3D® dos provetes com maior número de ciclos completo (P25-1, P50-2, P75-1). Nas imagens dos provetes P25-1 e P75-1 não há nenhum padrão observável a não ser uma quase simetria na zona com maior deformação, na qual o eixo de simetria é representado com a linha vermelha horizontal. Ambos apresentaram mais ciclos concluídos que o provete P50-2, que apresenta uma deformação com sinais de rotação no sentido horário. Este efeito pode ter sido provocado pela anisotropia do material na zona onde o furo foi maquinado, uma vez que este nunca é efetuado na mesma posição relativamente às fibras.

Relativamente aos provetes com piores resultados de resistência à fadiga, é visível um padrão de deformação: todas as manchas de deformação se apresentam com uma direção específica, horária ou anti-horária centrada no furo. É possível observar este fenómeno traçando uma linha horizontal que atravesse o centro do furo e verificando que de facto as manchas de deformação se localizam em lados diferentes da mesma. Este padrão pode dever-se à mesma razão do provete P50-2: uma ligeira inclinação na colocação do provete na máquina de fadiga. Esta é a explicação mais plausível para justificar este comportamento.

#### 4.4.2. Provete imerso sem pré-tensão aplicada

A análise visual será realizada aos provetes da secção 4.3: P1, P2 e P8 por razões de coerência analítica, e aos provetes P3 e P9 devido aos seus desempenhos face ao ensaio de fadiga. As representações estão apresentadas na figura 4.15.

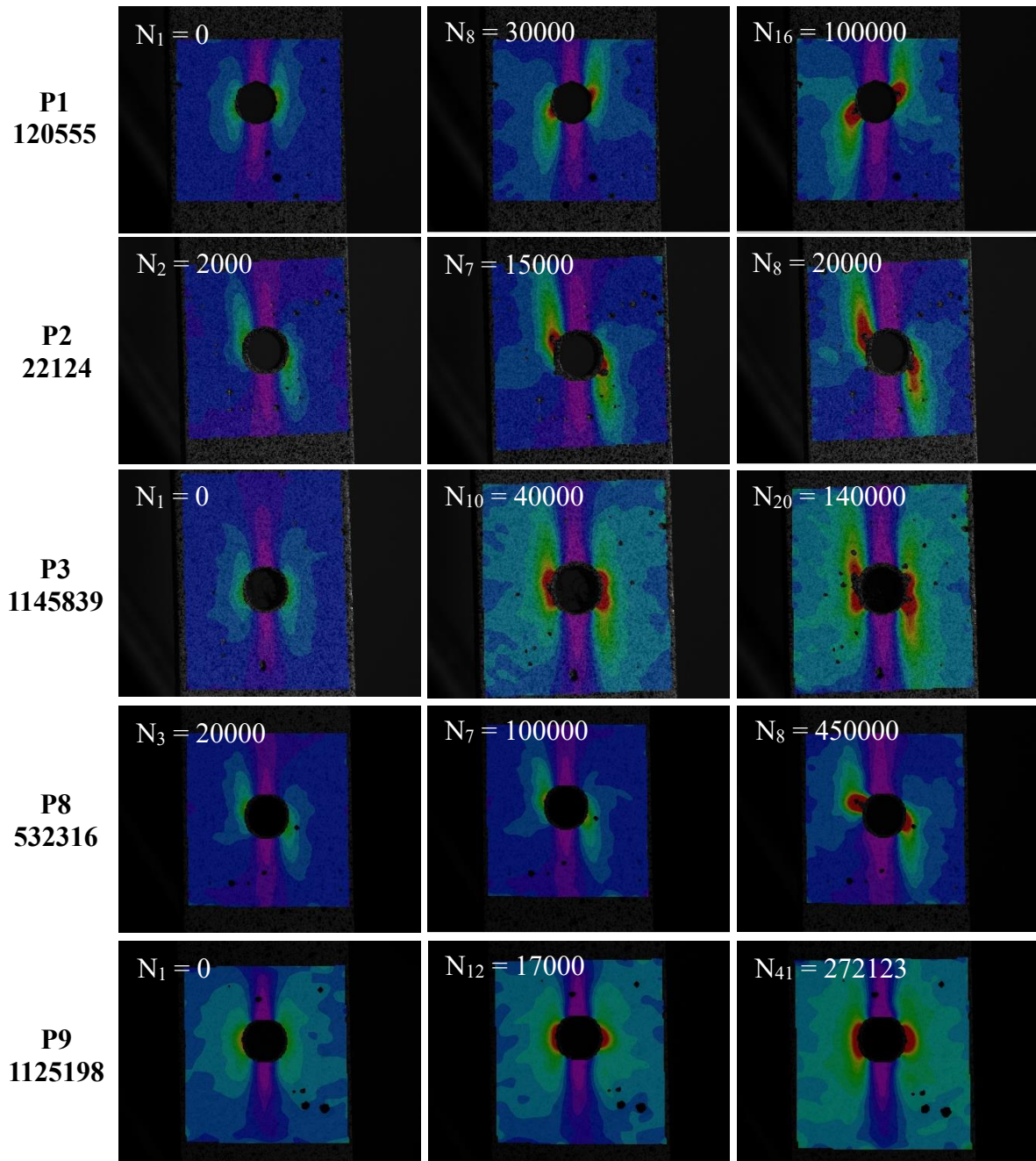


Figura 4.15 - Representação da deformação dos provetes P1, P2, P3, P8 e P9 criada pelo programa VIC3D®.

Os provetes P1, P2 e P8 apresentam todos as manchas de deformação semelhantes às anteriores, com desenvolvimento em direções opostas de cada lado do furo. Curiosamente estes foram, dos 5 selecionados, os que completaram um menor número de ciclos. Dos 3, o provete P2 foi o que completou menos ciclos à fadiga, e é visível um afastamento do furo por parte da mancha de deformação. O segundo provete com menor número de ciclos completo foi o P1, que verifica na última figura uma mancha de deformação inferior à mancha do P2. Finalmente verifica-se, dos três, o que completou maior número de ciclos, também devido à menor tensão a que estava sujeito, o provete P8, com as manchas de deformação mais aproximadas do eixo horizontal centrado no furo.

Os provetes P3 e P9 apresentam o maior número de ciclos completos, 1145839 e 1125198 ciclos, respetivamente. Verifica-se uma distribuição simétrica da mancha de deformação nestes provetes, o que pode ser um indício de que quando existe simetria das manchas de deformação, com eixo horizontal a passar no centro do furo, maior número de ciclos o provete tende a realizar, dentro do intervalo de ciclos esperado por parte do provete e tendo em conta as condições de realização do ensaio e as características do material.

Em todas as figuras recolhidas se observa um crescimento gradual da deformação no provete, que dependendo da tensão aplicada variou na velocidade de propagação.



## 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA PROJETOS FUTUROS

Os objetivos estabelecidos inicialmente foram maioritariamente cumpridos, isto é: foi possível realizar os 18 ensaios com monitorização do programa VIC3D®; traçar uma as curvas S-N e comparar resultados obtidos para os provetes imersos 900 dias com os resultados obtidos nos provetes de controlo e obtidos para 229 dias; comparar os valores de vida à fadiga e de deformação dos provetes pré-tensionados; analisar o efeito do valor da tensão na vida do provete; e observar o campo de deformações em torno do furo nos provetes. A seguir apresentam-se as principais conclusões e fazem sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1. Conclusões

Da lista de objetivos, foram retiradas algumas conclusões principais:

- I. A percentagem de absorção de água pelo provete para 900 dias de imersão no provete é cerca de 1%, que é um valor bastante reduzido para o tempo que este se encontrou imerso.
- II. Através da curva S-N percebe-se que quanto maior o tempo de contacto com o ambiente corrosivo, menor resistência à fadiga o material apresenta.
- III. A duração da vida à fadiga dos provetes com pré-tensão apresentou dispersão elevada, havendo grandes oscilações no número de ciclos até à rotura para os diferentes valores de pré-tensão testados.
- IV. O valor da tensão no provete é decisivo no número de ciclos à fadiga, sendo menor a vida à fadiga para os provetes sujeitos a maior valor de tensão alternada.
- V. De acordo com as imagens captadas e analisadas com o programa VIC3D®, a máxima deformação ocorre no bordo do furo.
- VI. Os provetes que completam mais ciclos à fadiga apresentam uma distribuição simétrica de deformação, enquanto os provetes que

completam menos ciclos à fadiga apresentam manchas de deformação com direções opostas, devido à anisotropia do material.

## **5.2. Propostas para projetos futuros**

Durante a realização desta dissertação, foram surgindo questões que merecem investigação adicional. Em baixo são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros que podem ter interesse no âmbito deste trabalho:

- I. Aumentar o tempo de imersão dos provetes, para ter uma avaliação mais profunda do efeito do tempo de imersão na resistência à fadiga;
- II. Realizar novos ensaios, isolando a zona lateral do provete, que expõe as fibras diretamente ao ambiente, o que pode acentuar a absorção de água no provete;
- III. Colocar os recipientes com os provetes imersos sob exposição solar, de modo a ter mais semelhança com o ambiente marítimo, havendo mais um fator influente na deterioração das fibras;
- IV. Aumentar o número de provetes ensaiados de cada tipo para melhorar a fiabilidade das curvas S-N e poder investigar de forma mais profunda os valores da pré-tensão;
- V. Efetuar imersão individual de cada provete para garantir que todos têm a mesma área de contacto com o ambiente corrosivo, assegurando condições de imersão idênticas para todos.





---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gonçalves, C.R.D.S. (2019), "Efeito de ambientes hostis na resposta à fadiga de laminados vidro/epóxico" Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Produção e Projeto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [2] M.K. Egbo, A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering, *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>.
- [3] M. Das, S. Sahu, D.R. Parhi, Composite materials and their damage detection using AI techniques for aerospace application: A brief review, in: *Mater. Today Proc.*, Elsevier Ltd, 2021: pp. 955–960. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.005>.
- [4] W. F. Smith, *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, (1986).
- [5] P. Vieira Soares, O. na FEUP, R. Miranda Guedes, *Análise da durabilidade e degradação de materiais compósitos com base nas curvas S-N*, 2019.
- [6] da Silva, J.P. (2018), "Effect of hostile environments in the fatigue behaviour of carbon / epoxy laminates" Master's Dissertation in Mechanical Engineering in the speciality of Production and Project, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [7] A.L. Djebbara Benzerga, Abdelkader Haddi, *Delamination Model Using Damage Mechanics Applied to New Composite for Orthopaedic Use*, (n.d.). <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20140403.06.html> (accessed October 29, 2021).
- [8] Mechanical loading of long bones. This figure shows the types of... | Download Scientific Diagram, (n.d.). [https://www.researchgate.net/figure/Mechanical-loading-of-long-bones-This-figure-shows-the-types-of-mechanical-loading-of\\_fig5\\_309150207](https://www.researchgate.net/figure/Mechanical-loading-of-long-bones-This-figure-shows-the-types-of-mechanical-loading-of_fig5_309150207) (accessed October 29, 2021).
- [9] P.R. Vieira, E.M.L. Carvalho, J.D. Vieira, R.D. Toledo Filho, Experimental fatigue behavior of pultruded glass fibre reinforced polymer composite materials, *Compos. Part B Eng.* 146 (2018) 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.03.040>.
- [10] W. Zhang, Z. Zhou, B. Zhang, S. Zhao, A phenomenological fatigue life prediction model of glass fiber reinforced polymer composites, *Mater. Des.* 66 (2015) 77–81. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.036>.
- [11] D.A.E. Freire Jr. RCS, Fatigue damage mechanism and failure prevention in fiberglass reinforced plastic. , *Mater Res.* (2005) 1–5.
- [12] T.T.Z.A. Keller T, Tensile fatigue performance of pultruded glass-fiber reinforced polymer profiles. , *Compos Struct.* 68 (2005) 235–245.
- [13] B.L. Agarwal BD, *Analysis and performance of fiber composites.*, John Wiley e Sons. (1990).

- [14] D.D. Samborsky, Fatigue of E-glass fiber reinforced composite materials and substructures, (1999) 1–532.  
<https://scholarworks.montana.edu/xmlui/bitstream/1/8614/1/31762104283328.pdf> (accessed October 28, 2021).
- [15] J. Degrieck and, W. Van Paepegem, Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials: Review, *Appl. Mech. Rev.* 54 (2001) 279–300.  
<https://doi.org/10.1115/1.1381395>.
- [16] H.A. Whitworth, Modeling Stiffness Reduction of Graphite/Epoxy Composite Laminates, *J. Compos. Mater.* 21 (1987) 362–372.  
<https://doi.org/10.1177/002199838702100405>.
- [17] J.N. Yang, D.L. Jones, S.H. Yang, A. Meskini, A Stiffness Degradation Model for Graphite/Epoxy Laminates, *J. Compos. Mater.* 24 (1990) 753–769.  
<https://doi.org/10.1177/002199839002400705>.
- [18] G.P. Sendeckyj, Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials, *Compos. Mater. Ser.* 4 (1991) 431–483. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-70507-5.50014-7>.
- [19] R.W. Hertzberg, J.A. Manson, Fatigue of engineering plastics, (1980) 295.
- [20] F. Bjørheim, S.C. Siriwardane, D. Pavlou, A review of fatigue damage detection and measurement techniques, *Int. J. Fatigue.* 154 (2022) 106556.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106556>.
- [21] T.M. Roberts, M. Talebzadeh, Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation, *J. Constr. Steel Res.* 59 (2003) 695–712.  
[https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00064-0).
- [22] A. Anastasopoulos, D. Kourousis, S. Botten, G. Wang, Acoustic emission monitoring for detecting structural defects in vessels and offshore structures, <Http://Dx.Doi.Org/10.1080/17445300903133099>. 4 (2009) 363–372.  
<https://doi.org/10.1080/17445300903133099>.
- [23] E. Puik, Methods for Sensing and Monitoring Fatigue Cracks and Their Applicability for Marine Structures, (n.d.).  
[https://www.academia.edu/21102308/Methods\\_for\\_Sensing\\_and\\_Monitoring\\_Fatigue\\_Cracks\\_and\\_Their\\_Applicability\\_for\\_Marine\\_Structures](https://www.academia.edu/21102308/Methods_for_Sensing_and_Monitoring_Fatigue_Cracks_and_Their_Applicability_for_Marine_Structures) (accessed October 28, 2021).
- [24] R.O. Ritchie, G.G. Garrett, J.P. Knott, Crack-growth monitoring: Optimisation of the electrical potential technique using an analogue method, *Int. J. Fract. Mech.* 1971 74. 7 (1971) 462–462. <https://doi.org/10.1007/BF00189118>.
- [25] I. Tomáš, O. Kovářík, J. Kadlecová, G. Vértesy, Optimization of fatigue damage indication in ferromagnetic low carbon steel, *Meas. Sci. Technol.* 26 (2015) 095603.  
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/9/095603>.
- [26] P.B. Nagy, Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization, *Ultrasonics.* 36 (1998) 375–381.
- [27] Campos, A.A.R. (2012), "Estudo dos Efeitos Ambientais no Comportamento

- Mecânico de Materiais Compósitos" Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- [28] A. Mohanty, M.M.-... materials and Engineering, undefined 2000, Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview, Wiley Online Libr. (n.d.). [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1439-2054\(20000301\)276:1%3C1::AID-MAME1%3E3.0.CO;2-W?casa\\_token=YkMkmH9JOT0AAAAA:O-0MWskHlrZc\\_t-6f9CN6YFqN4giUy43KHZ4YxMmwkXvRUUiSiZEzm3z2XsRgovpyrOeqhS2gxerS00](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1439-2054(20000301)276:1%3C1::AID-MAME1%3E3.0.CO;2-W?casa_token=YkMkmH9JOT0AAAAA:O-0MWskHlrZc_t-6f9CN6YFqN4giUy43KHZ4YxMmwkXvRUUiSiZEzm3z2XsRgovpyrOeqhS2gxerS00) (accessed October 28, 2021).
- [29] M.M. Thwe, K. Liao, Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 375–387. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00225-7).
- [30] F.L. Matthews, R.D. (Rees D.. Rawlings, *Composite materials : engineering and science*, (n.d.) 470.
- [31] J. Milke, A. Vizzini, Thermal Response of Fire-Exposed Composites, *J. Compos. Technol. Res.* 13 (1991) 145–151. <https://doi.org/10.1520/CTR10219J>.
- [32] Fractography: observing, measuring and interpreting fracture structure topography, (n.d.). [www.cambridge.org](http://www.cambridge.org) (accessed October 28, 2021).
- [33] M.C. Lee, N.A. Peppas, Models of Moisture Transport and Moisture-Induced Stresses in Epoxy Composites:, [Http://Dx.Doi.Org/10.1177/002199839302701201.27](http://Dx.Doi.Org/10.1177/002199839302701201.27) (2016) 1146–1171. <https://doi.org/10.1177/002199839302701201>.
- [34] Y. Weitsman, Moisture in Composites: Sorption and Damage, *Compos. Mater. Ser.* 4 (1991) 385–429. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-70507-5.50013-5>.
- [35] J.R. Maddocks, Microcracking in composite laminates under thermal and mechanical loading, (1995).
- [36] I. Yamaguchi, A laser-speckle strain gauge, *J. Phys. E.* 14 (1981) 1270. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/14/11/012>.
- [37] D. Garcia, J.-J. Orteu, L. Penazzi, J.J. Orteu, L. Penazzi, A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming, (n.d.). [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00380](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00380).
- [38] P.F. Luo, Y.J. Chao, M.A. Sutton, W.H. Peters, Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision, *Exp. Mech.* 1993 332. 33 (1993) 123–132. <https://doi.org/10.1007/BF02322488>.
- [39] H. Tu, Z. Gao, C. Bai, S. Lan, Y. Wang, Q. Zhang, Single-camera 3D-DIC system based on a fiber bundle, *Opt. Lasers Eng.* 147 (2021) 106743. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106743>.
- [40] T. Baiôa, Medição de micromovimentos em implantes endósseos pelo método de correlação de imagem digital tridimensional, (2013).